



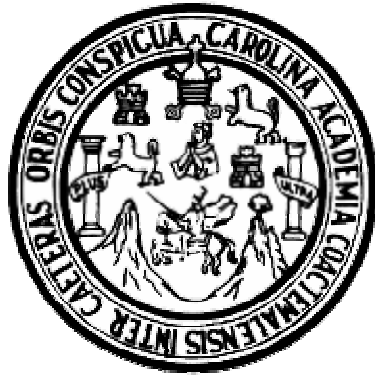
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

**PROTECCIÓN CATÓDICA Y SU APLICACIÓN EN TANQUES DE
ALMACENAMIENTO DE PRODUCTOS PETROLEROS EN PLANTAS
GUATEMALTECAS**

RENÉ OSWALDO GIRÓN CALLEJAS
ASESORADO POR ING. ALFREDO DE JESÚS MURALLES ACHÉ

GUATEMALA, AGOSTO DEL 2005.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROTECCIÓN CATÓDICA Y SU APLICACIÓN EN TANQUES DE
ALMACENAMIENTO DE PRODUCTOS PETROLEROS EN PLANTAS
GUATEMALTECAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA**

POR

RENÉ OSWALDO GIRÓN CALLEJAS

**ASESORADO POR ING. ALFREDO DE JESÚS MURALLES ACHÉ
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE**

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, AGOSTO DEL 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Eliza Yasmilda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Manuel Fernando Barrera Pérez
EXAMINADOR	Ing. Carlos Francisco Gressi López
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino González
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**PROTECCIÓN CATÓDICA Y SU APLICACIÓN EN TANQUES DE
ALMACENAMIENTO DE PRODUCTOS PETROLEROS EN PLANTAS
GUATEMALTECAS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha Febrero del 2004.

René Oswaldo Girón Callejas

AGRADECIMIENTOS

A:

Mis padres, abuelos y tías por sus esfuerzos y sacrificios para que lograra llegar a esta meta.

Mi esposa, por su amor y soporte incondicional.

Ing. David Aldana, por su ayuda en los datos técnicos de éste trabajo.

Compañía Carburantes y Petróleos S.A. por su valiosa aportación a éste trabajo.

Ing. Jesús Alfredo Muralles Aché por su ayuda a la realización de éste trabajo.

Departamento de Ingeniería y Operaciones, de la Dirección General de Hidrocarburos, Ministerio de Energía y Minas, en especial a los Ingenieros César Corado y Daniel Cortez, por su gran aporte a éste trabajo.

ÍNDICE GENERAL

	Página
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VIII
GLOSARIO.....	X
RESUMEN.....	XXII
OBJETIVOS.....	XXV
INTRODUCCIÓN.....	XXVI
1. INTRODUCCIÓN A LA CORROSIÓN.....	1
1.1 ¿Qué es corrosión?.....	1
1.2 Proceso de la corrosión.....	3
1.2.1 Reacciones anódicas.....	5
1.2.1 Reacciones catódicas.....	5
1.3 Factores que afectan la velocidad de corrosión.....	7
1.3.1 Discontinuidades del metal.....	8
1.3.2 Discontinuidades del medio corrosivo.....	9
1.4 Clasificación de los metales.....	10
1.4.1 Serie de potenciales normales o estándar.....	11
1.4.2 Serie galvánica.....	11
1.5 Tipos de corrosión.....	12
1.5.1 Corrosión uniforme.....	12
1.5.2 Corrosión localizada.....	13
1.5.2.1 Picadura (<i>Pitting</i>)	13
1.5.2.2 Corrosión en grietas (<i>crevice</i>)	14

1.5.3	Corrosión combinada con otros fenómenos.....	15
1.5.3.1	Esfuerzos mecánicos.....	16
1.5.3.2	Erosión.....	16
1.5.4	Corrosión por bacterias.....	17
2.	DISEÑO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA.....	19
2.1	Introducción a los métodos protectores.....	19
2.1.1	Pinturas y recubrimientos.....	19
2.1.2	Protección catódica.....	22
2.2	Diseño de sistemas de protección catódica por ánodos.....	
	Galvánicos o de sacrificio.....	25
2.2.1	Características de un ánodo galvánico o de sacrificio..	27
2.2.2	Tipos de ánodos.....	28
2.2.3	Material de relleno (<i>Backfill</i>).....	28
2.3	Criterios de protección.....	30
2.3.1	Resistividad del suelo.....	31
2.3.2	Potenciales.....	35
2.3.2.1	Medición.....	36
2.3.3	Cálculos diseño de un sistema de ánodos	
	galvánicos.....	37
2.3.4	Cálculos diseño de un sistema de corriente impresa...	38
2.3.5	Potenciales <i>ON – OFF</i>	46
2.3.6	Mediciones de intervalo corto.....	47
3.	PROTECCIÓN CATÓDICA EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO.....	51
3.1	Normas	
3.2	Protección catódica en fondos de tanques de almacenamiento	51

3.2.1	Criterios para sistemas de protección catódica.....	51
3.2.2	Introducción.....	52
3.2.3	Mediciones de potencial.....	53
3.2.4	Criterios para fondos de tanques de almacenamiento.....	53
3.2.5	Electrodos de referencia alternativos al de cobre.....	54
3.3	Sistemas de protección catódica para tanques de almacenamiento.....	55
3.3.1	Descripción.....	55
3.4	Especificaciones para tanques de almacenamiento.....	57
3.4.1	Ánodos de sacrificio.....	57
3.4.2	Ánodos para sistemas de corriente impresa.....	59
3.4.3	Materiales de los ánodos.....	61
3.4.4	Ánodos galvánicos (de sacrificio).....	62
3.4.4.1	Materiales de relleno (<i>Backfill</i>)	63
3.4.5	Requerimientos de corriente y voltaje.....	65
3.4.6	Rectificador.....	67
3.4.7	Selección del rectificador.....	68
3.4.8	Aislamiento eléctrico.....	69
3.5	Otros factores que afectan la protección catódica.....	69
3.5.1	Reemplazo de fondos de tanques de almacenamiento....	70
3.5.2	Contención secundaria.....	71
3.5.2.1	Recubrimiento de membrana impermeable.....	73
3.6	Construcción de un sistema de protección catódica.....	74
3.6.1	Sistemas de ánodos de sacrificio.....	74
3.6.2	Sistemas de corriente impresa.....	75
3.6.3	Instalación de camas de ánodos poco profundas	77
3.6.4	Instalación de cableado.....	79
3.6.5	Cajas unión para pruebas de corrosión.....	80

3.7	Mantenimiento.....	84
3.7.1	Operación y mantenimiento de los sistemas de protección catódica.....	85
3.7.2	Seguridad.....	86
4.	Protección catódica en tanques de almacenamiento de la planta	
	Carpesa (Carburantes y Petróleos S.A.).....	87
4.1	Introducción.....	87
4.2	Sistema de protección catódica en tanques de almacenamiento	88
4.3	Descripción e instalación del sistema.....	90
4.4	Conocimiento de materiales.....	92
4.5	Planos y diagramas.....	94
4.6	Sistema de protección catódica para tanques de 115 pies de diámetro.....	98
4.7	Planos y diagramas del tanque de 115 pies en planta Carpesa	98
4.8	Circuito del rectificador.....	101
4.8.1	Descripción de componentes del rectificador.....	102
4.9	Pruebas de campo.....	103
4.10	Mantenimiento.....	119
	CONCLUSIONES.....	111
	RECOMENDACIONES.....	113
	BIBLIOGRAFÍA.....	115
	ANEXOS.....	117

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
1. Proceso Metalúrgico.....	2
2. Corrosión en tramo de tubería enterrada o sumergida.....	3
3. Efecto acelerador del óxido de hierro.....	8
4. Efecto acelerador de la pila galvánica.....	8
5. Efecto acelerador de medios diferentes.....	9
6. Efecto acelerador de diferentes concentraciones de oxígeno.....	10
7. Corrosión por picadura (<i>Pitting</i>).....	13
8. Corrosión en grietas (<i>Crevice</i>).....	14
9. Protección catódica con ánodo galvánico.....	22
10. Sistema de protección catódica.....	23
11. Corte de un ánodo de magnesio para suelos.....	29
12. Método Wenner para medición de resistividad de suelos.....	32
13. Caja de suelos para medición de resistividad.....	34
14. Medición de potencial de tubería enterrada.....	37
15. Transformador rectificador.....	42
16. Medición de potenciales de intervalo corto.....	48
17. Curva que expresa los resultados de un estudio de intervalo corto..	49
18. Protección de tanque con ánodos de sacrificio.....	59
19. Protección de tanque con corriente impresa.....	60
20. Configuración para una prueba de requerimiento de corriente.....	65
21. Nuevo fondo de acero sobre fondo viejo	71
22. Membrana impermeable bajo tanque de almacenamiento.....	73
23. Instalación típica de ánodo galvánico.....	75

24.	Instalación típica de camas de ánodos poco profundas.....	78
25.	Tablero de control y electrodo de referencia permanente.....	83
26.	Tubería perforada para electrodo de referencia.....	84
27.	Plano del sistema de protección catódica y tanques de 4 x 78 pies ..	98
28.	Plano del sistema de protección catódica para cada tanque de 78 ft.	99
29.	Caja unión para ánodos.....	100
30.	Diagrama simplificado del cableado del sistema.....	101
31.	Configuración del sistema completo de tanques de 115 pies.....	103
32.	Configuración del sistema de cada tanque de 115 pies.....	104
33.	Esquema eléctrico de los rectificadores.....	105
34.	Hoja de operación del rectificador tanques de 115 pies.....	109
35.	Medición de potenciales a celda de referencia.....	110
36.	Hoja de operación del rectificador.....	111
37.	Medición de potenciales.....	112

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
I. Sistema de recubrimiento.....	20
II. Ánodos galvánicos y su campo de aplicación.....	26
III. Características de los ánodos galvánicos.....	27
IV. Clasificación de medios corrosivos según su resistividad.....	34
V. Potenciales de protección.....	35
VI. Electroodos de referencia más usados.....	36
VII. Cálculo de la vida útil de los ánodos.....	38
VIII. Materiales de Relleno (<i>Backfill</i>) para ánodos.....	46
IX. Especificaciones de ánodos.....	64
X. Ventajas del sistema de protección catódica de ánodos de cinta de óxidos metálicos.....	89
Anexo 3 Serie de potenciales normales o estándar.....	119
Anexo 4 Serie galvánica.....	120

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Amperios
AGA	Asociación Americana del Gas (<i>American Gas Association</i>)
Al	Aluminio
API	Instituto Americano del Petróleo (<i>American Petroleum Institute</i>)
ASTM	Sociedad Americana para pruebas y Materiales (<i>American Society for testing and materials</i>)
AWG	Medida americana de conductores (<i>American wire gauge</i>)
°C	Grados Centígrados
C.A.	Corriente Alterna
Cadweld®	Marca registrada de soldadura por aluminio-termia
cm	Centímetros
Cu/CuSO₄	Cobre/Sulfato de Cobre Saturado
°F	Grados Fahrenheit
Fe	Hierro
H	Hidrógeno
H₂	Gas hidrógeno
H₂O	Molécula de Agua
HMWPE	Polietileno de Alto peso molecular (<i>High Molecular Weight Polyethylene</i>)
kg	Kilogramos
km	Kilómetros
kVA	Kilo Volta-amperios
lb	Libras
MΩ	Mega ohms
m	Metros
mV	Milivoltios

NACE	Asociación Americana de Ingenieros en Corrosión <i>(National Association of Corrosion Engineers)</i>
O₂	Dos átomos de oxígeno
'	Pies
"	Pulgadas
SO₄Na₂	Sulfato de Sodio
SRB	Bacterias Desulfurio – Desulfuricans
thermOweld®	Marca registrada de soldadura por aluminio-termia
UCP	Unidad de Control de Potencia
V	Voltios
Zn	Zinc
Ω	Ohm medida de Resistencia eléctrica
Ω-cm	Ohm-centímetro medida de resistividad del suelo

GLOSARIO

ACABADO. Apariencia que presenta una película seca. También se llama acabado a la capa final de un sistema de pintura.

ACERO ESTABILIZADO. Nombre, con que se conoce a los aceros inoxidables que contienen un elemento aleante (como Titanio o Tántalo) que le confiere la propiedad de resistir la precipitación de carburos, fenómeno conocido como sensibilización.

ACRÍLICA. Resina polimerizada que se forma con el ácido acrílico, el ácido meta-acrílico, ésteres de estos ácidos o acrilonitrilo. Base de pinturas.

ACTIVADOR. Sustancia química que activa como catalizador, produciendo la polimerización de una resina. Todas las pinturas de doble envase, incluyen en uno de ellos el monómero o materia prima base de los polímeros y en otro, el activador o catalizador.

ACTIVO. (o metal activo); Es el metal que tiene tendencia a oxidarse (corroerse) en los medios habituales. Opuesto a pasivo. Ver pasividad.

ADHERENCIA. Propiedad de una pintura que le permite permanecer pegada a una superficie.

AGRIETAMIENTO POR CORROSIÓN BAJO TENSIÓN. En inglés *stress corrosion cracking* (SCC). Tipo de falla que se produce en aleaciones metálicas sometidas simultáneamente a esfuerzos mecánicos y corrosión.

ALQUÍDICA. Resina polimerizada empleada como base para pinturas. Es el producto de reacción de poli-alcoholes y ácidos poli-básicos.

ALTO ESPESOR. En inglés *high build*, recubrimientos que producen películas gruesas. No confundir con altos sólidos.

AMPERE. Unidad de medida de corriente eléctrica. Puede ser CD (corriente directa) o CA (corriente alterna).

ANIÓN. Ión cargado negativamente.

ANÓDICA. (PROTECCIÓN) Técnica de prevención de la corrosión, que se basa en provocar oxidación superficial del metal a proteger, mediante la aplicación de una corriente eléctrica directa; la capa de óxido formada protege al metal de ulteriores ataques.

ANÓDICO, INHIBIDOR Sustancia química o mezcla de sustancias que frena la velocidad de la reacción de corrosión u oxidación (reacción anódica).

ANODIZADO Capa de óxido protectora que se forma sobre la superficie de un metal o aleación. Se emplea principalmente para aleaciones de aluminio y de titanio. Ver pasividad.

ÁNODO. Electrodo o parte del metal de una estructura en la cual se produce la reacción de oxidación o corrosión. Opuesto a cátodo.

ÁNODO GALVÁNICO Ánodo de sacrificio de un sistema de protección catódica que no emplea fuentes de energía externas. En suelos los más comunes son aleaciones de zinc o de magnesio y en agua de mar aleaciones de aluminio. Estas aleaciones forman una pila con los aceros que permite cambiar el potencial de los mismos y protegerlos de la corrosión. Ver también protección Catódica.

ÁNODO DE CORRIENTE IMPRESA. Ánodo de sacrificio de un sistema de protección catódica que emplea fuentes de energía externas. Se emplean aleaciones de hierro / silicio / cromo, grafito, óxidos inertes. Plomo / plata, titanio / platino entre, otras. Cualquier metal conductor puede servir como ánodo de corriente impresa. Ver también protección catódica.

ASTM (*American Society for Testing and Materials*). Sociedad americana para pruebas y materiales.

ATAQUE LOCALIZADO. Corrosión que se concentra en zonas pequeñas; hay dos tipos picadura *pitting* y en grietas *crevice* .

ATAQUE POR CHOQUE. En inglés (*impingement attack*); fenómeno combinado de corrosión y erosión, generalmente originado por la turbulencia de un líquido que arrastra partículas sólidas, por ejemplo crudo con arena

"CADWELD® , thermOweld®". Marcas registradas de sistemas de soldadura aluminotermia muy usadas en sistemas de protección catódica. También conocidas como "soldadura auto fundente".

CAÍDA I *R. Error de medición ocasionado por la caída de voltaje que produce la circulación de la corriente a través del medio. Es de particular importancia en suelos de alta resistividad. Ver potencial a circuito abierto.

CAMA DE ÁNODOS Grupo o conjunto de ánodos de un sistema de protección catódica. También llamado lecho de ánodos. En inglés *groundbed*.

CAMA PROFUNDA. En inglés *Deep groundbed*. Forma de instalar un conjunto de ánodos de corriente impresa que se caracteriza porque los ánodos se colocan en una columna vertical de coque a una profundidad de 15 metros (50 pies) o mayor.

CATÓDICA, CORROSIÓN. Se presenta particularmente en metales del tipo anfótero, esto es que son capaces de formar sales actuando como álcalis o como ácidos. Por ejemplo: aluminio y plomo. En los aceros sólo se presenta corrosión u oxidación en las zonas anódicas.

CATÓDICA, PROTECCIÓN. Técnica de prevención de la corrosión que se basa en conectar al metal o aleación a proteger otro metal más activo que se oxidará, manteniendo al primero como cátodo y en consecuencia, protegido de la corrosión. Puede efectuarse de dos maneras: mediante aleaciones de sacrificio basadas en aluminio (Al), magnesio (Mg) o zinc (Zn), o bien conectando los ánodos de cualquier metal conductor a una fuente de corriente continua que los obliga a comportarse anódicamente. El primer sistema se conoce como por ánodos galvánicos o de sacrificio y el segundo por corriente impresa.

CATÓDICO, DESPRENDIMIENTO. Proceso de desprendimiento de una película de recubrimiento ocasionado por la aplicación de una corriente excesiva de protección catódica, que aumenta el potencial de la estructura por encima del límite que dicho recubrimiento es capaz de soportar. Ver protección catódica.

CATÓDICO, INHIBIDOR. Sustancia química o mezcla de sustancias que frena la velocidad de la reacción catódica o de reducción.

CÁTODO. Electrodo o parte de la estructura en que se produce la reacción catódica o de reducción. Opuesto al ánodo.

CELDA DE AIREACIÓN DIFERENCIAL. Pila que se forma por la existencia de dos sectores con diferente concentración de aire o de oxígeno. También llamada celda de concentración de oxígeno.

COQUE. Relleno de ánodos para sistemas de protección catódica. Se elabora con coque de carbón molido y/o pulverizado o con coque de petróleo calcinado y molido. Aumenta la vida útil de los ánodos y mejora la salida de corriente.

CORRIENTE DE FUGA. Corriente parásita que vaga por el suelo y puede llegar a causar daños por interferencia en una estructura. En inglés *stray current*. Ver interferencia

CORROSIÓN. Pérdida de propiedades de un material por acción del medio ambiente. No necesariamente implica la aparición de un producto de

corrosión visible sobre la superficie, puede manifestarse como una reducción de resistencia mecánica, por ejemplo.

CORROSIÓN-FATIGA. Agrietamiento de un material producido por esfuerzos repetitivos aplicados sobre el mismo, en un ambiente corrosivo.

CORROSIÓN, VELOCIDAD DE. Destrucción o pérdida de propiedades de un material por acción del medio, en función del tiempo. Habitualmente se expresa en alguna de las siguientes unidades:

- MDD = miligramos por decímetro cuadrado por día.
- MPY = milésimas de pulgada por año.

CREVICE. Palabra inglesa que designa una forma de ataque corrosivo localizado, que se produce en espacios confinados o grietas y se debe a la formación de celdas de concentración de oxígeno.

ELECTROLITO. Medio conductor de la corriente como un suelo húmedo, agua, industrial, potable o de mar.

ELECTRODO DE REFERENCIA. Dispositivo de medición de potenciales. En suelos se utilizan los electrodos de referencia de cobre / sulfato y en agua de mar se prefieren los de plata / cloruro de plata. También llamado celda de referencia o media celda.

EMPACADURA AISLANTE. Dispositivo de aislamiento entre dos sectores de tubería que se instala en una brida (*Flange*). Consta de una empackadura o anillo central, arandelas y manguitos que aíslan los tornillos. Hay diferentes modelos según la aplicación.

EPOXICAS. Resinas de dos componentes que producen una película dura y flexible, de gran resistencia química y amplio campo de aplicación en diversos usos industriales. Se producen por reacción entre bisfenol y epiclorhidrina.

EROSIÓN. Destrucción de un material por la acción abrasiva de un fluido en movimiento, usualmente acelerada por la presencia de partículas sólidas.

ESMALTE. Pintura que se caracteriza por formar películas muy lisas, de excelente acabado superficial.

ESTACIÓN DE PRUEBA. En inglés *test station*. Punto de conexión de cables que se emplea para mediciones. Ver protección catódica.

FATIGA. Efecto de esfuerzos cíclicos sobre un material que puede llevar a la rotura del mismo.

FATIGA, LÍMITE DE. Nivel máximo de tensiones cíclicas que puede soportar una película o un metal sin sufrir rotura.

FONDO. Primera mano o capa de un sistema de pintura, que se aplica directamente sobre la superficie a recubrir. También llamado imprimación. En inglés *primer*.

FONDO ANTICORROSIVO. Primera mano o capa de un sistema de pintura que posee propiedades inhibidoras de la corrosión debido al agregado de pigmentos especiales como el minio (óxido de plomo).

GALVANIZADO. Revestimiento metálico a base de una delgada capa de cinc que se aplica sobre los aceros al carbono. Puede ser galvanizado normal o por inmersión en caliente según el procedimiento de aplicación.

GRANALLADO. *Grit blasting* en inglés, método de preparación de superficies metálicas; se realiza mediante un chorro de granalla (generalmente de acero), que choca con la superficie limpiándola de suciedad y óxido, creando una rugosidad que facilita el agarre del fondo.

IMPRIMACIÓN. (Ver fondo). También se llama imprimación al producto líquido que se aplica sobre una superficie metálica para permitir la adhesión de una película, ya sea de polietileno, polipropileno o caucho. Se emplea tanto para revestimientos en forma de película continua como para cintas.

INTERFERENCIA. Efecto indeseable por el cual una corriente parásita que vaga por el medio (suelo o agua) penetra en una estructura y en el punto de salida, ocasionando daños localizados por electrólisis. Las fuentes más comunes de este tipo de problemas son los sistemas de protección catódica cercanos, aterramientos de subestaciones y corrientes inducidas por líneas de alta tensión cercanas. Ver corriente de fuga.

JUNTA AISLADORA MONOLÍTICA. Dispositivo que permite aislar eléctricamente dos tramos de tubería. A diferencia de las empacaduras aislantes viene ensamblada de fábrica y se instala soldándola como un tramo adicional de tubería.

NACE *National Association of Corrosion Engineers*. Asociación nacional de ingenieros en corrosión. Organismo norteamericano vinculado a la corrosión y su prevención.

NTD (*Non Destructive Testing*). Conjunto de técnicas utilizadas para inspeccionar equipos y materiales, entre las cuales se incluyen las tintas penetrantes, las partículas magnéticas, el ultrasonido, las corrientes de Eddy, la radiografía, la gamma grafía y la termografía.

OHM. Unidad de medida de resistencia eléctrica.

PASIVIDAD. Formación de una capa de óxido sobre la superficie de un metal o aleación que la protege de un ataque posterior. Ejemplos: el aluminio se pasiva por formación de una capa de trióxido de aluminio, los aceros inoxidable por una capa de óxido de cromo.

PASIVO. Metal que se ha cubierto de una capa de óxido protectora que evita los ataques posteriores. Opuesto a activo. Ver pasividad.

PERFIL DE ANCLAJE. Nivel de rugosidad que queda en una superficie metálica como consecuencia de su preparación con chorro de abrasivos o por tratamiento químico.

pH. (potencial hidrógeno). Es una medida del nivel de acidez o alcalinidad de un medio Se expresa en una escala de 0 a 14 siendo de 0 a 7 el rango ácido y de 8 a 14 el rango alcalino. Se define como el potencial negativo de la concentración de iones hidrógeno.

PICADURA. En inglés *pitting*, corrosión localizada en forma de ataques profundos que abarcan áreas pequeñas.

PILA GALVÁNICA. Diferencia de voltaje producido por el contacto entre dos metales o aleaciones diferentes.

PINTURA. Producto líquido compuesto por un vehículo que es capaz de formar una película, un solvente apropiado a dicho vehículo que se emplea para facilitar la aplicación y pigmentos que le dan color y algunas propiedades específicas.

POLARIZACIÓN. Cambio de voltaje de una estructura desde el potencial natural hasta el potencial de protección. Ver protección catódica.

POLÍMERO. Sustancia orgánica compleja constituida por unidades funcionales denominadas monómeras, combinadas entre sí. La unión de los monómeros se acelera mediante un catalizador o activador. Ejemplo: epóxicas.

POLIURETANOS. Pinturas de dos componentes utilizadas para la protección de estructuras expuestas a la atmósfera. Se caracterizan por mantener un alto brillo y color. Son de alto costo.

POTENCIAL. Medición del voltaje de una estructura con respecto a un electrodo de referencia. También se mide el potencial de los ánodos de sacrificio como control de calidad. Ver protección catódica.

POTENCIAL A CIRCUITO ABIERTO. Voltaje medido con los rectificadores apagados. Este es el verdadero valor de potencial de una estructura porque no incluye el error por caída IR y por ello es el que debe utilizarse para determinar si está o no protegida. En inglés *OFF potential*.

POTENCIAL NATURAL. Voltaje de una estructura enterrada o sumergida sin protección catódica.

RELLENO. (En inglés *backfill*). Material que se coloca alrededor de un ánodo para aumentar la vida útil del mismo y mejorar el drenaje de corriente.

RESISTIVIDAD. (resistencia eléctrica específica.) Es la resistencia eléctrica de un volumen determinado de electrolito, sea suelo, agua o medio químico. Se emplea para determinar el nivel de corrosividad del medio. En suelos se mide generalmente con el Método de Wenner o de las cuatro varillas.

SANDBLASTING. (Chorro de arena). Palabra inglesa que designa un método de preparación de superficies para ser pintadas. Se basa en producir un impacto de partículas de arena sobre la superficie, que elimina la suciedad y el óxido y crean una rugosidad o patrón de anclaje que permite la adherencia mecánica del fondo. La arena a utilizar debe tener características especiales en cuanto a tamaño, composición, dureza, uniformidad, etc. No debe contener cloruros ni sulfatos.

SERIE DE POTENCIALES NORMALES. También conocida como Serie de Potenciales de Oxidación. Clasificación de los metales según su potencial de electrodo normal (solución 1N de sus iones a 25 °C y presión atmosférica).

SERIE DE POTENCIALES GALVÁNICOS. Clasificación de metales y aleaciones según su potencial en agua de mar.

VOLTIO. Unidad de medida de voltaje eléctrico o diferencia de potencial. Puede ser CD corriente directa ó CA corriente alterna.

WENNER. Técnica de medición de la resistividad de suelos. Ver resistividad

RESUMEN

La corrosión, es el proceso mediante el cual, los metales se deterioran por la acción del medio donde se encuentran. Se necesitan varios elementos para que la corrosión ocurra, un ánodo que es la zona que sufrirá corrosión, un cátodo que es el sitio al cual, llega la corriente proveniente del suelo y que también se protege de la corrosión. Un medio corrosivo que es el sitio donde se encuentra la estructura. Finalmente una corriente eléctrica y un conductor eléctrico que generalmente es la estructura.

Existen dos reacciones en el proceso de corrosión:

La reacción anódica que da como resultado $\text{metal} \Rightarrow \text{metal oxidado} + \text{electrones libres}$.

La reacción catódica: donde se producen dos tipos de reacción, la reacción del hidrógeno y la reacción del oxígeno.

Podemos encontrar diferentes tipos de corrosión, en ésta clasificación podemos mencionar la corrosión uniforme, galvánica, localizada, y una sub-clasificación de ésta: (*pitting*) o picadura y (*crevice*) grietas o de espacios confinados. Además, la corrosión también puede ser combinada con otros fenómenos, como esfuerzos mecánicos, erosión y la corrosión por bacterias.

Dentro de los métodos protectores podemos encontrar principalmente dos: sistemas de recubrimiento y sistemas de protección catódica, estos se complementan uno con el otro. Los sistemas de recubrimiento que constan básicamente de tres etapas:

Preparación de la superficie, fondo o imprimación y el acabado. En cuanto a la protección catódica, que es el segundo sistema, existen dos sub-clasificaciones,

la protección catódica por ánodos de sacrificio y la protección catódica por corriente impresa. El sistema de ánodos es un sistema donde se protegerá la estructura sacrificando otra (los ánodos), creando una pila de corrosión donde el cátodo será la estructura protegida y el ánodo un electrodo especial enterrado a cierta distancia de la estructura en contacto con el medio corrosivo.

El sistema de corriente impresa funciona bajo el mismo principio con la diferencia que la corriente de protección catódica se obtiene de una fuente externa de C.D.

La protección catódica incluye muchos campos; podemos mencionar su aplicación en barcos, tuberías enterradas y sumergidas, pozos petroleros, plataformas marinas y lacustres, oleoductos, pilotes metálicos de muelles, tanques de almacenamiento de hidrocarburos, tanques de agua, intercambiadores de calor, en fin su campo es muy amplio, ya que casi todos los materiales sufren corrosión.

Dentro del diseño y aplicación de los sistemas de protección catódica, se manejan diferentes conceptos, enumerando algunos podemos mencionar: mediciones de potencial eléctrico, medición de resistividad, mediciones (de potencial) ON – OFF, así como mediciones de potencial de intervalo corto.

Para tanques de almacenamiento se usan dos criterios principalmente, un potencial negativo de 850 mV de C.D. mínimo, con corriente catódica de protección aplicada, y el segundo un potencial negativo mínimo de 100 mV de C.D. de polarización entre el fondo metálico del tanque y el electrolito.

Los electrodos de referencia más usados son los de cobre / sulfato de cobre saturado, que también pueden ser sustituidos por electrodos de plata y zinc.

Los criterios que cumplen con la norma RP-019-93 "Protección Catódica externa para fondos de tanques de almacenamiento".

Todos los aspectos tomados en cuenta en el diseño del sistema de protección catódica para tanques de almacenamiento, ya sea este por ánodos de sacrificio o sistema de corriente impresa, entre los que podemos mencionar: ánodos inertes para corriente impresa, ánodos galvánicos (de sacrificio), materiales de relleno (backfill), rectificadores, juntas aislantes, así como otros factores que pueden afectar el funcionamiento de la protección catódica como, el reemplazo de fondos, la contención secundaria contra derrames. Estas y otras situaciones deben cumplir con las normas de NACE, API, ASTM y AGA, para el correcto funcionamiento de los sistemas.

En Guatemala existe un mercado muy amplio en el tema de hidrocarburos, existen varias compañías que almacenan hidrocarburos. Entre ellas CARPESA, y el diseño de protección catódica para sus tanques de 78 pies de diámetro y 115 pies de diámetro su vida útil será de 50 años.

El sistema usado para los tanques de esta planta, es de corriente impresa con ánodos inertes tipo cinta de óxidos metálicos.

OBJETIVOS

General

Establecer los criterios, metodologías y requisitos mínimos, para el diseño, selección de materiales, instalación y mantenimiento de los sistemas de protección catódica en tanques de almacenamiento de hidrocarburos.

Específicos

1. Conocer las ventajas y desventajas de los sistemas de protección catódica por medio de corriente impresa.
2. Conocer las ventajas y desventajas de los sistemas de protección catódica por medio de ánodos de sacrificio.
3. Conocer el diseño, instalación y mantenimiento de sistemas de protección catódicas para tanques de almacenamiento de productos petroleros.
4. Aplicar un sistema de protección catódica a tanques de almacenamiento de productos petroleros en una planta de almacenamiento guatemalteca.
5. Aplicar los métodos de medición de resistencia eléctrica del suelo etc., con el uso del equipo de medición y métodos regulados por ASTM (método Wenner).

1. INTRODUCCIÓN A LA CORROSIÓN

1.1 ¿Qué es la Corrosión?

En la naturaleza los metales se encuentran bajo la forma de compuestos estables. Así como ejemplo el hierro se encuentra bajo la forma de óxido de hierro, debido a que es la forma más estable, de menor energía y menos reactiva. El hombre ha encontrado la manera de utilizar los metales para su beneficio, extrayéndolos de la naturaleza, purificándolos y asociándolos con otros elementos para mejorar sus propiedades físicas y dándoles la forma apropiada para su utilización práctica. Éste es el campo de la Metalurgia.

Como nos muestra la figura 1, a través de estos procesos, se va transformando aquel compuesto natural en piezas metálicas que conformarán equipos; cada uno de éstos procesos utilizados requiere de un aporte de energía y la pieza metálica final, tiene la forma y las propiedades deseadas, que son: dureza, brillo, color, elasticidad, resistencia mecánica por mencionar algunas, y posee un nivel de energía mucho mayor del compuesto natural de donde proviene.

Figura 1 Proceso Metalúrgico



Fuente: Ing. Jorge H. Goldin. S., Inspector de Oleoductos 2002, Pág. 1.

Esta mayor carga energética hace que el metal resultado de este proceso sea mucho más inestable que el compuesto original, y como consecuencia éste tienda a regresar al nivel de energía bajo del compuesto natural. Esta tendencia de un metal de volver a su estado de energía natural es el fenómeno que conocemos con el nombre de corrosión.

Dando una definición más completa podemos decir que:

Corrosión = deterioro de un material por acción del medio.

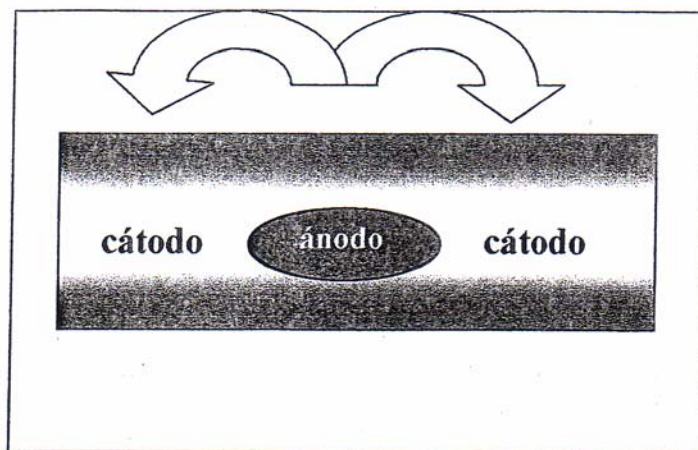
A pesar de que existe este fenómeno natural que tiende a degradar nuestros objetos metálicos para llevarlos al estado de óxidos o sales disueltas, sabemos que se emplean los metales y aleaciones metálicas en forma generalizada en todos los aspectos de la vida humana: en el hogar, en la industria, en los servicios, en los transportes, etc. Esto se debe

fundamentalmente a que la velocidad de corrosión puede ser suficientemente baja para no afectarnos significativamente.

1.2 Proceso de la Corrosión

Siempre que se produce un fenómeno de corrosión de un metal o aleación metálica sumergida en un medio húmedo, suelo, agua de río, agua de mar, medio industrial, etc. Es posible identificar varios de los componentes del proceso corrosivo. La figura 2 nos muestra un tramo de tubería enterrada en el cual se han señalado éstos componentes.

Figura 2 Corrosión en tramo de tubería enterrada o sumergida



Fuente: Ing. Jorge H. Goldin. S., Inspector de Oleoductos 2002, Pág. 3.

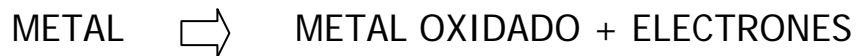
- **Ánodo o zona anódica:** Sitio donde se produce la salida de una corriente eléctrica desde el metal hacia el suelo. Esta es la zona donde el metal sufre corrosión.
- **Cátodo o zona catódica:** sitio al cual llega la corriente que proviene del suelo.
- **Medio corrosivo:** en este caso el medio corrosivo es el suelo húmedo que ataca al metal.
- **Corriente eléctrica:** flujo ordenado de electrones que viajan en una misma dirección, resultado de una diferencia de potencial existente entre dos elementos.
- **Conductor eléctrico:** la corriente que sale de la zona anódica y circula por el medio corrosivo para penetrar en la estructura por la zona catódica, debe cerrar el circuito, en este caso a través de la propia tubería que actúa como conductor eléctrico.

El paso de una corriente eléctrica desde el metal hacia el suelo (zona anódica) o desde el suelo hacia el metal (zona catódica) produce reacciones que debemos conocer para poder familiarizarnos con el fenómeno de corrosión y entender luego los mecanismos utilizados para prevenirlo.

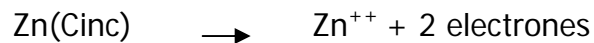
Es oportuno recordar el modelo del átomo, que tiene carga neutra o la suma de todas las cargas es cero. Si liberamos electrones del átomo se vuelve un ión positivo.

1.2.1 Reacciones Anódicas

En la zona anódica el metal se oxida siguiendo la reacción siguiente:



Ejemplos:

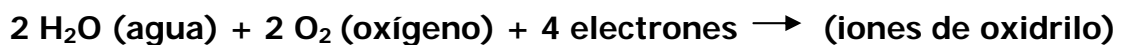


Estos electrones que quedan libres o disponibles de la reacción anódica se trasladan hasta la zona catódica, en la cual son consumidos en otras reacciones que se conocen con el nombre de reacciones catódicas.

1.2.2 Reacciones Catódicas

Las reacciones catódicas más comunes son las siguientes:

Reacción del Oxígeno:



Reacción del Hidrógeno:



Vamos a analizar cada una de ellas:

La reacción del oxígeno tiene lugar cuando en el medio húmedo hay oxígeno disuelto; esa combinación de agua y oxígeno reacciona con los electrones que quedaron disponibles de la reacción anódica o reacción de corrosión para dar como resultado la formación de iones de hidroxilo. Estos iones son los causantes principales de la alcalinidad de un medio, podemos decir que esta reacción catódica de reducción de oxígeno aumenta la alcalinidad de un medio corrosivo.

La reacción del hidrógeno también consume electrones provenientes de la reacción anódica o de corrosión, pero en este caso el resultado es la formación de hidrógeno gaseoso. La presencia de iones hidrógeno en un medio húmedo es común en los medios ácidos. Recordemos que la acidez de un medio está dada por la presencia de estos iones hidrógeno. A medida que son consumidos por la reacción catódica del hidrógeno el medio pierde carácter ácido.

Es importante destacar que si no hubiera reacción catódica capaz de consumir los electrones que se generan en la reacción de corrosión o reacción anódica el fenómeno se detendría, porque de acuerdo con las leyes básicas de la electricidad no se puede acumular electrones. Por eso algunos de los métodos de prevención de la corrosión se basan en neutralizar las posibles reacciones catódicas que complementan la reacción de corrosión consumiendo los electrones que aquella libera. No puede haber reacción anódica o de corrosión si no hay una reacción catódica capaz de consumir los electrones que se producen.

1.3 Factores que afectan la velocidad de corrosión

Entre los factores que intervienen en la velocidad de corrosión de un metal podemos mencionar los siguientes:

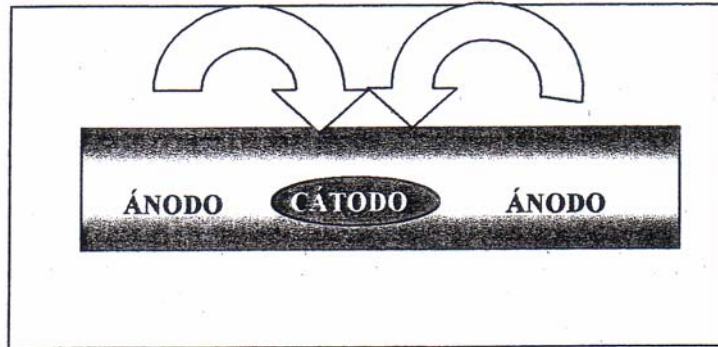
- La humedad del suelo o medio corrosivo.
- Su contenido salino.
- Los gases presentes en el medio.
- La composición del metal o aleación.
- Las tensiones residuales que pudieran quedar en el objeto metálico, producto del proceso de fabricación.
- Las tensiones mecánicas a que esté sometido el objeto por su uso.

En términos generales se puede afirmar que toda discontinuidad o irregularidad que exista en el objeto metálico o en el medio corrosivo constituirá un factor acelerador de la corrosión.

1.3.1 Discontinuidades en el metal

En la figura 3 se muestra una tubería enterrada y sometida a la acción corrosiva del suelo húmedo. Una mancha de óxido presente en la tubería se comporta como factor acelerador de la corrosión. Éste óxido se comporta como catódico frente al hierro no oxidado, formando una pila o par bimetálico que acelera el fenómeno natural de la corrosión. Es importante destacar que la corrosión ocurriría de todos modos, con o sin la presencia de las manchas de óxido, el efecto de éstas es acelerar la velocidad del proceso.

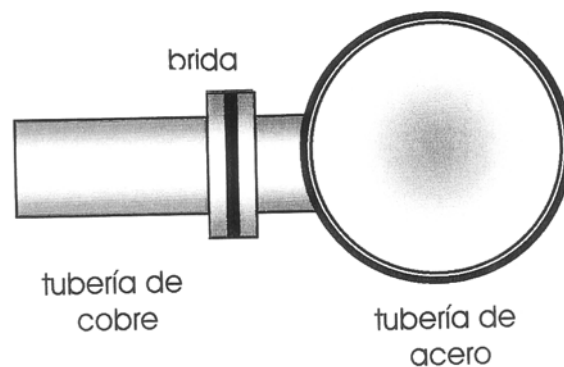
Figura 3 Efecto acelerador del óxido de hierro



Fuente: Ing. Jorge H. Goldin. S., Inspector de Oleoductos 2002, Pág. 6.

En la figura 4 se muestra un caso típico de una red de gas en la cual la tubería principal es de acero y la tubería de entrada a una casa para suministrar gas es de cobre. Éste último metal es más noble que el acero normal y, en consecuencia se formará una pila galvánica en la cual el ánodo o zona de corrosión será la tubería de acero y el cátodo lo constituirá la tubería de cobre. Esto puede multiplicar la velocidad de corrosión enormemente.

Figura. 4 Efecto Acelerador de pila Galvánica

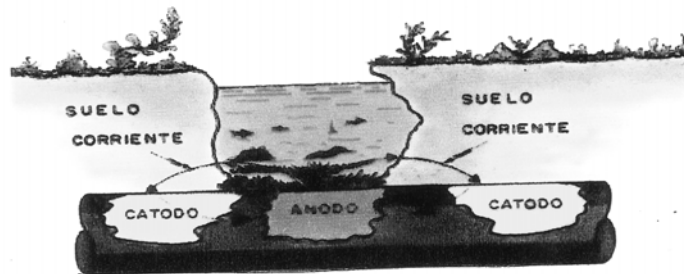


Fuente: Ing. Jorge H. Goldin. S., Inspector de Oleoductos 2002, Pág. 7.

1.3.2 Discontinuidades en el medio corrosivo

La figura 5 muestra el cruce de una tubería a través de un río o quebrada; la zona mojada de la misma será más anódica que la zona seca, formándose también una pila aceleradora de la corrosión, sólo que en este caso la causa es una discontinuidad en el medio corrosivo.

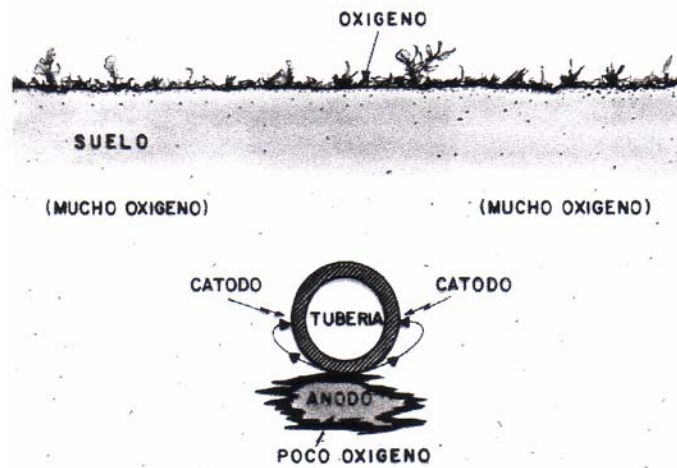
Figura 5 Efecto acelerador de medios diferentes



Fuente: Ing. Jorge H. Goldin. S., Inspector de Oleoductos 2002, Pág. 7.

En la figura 6 también tenemos el caso de una tubería enterrada; se observa que la parte superior de la misma recibe más oxígeno por encontrarse más cerca de la superficie y éste gas penetra en el suelo por difusión; mientras tanto, la parte inferior de la tubería está menos oxigenada. Esto produce un fenómeno acelerador de la corrosión conocido como celda o pila de aireación diferencial. La zona que recibe más oxígeno, en este caso la de arriba, tiene mayor facilidad para que se produzca la reacción catódica que involucra este gas, mientras que la zona con menor concentración del gas se convierte en la zona anódica o de corrosión. Por ello es muy común observar que cuando se destapa una tubería enterrada la parte inferior está más corroída que la superior.

Figura 6 Efecto acelerador de diferentes concentraciones de oxígeno



Fuente: Ing. Jorge H. Goldin. S., Inspector de Oleoductos 2002, Pág. 8.

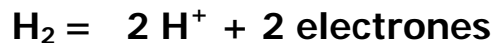
1.4 Clasificación de los metales

Si bien la corrosión es un fenómeno natural que afecta a todos los metales y aleaciones, la velocidad del proceso es diferente para cada uno de ellos; Así por ejemplo; sabemos que los aceros inoxidable son más resistentes a la corrosión en ciertos medios agresivos que los aceros al carbono normales. Esto nos permite establecer una clasificación de los metales en función de la velocidad con la cual se oxidan en un medio determinado; para ello se han elaborado dos tipos de ordenamiento llamados series.

1.4.1 Serie de Potenciales Normales o Estándar

Ordena los potenciales de oxidación de los metales sumergidos en una solución normal de sus propios iones a presión y temperatura normales.

En anexos se incluye una serie de Potenciales Normales o Estándar típica; cada elemento se representa por una reacción en equilibrio, siendo el término de la izquierda el elemento en estado metálico y el de la derecha el estado oxidado del mismo, estableciéndose un valor de potencial para cada uno de los equilibrios. Para medir este potencial se fijó como referencia y se le asignó un valor de cero, a la reacción del hidrógeno:



Estas series de potenciales normales sirven como referencia solamente, porque se basa en reacciones de equilibrio con una solución de sus propios iones del metal, lo que representa una condición ideal que difícilmente se da en la práctica. El segundo tipo de series engloba los metales y aleaciones de uso común en uno de los medios naturales más corrosivos y el que ocupa dos terceras partes del planeta Tierra: el agua de mar.

1.4.2 Series Galvánicas

A diferencia de la serie de potenciales normales, en la serie galvánica se incluyen también aleaciones comerciales como Monel^R, Inconel^R, Hastelloy^R. En el extremo activo o anódico indica aquellos metales o aleaciones que tienden a corroerse en agua de mar, en tanto que el extremo noble o catódico incluye a los que tiende a resistir mejor la corrosión en dicho medio. También en este

caso debe tomarse en consideración que la serie fue establecida en condiciones de laboratorio, de modo que sólo puede servir como referencia. ¿Para que sirven las Series?. Una de las aplicaciones posibles se da cuando se deben poner en contacto dos metales o aleaciones diferentes en un medio determinado; sabemos que el contacto entre dos metales produce un efecto acelerador de la corrosión en el cual uno de ellos se comportará como anódico y sufrirá corrosión en tanto que el otro será catódico quedando parcialmente protegido. ¿Cuál asumirá cada papel?. El estudio de las series nos permite anticipar cual será la tendencia de cada metal al ser acoplados, por ejemplo, la unión o contacto entre acero y aluminio en agua de mar (ver ubicación de cada uno en la serie galvánica) hace que el aluminio se disuelva (ánodo) y el hierro se proteja (cátodo).

1.5 Tipos de corrosión

1.5.1 Corrosión Uniforme

En este tipo de corrosión el metal se disuelve uniformemente en toda su superficie. La estructura pierde una capa de metal cuyo espesor estará determinado, por la velocidad con que se produce el ataque y el tiempo de exposición al medio agresivo. Ésta es una forma bastante rara de corrosión y con frecuencia lo que parece una corrosión uniforme en realidad se inicia como un ataque localizado en ciertos puntos o áreas de la superficie, una vez oxidados, estos sitios se convierten en catódicos invirtiéndose el fenómeno y así el proceso continúa hasta alcanzar un aspecto uniforme.

Algunas normas de construcción de recipientes metálicos establecen lo que se conoce como "corrosión allowance", ó corrosión permitida que no es otra

cosa que un espesor adicional de pared metálica que se coloca para que la corrosión la consuma durante un tiempo determinado y mientras tanto la estructura pueda seguir en operación porque la pared tiene espesor suficiente para resistir la condiciones de esfuerzo mecánico. Este criterio parte de dos premisas: la corrosión es uniforme y no podemos hacer nada para evitar que ocurra. Los casos reales en que ambas condiciones se cumplen son muy pocos.

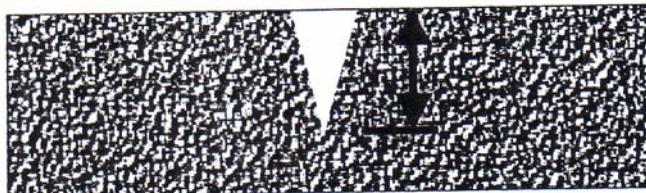
1.5.2 Corrosión localizada

Esta es una forma mucho más peligrosa de la corrosión porque ataca un área pequeña y el ataque avanza en profundidad pudiendo llegar a perforar completamente la pared de la estructura. Podemos diferenciar dos tipos característicos de corrosión localizada:

1.5.2.1 Picadura "Pitting"

En la figura 7 se muestra como el ataque se manifiesta de orificio. Puede presentarse en cualquier parte de la estructura.

Figura 7 Corrosión por picadura "Pitting"



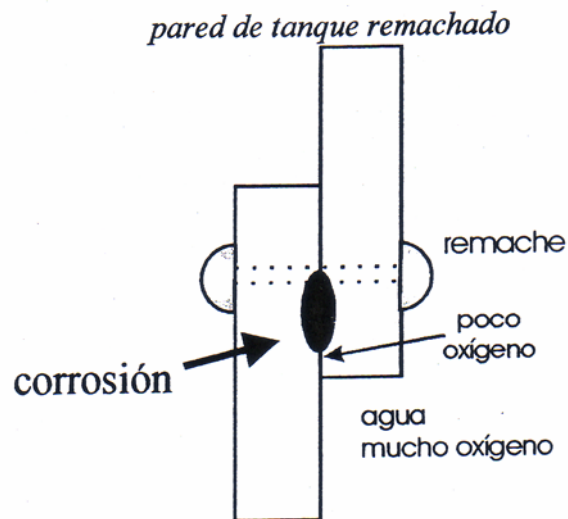
Una picadura se caracteriza porque el área superficial es pequeña pero la profundidad del ataque es importante

Fuente: Ing. Jorge H. Goldin. S., Inspector de Oleoductos 2002, Pág. 10.

1.5.2.2 Corrosión en grietas "crevice"

En la figura 8 se muestra un caso típico de corrosión en grietas o espacios confinados, se trata de un tornillo o perno con su arandela que sujeta dos planchas metálicas entre sí. Entre la arandela y la plancha hay un "espacio confinado" en el cual puede penetrar líquido pero la concentración de oxígeno es menor que en la parte exterior de la grieta. Se forma entonces una celda o pila de aireación diferencial que produce un ataque acelerado bajo la arandela, precisamente donde no es posible detectarlo. Para que se produzca este tipo de ataque deben darse ciertas condiciones: existencia de un espacio confinado o grieta, presencia de un medio corrosivo y diferencia en la concentración de algún agente agresivo dentro y fuera del espacio confinado, principalmente oxígeno.

Figura 8 Corrosión "Crevice " en grietas



Fuente: Ing. Jorge H. Goldin. S., Inspector de Oleoductos 2002, Pág. 11.

La corrosión localizada afecta principalmente a las aleaciones que se "pasivan", esto es, que por acción de un medio oxidante se recubren de una capa de óxido que las protege de ataques posteriores. En esta categoría entran los aceros inoxidable (capa de óxido de cromo) y las aleaciones de aluminio (capa de óxido de aluminio). Cuando una de estas aleaciones pasivadas se expone a un medio que contiene cloruros por ejemplo agua de mar, que son destructores de la capa pasiva, el tipo de ataque que se produce es por picadura o ataque localizado.

1.5.3 Corrosión combinada con otros fenómenos

En muchas ocasiones se produce un efecto conjunto de corrosión con otro tipo de ataque a la estructura; por ejemplo:

1.5.3.1 Esfuerzos Mecánicos

Un material sometido a un medio corrosivo y a un esfuerzo mecánico en forma simultánea, puede sufrir daños en un tiempo muy corto. El esfuerzo mecánico puede ser continuo o discontinuo. La combinación de corrosión y esfuerzos mecánicos continuos produce un fenómeno acelerado conocido como **corrosión bajo tensiones**. Si la tensión se aplica en forma cíclica, por ejemplo las dilataciones y contracciones que sufre un equipo sometido a calentamientos y enfriamientos sucesivos, el fenómeno se denomina **corrosión por fatiga**. Es importante destacar que aún cuando estos fenómenos se dan en forma simultánea, cada uno de ellos se trata en forma separada porque se trata de procesos diferentes.

1.5.3.2 Erosión

En este caso la corrosión va acompañada de una acción superficial de erosión; un ejemplo de ello es el de las bombas que envían petróleo con arena desde el fondo de un pozo productor hacia la superficie: el efecto corrosivo de algunos componentes del petróleo se suma al efecto erosivo de la arena que lo acompaña. También se observa éste fenómeno en pozos de agua con arena y en reactores catalíticos de refinerías, en donde los catalizadores, generalmente óxidos metálicos muy duros, producen erosión simultáneamente con la corrosión.

Una característica interesante de este tipo de ataque es que la erosión va eliminando los productos de corrosión, lo que dificulta determinar los agentes corrosivos que causan el ataque. Además, los productos de corrosión pueden actuar brindando una protección parcial contra la corrosión posterior del metal pero la erosión los elimina. Los procesos de corrosión-erosión se presentan preferentemente donde la mezcla corrosiva choca con una pared metálica, como ocurre en codos de tuberías, sitios donde cambia el diámetro de una tubería etc. Y una forma de minimizar su efecto destructivo es precisamente evitar, a nivel de diseño, el uso de codos en 90°, cambios bruscos en la dirección del fluido.

1.5.4 Corrosión por bacterias

Cuando se habla de “corrosión por bacterias” debe tomarse en consideración que las bacterias no atacan directamente al metal sino que se trata de fenómenos complejos en los cuales intervienen los procesos alimenticios de estos microorganismos; por ejemplo, las bacterias sulfato-reductoras (desulfovirio desulfuricans) que se identifican por la sigla SRB, se

alimentan de sulfatos orgánicos y producen como desecho sulfuros que pueden afectar a algunos metales y aleaciones. Como característica típica de estos ataques debe destacar la aparición de un producto de corrosión consistente en una capa de sulfuro de hierro de color negro. Las bacterias sulfato-reductoras se desarrollan cuando el medio es pobre en oxígeno (condición anaeróbica); con frecuencia una depósito de suciedad o barro hace que el contenido de oxígeno bajo el mismo sea suficientemente reducido como para permitir el desarrollo de estas bacterias. Se produce entonces un ataque ocasionado por dos factores que actúan en forma conjunta: el desarrollo de SRB y la existencia de una celda o pila de aireación diferencial.

2. DISEÑO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA

2.1 Introducción a los Métodos Protectores

Una vez conocidos los principios involucrados en el fenómeno de corrosión estamos en condiciones de comenzar el estudio de los métodos preventivos. Existe una gran variedad de técnicas que nos permiten reducir los efectos perjudiciales de la corrosión sobre los materiales de uso industrial o doméstico; cada una de ellas tiene un campo de aplicación específico y es común el uso de combinaciones de las mismas. Las dos principales formas de protección son pinturas y protección catódica.

2.1.1 Pinturas y recubrimientos

Aunque no es el tema específico de estudio de este trabajo, está íntimamente ligado a la protección catódica, por lo tanto vale la pena hacer una reseña sobre los principales conceptos de éste campo.

Desde el punto de vista de la corrosión, un recubrimiento es una barrera física que separa el metal del medio corrosivo. Acostumbramos a ver una pintura o recubrimiento simplemente como una capa que se aplica sobre un metal pero es mucho más que eso.

La tabla I, nos muestra lo que se entiende por sistema de recubrimiento.

Tabla I Sistema de recubrimiento

METAL	<p>PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE</p> <p>FUNCIONES: eliminar óxido, suciedad, grasa, aceite. Crear una superficie rugosa que facilite la adherencia mecánica de la pintura</p>	<p><u>MÉTODOS</u></p> <ul style="list-style-type: none"> * ARENADO * GRANALLADO * CEPILLADO * DECAPADO * LAVADO
FONDO, BASE O IMPRIMACIÓN	<p>FUNCIONES: inhibir la corrosión, adherirse al metal.</p>	<p><u>TIPOS</u></p> <ul style="list-style-type: none"> * CROMATOS DE Zn * MINIO DE PLOMO. * RICOS EN Zn.
ACABADO	<p>FUNCIONES: *</p> <ul style="list-style-type: none"> * Impermeabilidad * Adhesión química * Resistencia a la Radiación solar. 	<p><u>TIPOS</u></p> <ul style="list-style-type: none"> * ALQUÍDICAS. * FENÓLICAS. * EPÓXICAS. * POLIURETANOS. * CAUCHOS * CLORADOS * ASFÁLTICAS.

Fuente: Ing. Jorge H. Goldin. S., Inspector de Oleoductos 2002, Pág. 15.

- **Preparación de la Superficie:** probablemente es aspecto más importante del sistema. Sin una buena preparación de la superficie la pintura o revestimiento no se adherirá apropiadamente, perdiendo su efecto protector. La mayoría de fallas en pinturas se produce por deficiencias en la preparación de la superficie. Los objetivos son básicamente dos: eliminar todo aquello que puede reducir la adherencia de la pintura como óxido, grasa, aceite, polvo, sales, etc. Y crear un patrón de anclaje o rugosidad superficial para dar adherencia mecánica al

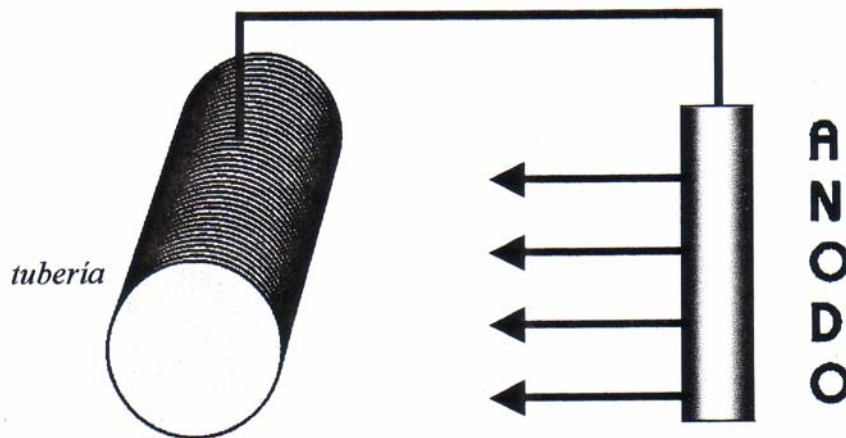
fondo o imprimación. La mejor preparación de la superficie se logra con un chorro de arena o de abrasivos, sin embargo la arena se ha prohibido en muchos países porque produce una enfermedad pulmonar grave e irreversible conocida como silicosis. Su uso debe restringirse a áreas abiertas lejos de toda otra actividad (talleres, oficinas, etc.) y el personal debe utilizar equipo de protección personal adecuado para esa actividad.

- **Pintura base, imprimación o fondo:** es la última defensa del sistema contra los agentes agresivos del medio; si alguno de estos agentes logra atravesar las capas exteriores o de acabado, al llegar al metal se encontrará con un inhibidor de corrosión que retardará el ataque. También se emplean con gran éxito los fondos basándose en pigmentos ricos en cinc que dejan al secarse una capa de este metal adherida al acero de la estructura. En caso de un poro o falla, el cinc formará una pila que protegerá al acero de forma similar a una protección catódica. Los fondos no resisten la radiación solar, no son impermeables, no tienen un buen color ni brillo. En cuanto a lo que llamamos imprimación o fondo, normalmente sirven de base para la adherencia de revestimientos gruesos como el polietileno o el polipropileno; que pueden o no tener inhibidores de corrosión.
- **Capas de acabado o pintura exterior:** en general se recomienda un mínimo de dos capas de acabado y una de fondo para un total de tres capas; la pintura exterior o de acabado debe ser resistente a la humedad, la radiación solar, la lluvia, el viento y en general a los agentes agresivos y contaminantes del medio ambiente. También deben dar una buena apariencia en cuanto a color y brillo.

2.1.2 Protección Catódica

Recordando que todo fenómeno de corrosión a baja temperatura y en ambiente húmedo, puede ser interpretado como la formación de una pila donde el ánodo o zona anódica sufre la corrosión (oxidación), mientras el cátodo o zona catódica no es afectado en la figura 9 nos muestra un sistema de protección catódica por ánodos galvánicos o de sacrificio; se basa en la formación de una pila entre dos materiales que hace que la estructura se comporte como catódica y, en consecuencia, no sufra corrosión. El ánodo puede ser de aleación de magnesio o zinc, si se usa en suelos, o de aleación de aluminio si el medio es agua de mar. El ánodo se sacrifica para proteger a la estructura y se va consumiendo a lo largo de un período que se conoce como vida útil del ánodo. Este sistema se conoce como Protección catódica por ánodos galvánicos o de sacrificio.

Figura 9 Protección Catódica con ánodo galvánico o de sacrificio



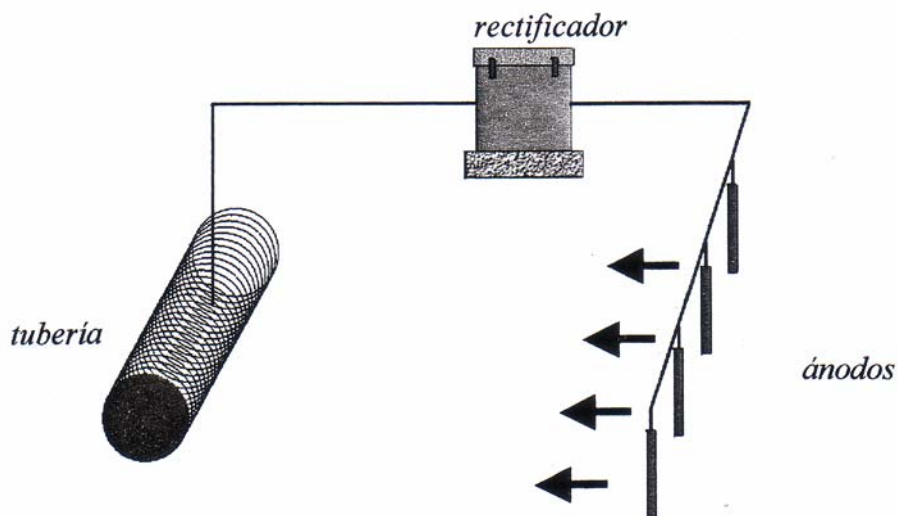
Fuente: Ing. Jorge H. Goldin. S., Inspector de Oleoductos 2002, Pág. 17.

Otro sistema posible para lograr el mismo efecto se ilustra en la figura 10. En este caso se drena corriente desde un conjunto de ánodos que pueden ser de diferentes materiales porque una fuente de energía los obliga a comportarse como ánodos frente a la estructura. Esto es lo que se conoce como sistema de protección catódica por corriente impresa. El principio es el mismo pero la forma de aplicarlo varía.

Los ánodos galvánicos son muy simples de instalar y controlar pero sus limitaciones principales son:

- a) En medios muy secos o poco conductores la pila entre ánodo y estructura no será suficiente para drenar la corriente de protección.
- b) Estructuras grandes requerirán cantidades significativas de corriente de protección y esto requerirá tantos ánodos galvánicos que el sistema será muy costoso.

Figura 10 Sistema de protección catódica por corriente impresa



Fuente: Ing. Jorge H. Goldin. S., Inspector de Oleoductos 2002, Pág. 17.

El sistema por corriente impresa puede superar estas dificultades dado que desde la fuente que se conoce como transformador-rectificador, se impone el voltaje necesario para vencer la resistencia del medio y la corriente necesaria para proteger toda la superficie expuesta, su limitación es que debe inspeccionarse periódicamente para asegurar su funcionamiento adecuado. Según las normas API (*American Petroleum Institute*), Instituto Americano del Petróleo, y AGA (*American Gas Association*), Asociación Americana del Gas. Todo sistema de protección catódica por corriente impresa debe inspeccionarse como mínimo una vez al mes. En cuanto a los materiales que se utilizan, para corriente impresa los ánodos se fabrican de grafito, hierro/silicio/cromo, óxidos cerámicos plomo/plata, titanio platinado. Para ánodos galvánicos se emplean aleaciones de magnesio zinc y aluminio.

Cuando se habla de protección catódica se piensa inmediatamente en tuberías enterradas; no obstante esta técnica tiene un campo enorme de aplicaciones, entre las estructuras que pueden protegerse con ésta técnica mencionaremos las siguientes:

- Tuberías enterradas.
- Tuberías sumergidas (en el mar o en ríos)
- Fondos de tanque de almacenamiento apoyados en suelos corrosivos.
- Tanques de estaciones de servicio enterrados.
- Interior de tanques de almacenamiento de agua industrial o potable.
- Barcos.
- Pilotes Metálicos de Muelles.
- Pozos Petroleros.
- Pozos de Agua.

- Plataformas marinas o lacustres.
- Intercambiadores de calor.
- Cajas de condensadores.
- Enfriadores.
- Puentes de acero
- Pilotes y puentes de concreto reforzado.

2.2 Diseño de Sistemas de Protección Catódica por Ánodos Galvánicos o de Sacrificio.

El diseño de sistemas de protección catódica por ánodos galvánicos o de sacrificio, fue utilizada por Sir *Humpry Davy* (1778-1829), en Inglaterra en 1823, buscando proteger de la corrosión las planchas de cobre que se utilizaban en los cascos de barcos, ensaya conectarlas a elementos de hierro, de zinc y de estaño. Los dos primeros elementos dieron buenos resultados para reducir la corrosión de las láminas de cobre. Posteriormente, cuando el cobre es reemplazado por el hierro en la fabricación de barcos, los ánodos de zinc adquieren mayor importancia, porque proveen adecuada protección a los aceros durante tiempo suficientemente prolongado.

Este sistema utiliza como fuente de corriente, la diferencia de potencial entre el material del ánodo y la estructura a proteger. En este tipo de instalación el material de los ánodos se consume dependiendo de los siguientes factores: de la demanda de corriente protección de la estructura a proteger, la resistividad del electrolito y del material usado como ánodo, durante el proceso de descarga del mismo.

En la tabla II se muestra las aplicaciones específicas más utilizadas de ánodos galvánicos o de sacrificio.

Tabla II Ánodos Galvánicos y su Campo de aplicación

MEDIO CORROSIVO	MATERIAL ANÓDICO
Suelos	Zinc-Magnesio (rango 1500-2000 Ω -cm)
Aguas Dulces	Magnesio
Agua de Mar	Aluminio
Fondo Marino	Zinc-Aluminio

Fuente: Ing. Jorge H. Goldin. S., Inspector de Oleoductos 2002, Pág. 38.

En la tabla III podemos observar que las aleaciones de zinc y de aluminio poseen una eficiencia muy elevada, la eficiencia está originada en la cantidad de material anódico que se consume por auto-corrosión del ánodo. En cambio el magnesio tiene baja eficiencia pero presenta el más alto valor de potencial de trabajo. El aluminio no puede utilizarse en suelos porque se recubre con una capa de óxido que lo inactiva (éste fenómeno se conoce como "pasivación") pero en agua de mar, los cloruros rompen dicha capa y los reactiva. En agua de mar las aleaciones de aluminio no tienen competencia; si observamos los valores indicados en la tabla posterior, vemos que el rendimiento práctico de estas aleaciones de aluminio es casi cuatro veces que las de zinc. Esto significa que por cada kilogramo de material de aluminio obtenemos mucho más corriente por unidad de tiempo que por un kilogramo de magnesio o de zinc. También implica que para un barco, por ejemplo, se puede lograr protección con menor cantidad y peso de ánodos de aluminio que si utilizáramos magnesio o zinc.

Tabla III Características de los ánodos Galvánicos

	ANODO ZINC	ANODO MAGNESIO	ANODO ALUMINIO
EFICIENCIA	95%	50%	95%
RENDIMIENTO AM-HR/KG	778	1102	2817
CONTENIDO DE ENERGIA AM-HR/KG	820	2204	2965
POTENCIAL DE TRABAJO(VOLTIO)	-1.10	-1.45 A -1.70	-1.10
RELLENO	50%YESO; 50Bentonita	75Yeso; 20Bentonita; 5%SO ₄ Na ₂	

Fuente: Liz García, www.members.tripod.com/lizgarcia/catodica.html

2.2.1 Características de un Ánodo de Galvánico o de Sacrificio

- a. Debe tener un potencial de disolución lo suficientemente negativo, para polarizar la estructura de acero (metal que normalmente se protege) a -0.8 Voltios. Sin embargo el potencial no debe de ser excesivamente negativo, ya que eso motivaría un gasto superior, con un innecesario paso de corriente. El potencial práctico de disolución puede estar comprendido entre -0.95 a -1.7 Voltios;
- b. Corriente suficientemente elevada, por unidad de peso de material consumido;
- c. Buen comportamiento de polarización anódica a través del tiempo;
- d. Bajo costo.

2.2.2 Tipos de Ánodos

Considerando que el flujo de corriente se origina en la diferencia de potencial existente entre el metal a proteger y el ánodo, éste último deberá ocupar una posición más elevada en la tabla de potencias (serie electroquímica o serie galvánica).

Los ánodos galvánicos que con mayor frecuencia se utilizan en la protección catódica son: Magnesio, Zinc, Aluminio.

Magnesio: Los ánodos de Magnesio tienen un alto potencial con respecto al hierro y están libres de pasivación. Están diseñados para obtener el máximo rendimiento posible, en su función de protección catódica. Los ánodos de Magnesio son apropiados para oleoductos, pozos, tanques de almacenamiento de agua, incluso para cualquier estructura temporal que requiera protección catódica.

Se utilizan en estructuras metálicas enterradas en suelo de baja resistividad hasta 3000 ohms-cm.

Zinc: Para estructura metálica inmersas en agua de mar o en suelo con resistividad eléctrica de hasta 1000 ohms-cm

Aluminio: Para estructuras inmersas en agua de mar.

2.2.3 Relleno Backfill

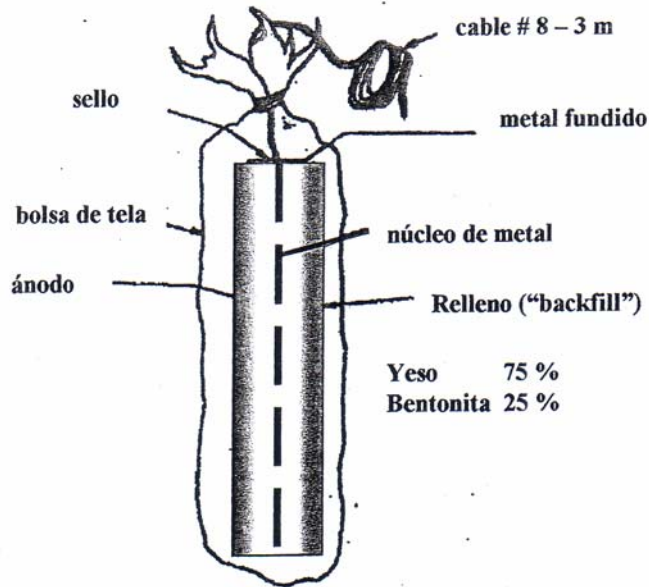
Como se muestra en la figura 11, para mejorar las condiciones de operación de los ánodos en sistemas enterrados, se utilizan algunos rellenos entre ellos el de **Backfill** especialmente con ánodos de Zinc y Magnesio, estos productos

químicos rodean completamente el ánodo produciendo algunos beneficios como:

- a. Promover mayor eficiencia;
- b. Desgaste homogéneo del ánodo;
- c. Evita efectos negativos de los elementos del suelo sobre el ánodo;
- d. Absorben humedad del suelo manteniendo dicha humedad permanente.

La composición típica del Backfill para ánodos galvánicos está constituida por yeso (CaSO_4), bentonita, sulfato de sodio, y la resistividad de la mezcla varía entre 50 a 250 ohms-cm.

Figura 11 Corte de un ánodo de Magnesio para Suelos



Fuente: Ing. Jorge H. Goldin. S., Inspector de Oleoductos 2002, Pág. 41.

2.3 Criterios de Protección

Cuando se aplica protección catódica a una estructura, es extremadamente importante saber si esta se encontrará realmente protegida contra la corrosión en toda su plenitud.

Varios criterios pueden ser adoptados para comprobar que la estructura en mención está exenta de riesgo de corrosión, basados en unos casos en función de la densidad de corriente de protección aplicada y otros en función de los potenciales de protección obtenidos.

No obstante, el criterio más apto y universalmente aceptado es el de potencial mínimo que debe existir entre la estructura y terreno, medición que se realiza con un electrodo de referencia. El criterio de potencial mínimo se basa en los estudios realizados por el Profesor MICHAEL POURBAIX, en 1939, quién estableció a través de un diagrama de potencial de electrodo vs. pH del medio, un potencial mínimo equivalente a -850 mV con relación al electrodo de referencia cobre-sulfato de cobre, observando una zona definida por la inmunidad del acero.

Los criterios de potencial mínimo de protección que se utilizará son de -850 mV respecto al $\text{Cu}/\text{SO}_4\text{Cu}$ como mínimo y permitiendo recomendar así mismo, un máximo potencial de protección que pueda estar entre los 1200 mV a -1300 mV, sin permitir valores más negativos, puesto que se corre el riesgo de sobre protección, que afecta de sobre manera al recubrimiento de la pintura, ya que hay riesgos de reacción catódica de reducción de hidrógeno gaseoso que se manifiesta como un ampollamiento en la pintura.

2.3.1 Resistividad del Suelo

Cuando se diseña protección catódica o simplemente cuando se estudia la influencia de la corrosión en un medio en el cual se instalará equipos o se tenderá una línea, es necesario investigar las características del medio, entre estas características, relacionada directamente con el fenómeno corrosivo se encuentra la resistividad del medio.

La resistividad es el recíproco de la conductividad o capacidad del suelo para conducir corriente eléctrica. En la práctica se ejecutan medidas de resistencia de grandes masas de material y se calcula un valor promedio para el mismo.

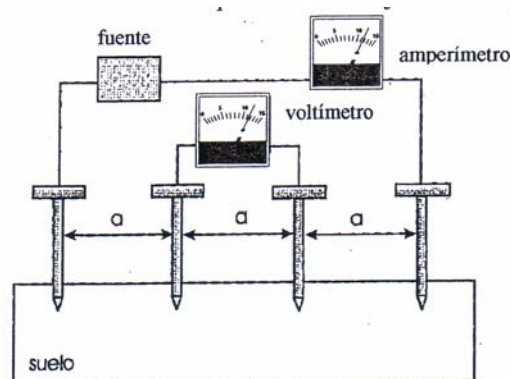
Las áreas de menor resistividad son las que tienden a crear zonas anódicas en la estructura, pero así mismas son las zonas más aptas para instalación de las camas de ánodos. En la práctica se realiza esta medida empleando un voltímetro y un amperímetro o bien instrumentos especiales como el Vibro-Graund, Nilsson 400, Metrawatt o el Megger complementados mediante un equipo de cuatro picas o electrodo directamente en el campo o mediante el Soil Box en laboratorio.

Cuando se ejecuta en el campo, el método consiste en introducir en el suelo 4 electrodos separados por espaciamientos iguales, como se muestra en la figura 12, los espaciamientos representan la profundidad hasta lo que se desea conocer la resistividad este espaciamiento que se le representa con la letra (a), éste método es conocido como el método de Wenner (ver anexos).

Este método regulado por ASTM (*American Society for Testing and Materials*), Asociación Americana para pruebas y Materiales, en la norma G57-78 *standard Method for field measurement of soil resistivity using the Wenner four electrode Method*. Método normalizado para la medición de campo de la resistividad de suelos utilizando el método de Wenner de los cuatro electrodos. Se calcula la resistividad aplicando la siguiente fórmula: $\rho_s = 2 \cdot \pi \cdot a^2 \cdot R$.

Donde: ρ_s = resistencia del suelo, a = espaciamiento de los electrodos en metros y R = resistencia leída en equipo en ohms (Ω).

Figura 12 Método de Wenner para medir resistividad de suelos



Fuente: Ing. Jorge H. Goldin. S., *Inspector de Oleoductos 2002*, Pág. 45.

Algunos aspectos importantes a tomar en cuenta en el uso de este método son:

- Profundidad de los electrodos: no es un factor crítico, basta con clavar las barras hasta que se sostengan firmes en el terreno.

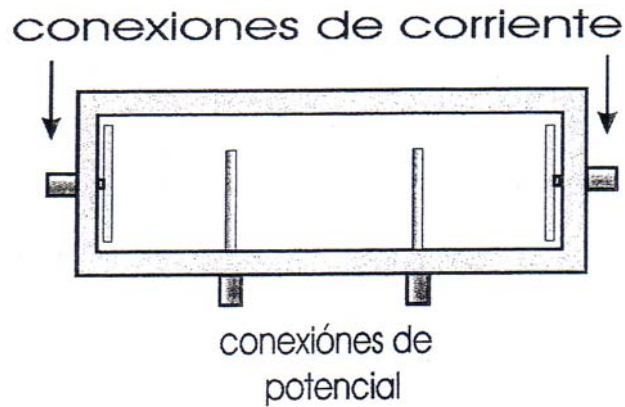
- Profundidad máxima de medición: con los instrumentos normales que se emplean en el campo de la protección catódica puede medirse hasta unos 15 metros (esto depende del instrumento utilizado).
- Valores de resistividad que se pueden medir: esto depende del instrumento utilizado. El Megger puede medir valores muy elevados por el rango de los 50,000 Ω -cm, éste valor es considerado muy poco corrosivo y no es necesario precisar el valor de la resistividad eléctrica después de este valor.

Cuando se efectúan las mediciones en tiempo seco es muy recomendable usar el método Wenner pero si se realizan en tiempo de lluvias podemos usar el Método de "Soil Box" o Caja de Suelos.

El procedimiento es a seguir es el siguiente: a) se quita una capa del suelo de aproximadamente 30 cm para eliminar la vegetación, b) Se tamiza la muestra para eliminar piedras, raíces, etc, c) se coloca la muestra en la caja de suelos hasta llenarla completamente, en la figura 13 se muestra la elaboración de una caja de suelos y las conexiones de potencial y corriente, d) se mide, e se satura con agua destilada hasta que quede sobrellenado, e) se vuelve a medir. Este procedimiento equivale a una lluvia intensa sobre el suelo. La caja de suelos (Soil Box), también sirve para medir la resistividad del coque utilizado como relleno.

El material de las barras de la caja de suelos puede ser de acero al carbono, de acero inoxidable, o de cobre. También se puede fabricar con cuatro barras o varillas de construcción de 3/8".

Figura 13 Caja de Suelos para Medición de Resistividad Eléctrica



Fuente: Ing. Jorge H. Goldin. S., Inspector de Oleoductos 2002, Pág. 47.

En la tabla IV se muestra una clasificación de medios corrosivos, según su resistividad eléctrica.

Tabla IV Clasificación de medios corrosivos según su resistividad

Rango de Resistencia	Clasificación
0 – 1000 Ω -cm	Altamente Corrosivos
1001 – 5000 Ω -cm	Corrosivos
5001 – 10000 Ω -cm	Poco Corrosivos
> 10001 Ω -cm	Muy poco corrosivos

Fuente: Comité Normalizador PEMEX, NRF 047 PEMEX 2002, Págs. 10 y 11.

2.3.2 Potenciales

Este concepto es de gran importancia. Implica que toda tubería enterrada o sumergida, fondo de tanque apoyado en el terreno, pilote sumergido en agua de mar, interior de barco tanquero, etc. Tendrá un potencial eléctrico que llamaremos potencial natural, por el sólo hecho de estar en contacto con un medio conductor.

Al aplicar protección catódica enviando corriente eléctrica desde un conjunto de ánodos hacia la estructura, estamos provocando un cambio de potencial eléctrico de la misma el potencial irá cambiando hasta alcanzar un valor estable que llamaremos potencial de protección. El proceso de cambio del potencial desde el potencial natural hasta el potencial de protección es lo que se conoce como polarización de la estructura. Veamos algunos valores prácticos de potenciales en la tabla V.

Tabla V Potenciales de Protección

Potenciales naturales de aceros en suelos y aguas	400 a 600 milivoltios
Potencial mínimo de protección de aceros	850 milivoltios
Potencial mínimo de protección de aceros en suelos y aguas cuando hay bacterias sulfato-reductoras	950 milivoltios

- NOTAS: 1. Todos los potenciales de la tabla son medidos con referencia al electrodo de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO₄).
2. Los criterios de protección corresponden a la Norma NACE RP-0169-83.

Fuente: Ing. Jorge H. Goldin. S., Inspector de Oleoductos 2002, Pág. 48.

2.3.2.1 Medición

Para medir el potencial eléctrico de una estructura en contacto con un medio corrosivo determinado, se compara dicho valor con el potencial de un electrodo o celda de referencia en contacto con el mismo medio. Los electrodos de referencia más utilizados, como muestra la tabla VI son los siguientes:

Tabla VI Electrodo de Referencia más usados

Electrodo de Referencia	Usos
Cobre/Sulfato de Cobre	Suelos-aguas dulces
Plata/cloruro de Plata	Agua de mar
Molibdeno/Óxido de Molibdeno	Acero en concreto

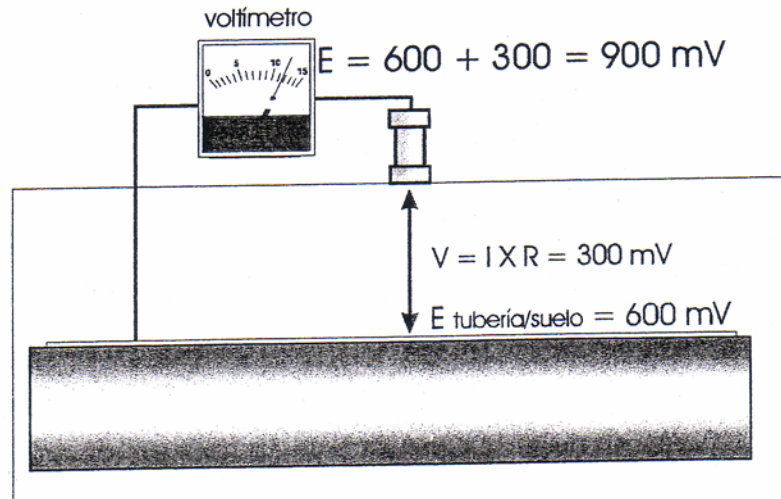
Fuente: Ing. Jorge H. Goldin. S., Inspector de Oleoductos 2002, Pág. 48.

En la figura 2.6 se muestra en forma esquemática el procedimiento de medición de potencial de una tubería enterrada utilizando el electrodo de referencia de cobre/ sulfato de cobre.

Cuando se efectúa una medición de potencial de una estructura se pueden cometer errores, en la figura 14 se muestra un error típico: el instrumento indica un valor de diferencia de potencial y podemos interpretar que este valor corresponde a la comparación entre el potencial de la tubería/suelo y el potencial del electrodo/suelo, cuando en realidad se está

incluyendo un factor adicional que es la caída de voltaje que sufre la corriente del sistema de protección catódica al pasar por el suelo.

Figura 14 Medición de Potencial de tubería enterrada.



Fuente: Ing. Jorge H. Goldin. S., Inspector de Oleoductos 2002, Pág. 49.

Si recordamos la ley de ohm, la caída de voltaje producida en el suelo es función de la corriente de protección (I) multiplicada por la resistencia del medio (R). Este factor se vuelve importante cuando los suelos tienen alta resistencia y también cuando la distancia que debe recorrer la corriente es muy larga. Para reducir este error es conveniente colocar el electrodo de referencia lo más cerca posible de la estructura. En el caso de tuberías enterradas se busca colocar el electrodo "encima" de donde está enterrada la tubería.

2.3.3 Cálculos de Diseño de un Sistema de Ánodos Galvánicos

Para el diseño de un sistema con ánodos galvánicos se deben considerar los puntos siguientes:

- Selección del material de los ánodos a utilizar, de acuerdo a la resistividad del electrolito, costo, disponibilidad en el mercado, eficiencia del ánodo y vida útil deseada.
- Selección de la configuración de los ánodos.
- Seguridad de funcionamiento.
- En agua de mar deben emplearse ánodos con base aluminio o zinc y sus respectivas aleaciones sin contenido de mercurio.

La vida útil del ánodo depende tanto de su material como de su peso. Los datos del comportamiento del ánodo instalado, deben usarse para calcular el valor probable de consumo.

El tiempo de vida del ánodo galvánico, se determina con la expresión:

$$V = C * P * R * U / I$$

Donde :

V = Tiempo de vida del ánodo en años

C = Capacidad de corriente en A – año/kg (tabla VII)

P = Peso del ánodo en kilogramos

R = Rendimiento en % (tabla VII)

U = Factor de Utilización 0.85

I = Entrega de corriente del ánodo en amperios (A)

Tabla VII Cálculo de vida útil de Ánodos

Metal anódico	Capacidad corriente teórica (A-año/kg)	Rendimiento %
Zinc (Zn)	0.094	95
Aluminio (Al)	0.340	90
Magnesio (Mg)	0.251	50

Fuente: Comité Normalizador PEMEX, NRF 047 PEMEX 2002, Pág. 16.

Corriente de diseño para tuberías enterradas.

$$AB = f \cdot \pi \cdot D \cdot L$$

Donde:

AB = Área de la tubería por proteger m².

f = Porcentaje de área desnuda.

D = Diámetro exterior de la tubería, en m.

L = Longitud de la tubería, en m.

π = pi 3.1415927.

Cálculo de la corriente necesaria

$$I = AB \cdot Id / 1000$$

Donde:

AB = Área de la tubería por proteger m².

I = Corriente requerida en amperes.

Id = Densidad de corriente requerida en miliamperes por m².

Densidades de corriente típicas requeridas mA/m²

Tierra seca	10.76 - 21.52
Tierra con agua	21.52 - 53.82
Agua, sin corriente	10.76 – 53.82
Agua de mar, con corriente	32.29 – 129.17
Agua de mar, sin corriente	107.6 - 2691

Cálculo de la masa anódica requerida

$$W = I * DR * DL$$

Donde:

I = Corriente requerida en amperes.

W = Peso total de masa anódica requerida, en kg.

DR = Disipación del ánodo, en kg por ampere-año.

DL = Vida de diseño del sistema, en años.

Consumo de ánodos

Magnesio 11.3 kg/ ampere-año (25 lb/ ampere-año)

Galvalum III 5.45 kg/ ampere (12 lb/ ampere-año)

Zinc 11.3 kg/ ampere-año (25 lb/ ampere-año)

Cálculo del numero de ánodos requeridos

$$N = W / W_A$$

Donde:

W = Peso total de masa anódica requerida, en kg.

N = Número de ánodos requeridos.

W_A = Peso de cada ánodo, en kg.

Espaciamiento entre ánodos

$$S = L / N$$

Donde:

S = Espaciamiento requerido, en m.

L = Longitud de la tubería, por proteger en m.

N = Número de ánodos requeridos.

Separación máxima de ánodos:

Tubería de 0.304m D.N.(12") y menores: 152.4m (500 pies).

Mayores de 0.304m D.N.(12"): 304.8m (1000 pies).

Separación entre la estructura por proteger y los ánodos

La separación de los ánodos a la estructura por proteger debe ser de al menos 4.5 metros.

2.3.4 Cálculos de un sistema por Corriente impresa.

Para el diseño de un sistema de corriente impresa, se deben considerar los puntos siguientes:

Selección de la capacidad de la fuente de corriente directa, la intensidad de corriente, es un dato conocido, pues se refiere a la corriente de protección

que se ha determinado, por lo general, mediante pruebas de requerimiento de corriente.

En el mercado se puede encontrar unidades de control de potencia (UCP), formadas por un transfo-rectificador (ver figura 15), que suministre una corriente de componente continua ininterrumpidamente al lecho de ánodos, a partir de una fuente de energía eléctrica de componente alterna.

Las unidades UCP, han sido diseñadas para una vida superior a 20 años, con las más avanzadas tecnologías en semiconductores, y un diseño moderno mediante un microprocesador para la visualización y comunicación bi-direccional de los valores de protección de la unidad.

Existen unidades de cualquier potencia y características, con control manual o automático, tanto refrigeradas por aire como por aceite, incluso para ambientes inflamables. El stock de transfo-rectificadores normalizados para salidas de 50V/5A, 50V/10A, 50V/15A y 70V/10A, 70V/15A y 70V/20A, de regulación manual, o regulación manual/automática con limitación de intensidad de salida controlada por electrodo de referencia, y con indicación analógica o digital.

Figura 15 Transformador Rectificador



Fuente: www.procainsa.com /informes técnicos / protección catódica.

a) El voltaje de salida en el rectificador se calcula con la ecuación:

$$V = R_t * I$$

Donde:

V = Voltaje (C.D.) de salida del rectificador, Voltios.

R_t = Resistencia total del circuito, Ω .

I = Intensidad de corriente requerida, Amperes.

La resistencia total del circuito, R_t es igual a:

$$R_t = R_c + R_e + R_g \text{ o } R_h$$

Donde:

R_c = Resistencia de los cables del circuito, se calcula conociendo el calibre y longitud de los cables.

R_e = Resistencia de contacto a tierra de la estructura por proteger. Su valor puede obtenerse directamente en el campo y es igual al cambio de potencial obtenido en la estructura, con la corriente de prueba dividido entre esta.

R_g = Resistencia del dispositivo de tierra o cama anódica, puede ser R_v o R_h , es la que tiene mayor influencia en el valor de R_t .

Resistencia de un ánodo con relleno:

$$R_v = \frac{0.00159\rho \left[2.3 \log \frac{8L}{d} + 1 \right]}{L}$$

Donde:

R_v = Resistencia de un ánodo vertical a tierra en Ω .

ρ = Resistividad del suelo, o del material de relleno en Ω -cm.

L = Longitud del ánodo, en metros.

d = Diámetro del ánodo, en metros.

S = Espaciamiento entre ánodos, en metros.

Resistencia de varios ánodos en posición horizontal y en paralelo:

$$R_h = \frac{0.0015\rho}{L} \left[2.3 \log \frac{4L^2 + 4L\sqrt{S^2 + L^2}}{ds} + \frac{S}{L} - \frac{\sqrt{S^2 + L^2}}{L} \right] + 1$$

R_h = Resistencia de la cama anódica en posición horizontal, conectados en paralelo, en Ω .

S = Dos veces la profundidad del ánodo en m.

ρ = Resistividad del material de relleno (backfill) o del terreno en $\Omega\cdot\text{cm}$.

L = Longitud del ánodo en metros.

d = Diámetro del ánodo en metros.

Separación entre la estructura por proteger y los ánodos

La separación de los ánodos a la estructura por proteger debe ser una distancia eléctricamente remota o tierra remota. Esta distancia puede determinarse con una serie de lecturas entre la estructura por proteger y una media celda de Cu/CuSO₄ tomadas a intervalos conocidos alejándose de la estructura. En el punto donde ya no se tengan cambios significativos en el potencial, se considera como tierra remota. Sin embargo, por razones prácticas esta distancia no debe ser menor de 50 metros.

Capacidad del transformador.

La capacidad del transformador se calcula con la ecuación:

$$C = I \times V / (E \times F \times 1000)$$

Donde:

C = Capacidad del transformador, kVA.

E = Eficiencia del rectificador (0.85).

I = Intensidad de corriente (C.D.) del rectificador (Amperes).

V = Voltaje (C.D.) del rectificador (Volts).

F = Factor de potencia del transformador (0.80).

Materiales de relleno (Back fill).

Se debe de emplear material de relleno para envolver los ánodos con el fin de reducir su resistencia de contacto con el suelo.

Para ánodos inertes.

En estos casos se usa como material de relleno carbón de coque triturado, cuya granulometría debe cumplir lo siguiente:

Debe pasar 100% por la malla No. 6.

Debe pasar 40% por la malla No. 14.

El material restante debe desecharse.

Para ánodos galvánicos.

En estos casos se debe usar como material de relleno, la composición que a continuación se indica en la tabla VIII.

Tabla VIII Materiales de Relleno Backfill para ánodos

Material	Peso en %
Yeso seco en polvo.	75
Bentonita seca en polvo	20
Sulfato de sodio anhidro.	5
Agua para saturar la mezcla.	
Cantidad de relleno por ánodo: Peso del ánodo kg (lbs)	Cantidad de relleno kg (lbs)
7.72 (17)	13.62 30
14.53 (32)	15.89 35
21.79 (48)	23.61 52

Fuente: Comité Normalizador PEMEX, NRF 047 PEMEX 2002, Pág. 21.

Los ánodos en forma de brazaletes o de cinta no necesitan relleno.

2.3.5 Potenciales *ON-OFF*

Dada la importancia de conocer el verdadero valor de potencial de una estructura protegida catódicamente y sabiendo que se puede cometer un error por caída $I \times R$, se ha desarrollado una técnica de medición que minimiza el error. Esta técnica se basa en interrumpir brevemente la corriente del sistema de protección catódica mediante un interruptor programable; este instrumento conecta y desconecta el rectificador o fuente de corriente del sistema de protección catódica por períodos muy cortos (segundos). Al hacerlo no habrá corriente circulando por el suelo con lo cual la caída de voltaje en el suelo se reduce a cero. La interrupción se realiza por tiempos breves porque si se hace por largo tiempo se producirá la despolarización de la tubería o pérdida de protección con lo cual estaremos midiendo un potencial diferente del potencial de protección que es nuestro objetivo. Cuando un sistema de protección catódica consta de varios rectificadores o fuentes de energía se deben interrumpir todos aquellos que tengan influencia sobre el tramo en estudio para lo cual se emplean interruptores con capacidad de sincronización, esto es, que todos interrumpen al mismo tiempo y conectan al mismo tiempo. Los más conocidos son los JR-1 y JR-2 de M.C. Miller (*USA*), en particular el segundo que tiene capacidad para interrumpir hasta 100 amperios.

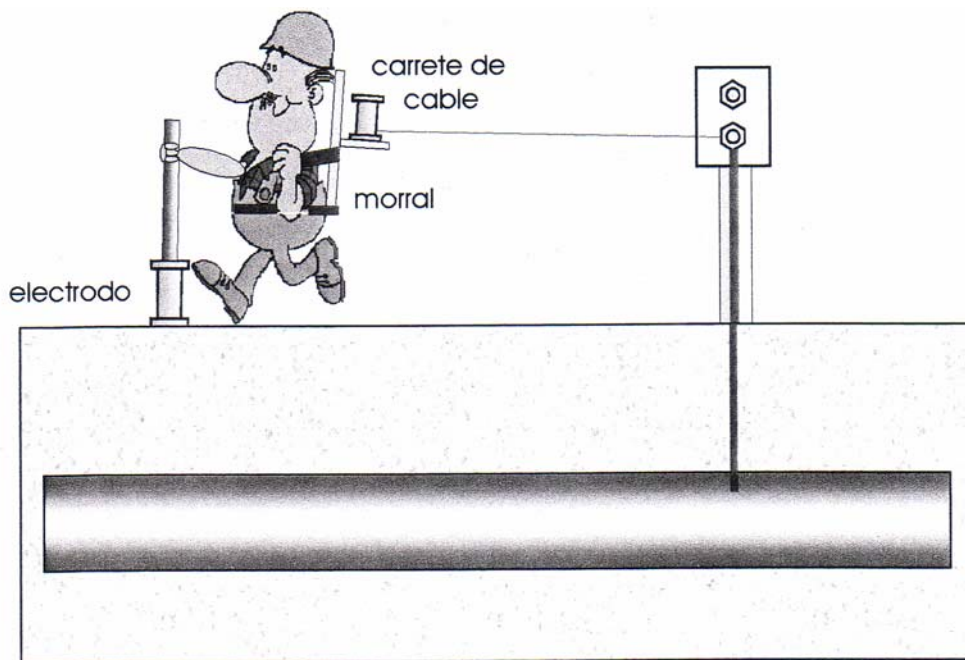
2.3.6 Mediciones de Intervalo Corto

Cuando se mide el potencial de una tubería enterrada en postes colocados cada kilómetro, en realidad se está conociendo muy poco de la tubería; si asumimos que cada medición de potencial arroja información sobre alrededor de 5 metros de longitud de tubería y se toma una medición cada 1000 metros, en un tramo de 10 km (10000 metros) se está midiendo 5 metros x 10 mediciones = 50 metros de información.

Las mediciones en estaciones de prueba dan una información muy escasa sobre el estado real de la tubería en toda su magnitud.

A raíz de esta situación se ha desarrollado una técnica conocida como mediciones de intervalo corto "close interval survey" o mediciones de potencial paso a paso, que se aplica como se observa en la Figura 16. La persona que va realizando la medición lleva un carrete de cable ya sea en la cintura (sistema "hip-pack"), en la espalda (sistema "back-pack"), cuya punta se conecta al poste de medición o estación de prueba y se va desplazando sobre la ruta de la tubería en estudio midiendo los potenciales a cada paso.

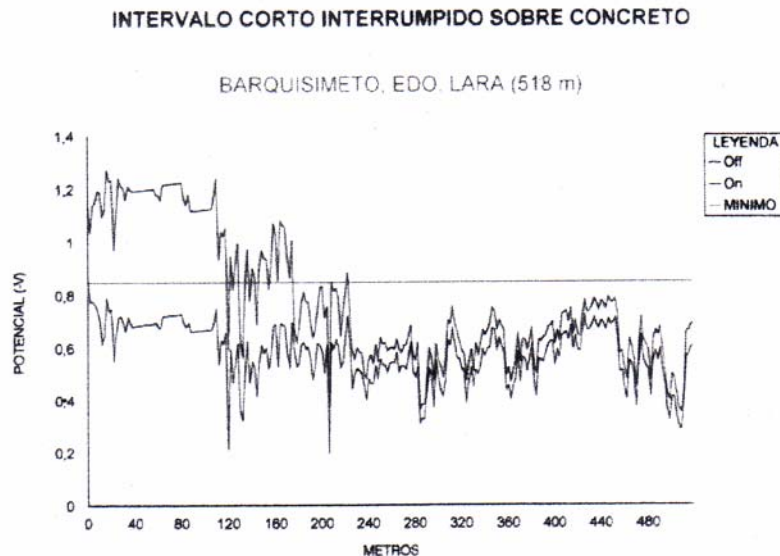
Figura 16 Medición de Potenciales de Intervalo Corto



Fuente: Ing. Jorge H. Goldin. S., Inspector de Oleoductos 2002, Pág. 51.

Esto arroja información completa de la tubería, metro a metro, o sea que el resultado de esta técnica es conocer lo que sucede en el 100% de su longitud. El levantamiento de la información se haría muy trabajoso si debiera hacerse en forma manual, esto es. Una persona realizando las mediciones y otra tomando nota de los potenciales metro a metro (cada kilómetro el grupo de trabajo habrá tomado 1000 mediciones). Por ello se emplean instrumentos del tipo "data logger" o registradores de información que van grabando la distancia y el potencial medido en cada instrumento. Posteriormente se conecta la salida del instrumento a una computadora que procesa, la información de campo. El resultado puede ser expresado en forma de lista de datos (una columna para distancia y otra para potenciales). La figura 17 muestra una gráfica de éste tipo con datos ya procesados de información de campo.

Figura 17 Curva que expresa los resultados de un estudio De Intervalo corto ON-OFF



Fuente: Ing. Jorge H. Goldin. S., Inspector de Oleoductos 2002, Pág. 52.

Estos estudios de intervalo corto puede realizarse para medir potenciales naturales o bien para potenciales *ON-OFF*, para ello los instrumentos disponen de programas internos que permiten “capturar” la información de diferente manera según sea el propósito perseguido.

En Estados Unidos todas las tuberías importantes, ya sean de gas, Petróleo o agua, se inspeccionan por intervalo corto una vez al año, haciendo el primer estudio terminando de instalar la tubería. Así se tiene una base de datos histórica que permite seguir la evolución y el comportamiento de la protección catódica y el revestimiento para planificar el mantenimiento.

3. PROTECCIÓN CATÓDICA EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

3.1 Normas

Antes de conocer especificaciones sobre ésta aplicación sé, introducirá al lector sobre las normas internacionalmente aceptadas en la industria petrolera para protección contra la corrosión en tanques de almacenamiento de hidrocarburos.

3.2 Protección Catódica Externa en fondos de Tanques de Almacenamiento.

3.2.1 Criterios para sistemas de protección Catódica

3.2.2 Introducción

En esta sección se da una lista de los criterios para protección catódica que, cumplan conjuntamente o por separado con otros, para la protección de fondos de tanques de almacenamiento.

El objetivo de usar protección catódica es el control de la corrosión del fondo de un tanque de almacenamiento en contacto con un electrolito.

La selección de un particular criterio para el objetivo general planteado en el anterior párrafo, depende primeramente de la experiencia en tanques similares y ambientes similares donde el criterio ha sido usado exitosamente.

Esto no quiere decir que las personas dedicadas al control de la corrosión se deban limitar únicamente a este criterio. Y pueden demostrar por otros medios que la corrosión ha sido controlada.

3.2.3 Mediciones de Potencial

Las mediciones de potencial en tanques de almacenamiento podrán ser hechas con electrodos de referencia localizados lo más cerca posible del fondo del tanque.

En tanques generalmente, las mediciones deberían ser tomadas en el perímetro, cerca del centro del fondo del tanque, o en varios puntos entre el centro y el perímetro. Estas consideraciones deben ser hechas para las caídas de voltaje de éstas y otras estructuras a través del límite del electrolito, para la presencia de metales no similares y la influencia de otras estructuras.

3.2.4 Criterios para la prevención de la corrosión en Tanques de Almacenamiento

El control de la corrosión puede ser clasificado en varios niveles de polarización catódica, éste depende de las condiciones del medio ambiente. De cualquier manera en ausencia de datos específicos que demuestren que la protección catódica adecuada ha sido clasificada. Uno o más de los siguientes criterios se pueden aplicar.

El primer criterio: debemos tener un potencial negativo catódico mínimo de 850 mV C.D., con corriente catódica de protección aplicada. Éste potencial deberá ser medido con respecto a un electrodo de referencia cobre/ sulfato de cobre saturado, (Cu / CuSO₄) en contacto con el electrolito. Otras caídas de Voltaje, a través del fondo del tanque y el límite del electrolito serán consideradas para una interpretación válida de ésta medición de potencial.

Éstas caídas deben ser calculadas y/o estimadas por los siguientes métodos:

- Medición o cálculo de las caídas de voltaje.
- Revisión histórica del desempeño del sistema de protección catódica (medición de potenciales de intervalo corto, capítulo 2 página 47).
- Evaluar las características físicas y eléctricas del fondo del tanque y el medio donde se encuentra.

El segundo criterio: un voltaje mínimo de -100 mV D.C. de polarización entre el fondo metálico del tanque y el electrodo fijo de referencia en contacto con el electrolito.

La formación o decaimiento de polarización puede ser medido para satisfacer éste criterio.

3.2.5 Electrodo de referencia alternativo al de Cobre / Sulfato de Cobre Saturado (Cu / CuSO₄)

Otros electrodos estándar puede sustituir a los de cobre / sulfato de cobre saturado. Dos electrodos de referencia son descritos en el siguiente párrafo. Los voltajes son los equivalentes a (25°C, 77°F) a 850 mV negativos de corriente directa referidos al electrodo cobre / sulfato de cobre saturado Cu / CuSO₄.

Electrodo de Plata / Cloruro de Plata a un potencial negativo de 780mV de corriente directa.

Electrodo de zinc de alta pureza (99.99%) un potencial positivo de 250mV de corriente directa.

Cuando se emplean ánodos de zinc de alta pureza se debe estar seguro que estos ánodos están de acuerdo a los requerimientos de la norma ASTM B 418 (*Standard specification for cast and wrought galvanic zinc anodes*) Norma de especificación para ánodos de galvánicos de zinc.

Los electrodos permanentes deberán ser encapsulados en un *backfill* (material de relleno) apropiado, en condiciones donde la protección es inefectiva o parcialmente efectiva, entre las que tenemos: elevadas temperaturas, juntas

aislantes deterioradas, blindajes dañados, ataques bacterianos y contaminantes inusuales en el electrolito.

Rocas, dispositivos de arcilla o vegetación bajo el fondo metálico del tanque, pueden promover la formación de corrosión localizada o actividad corrosiva, que es difícil de monitorear y evaluar.

Esta información traducida de la norma *NACE Standard Recommended Practice, standard RP 019-93 "External Cathodic Protection of On-Grade Metallic Storage Tank Bottoms"* Protección Catódica externa para fondos de tanques de almacenamiento práctica recomendada RP 019-93.

Son los criterios internacionales recomendados para esta protección.

3.3. Sistemas de Protección Catódica para tanques de almacenamiento

3.3.1 Descripción

Los sistemas de protección catódica se diseñan e instalan para prevenir la corrosión del fondo de un tanque, cumpliendo los requerimientos de alguno de los criterios listados en el apartado 3.2. "Criterios para sistemas de protección catódica". Para obtener los resultados esperados, el sistema de protección catódica debe diseñarse adecuadamente, después de estudiar los siguientes aspectos:

- a) Diseño, especificaciones y prácticas de ingeniería.
- b) Procedimientos de operación.
- c) Requerimientos de seguridad, ambientales y de áreas peligrosas.
- d) Pruebas de campo.

En general, el diseño deberá permitir una protección adecuada contra la corrosión, minimizando los costos de operación, mantenimiento e instalación.

Los principales objetivos del diseño de sistemas de protección catódica para fondo de tanques son:

1. Entregar y distribuir suficiente corriente al fondo del tanque, para asegurar que se cumplan los criterios de protección.
2. Proveer una vida de diseño al sistema de ánodos y otros equipos, de acuerdo a la vida de diseño del tanque, o proveer el reemplazo periódico de los ánodos y el mantenimiento del equipo.
3. Proveer márgenes adecuados para los cambios previsibles por aumento en los requerimientos de corriente con el tiempo.
4. Colocar los ánodos, cables, rectificadores y estaciones de prueba en lugares donde sea mínima la posibilidad de que sufran daños físicos.
5. Minimizar las corrientes de interferencia con las estructuras vecinas.
6. Proveer suficientes puntos de monitoreo, con el fin de que se puedan tomar mediciones para determinar el cumplimiento del criterio de protección sobre toda la superficie del fondo del tanque.

Existen muchos factores a considerar en el diseño de ambos sistemas, interior y exterior, de protección catódica. Los sistemas de protección catódica sólo deben ser diseñados por personas con experiencia comprobada en esta práctica.

En lo posible, el diseño deberá basarse en componentes estandarizados, suministrados por proveedores especializados en la producción de elementos para sistemas de protección catódica.

3.4 Especificaciones para tanques de almacenamiento.

3.4.1 Ánodos de sacrificio

Los sistemas de ánodos de sacrificio, utilizan ánodos galvánicos, los cuales están hechos de magnesio ó zinc en forma de barras, se instalan los ánodos enterrados directamente en el suelo rodeados de una mezcla química y empacados en sacos especiales.

Los ánodos pueden estar conectados al sistema de forma individual o en grupos. Los ánodos galvánicos están limitados en su corriente de salida por el voltaje del sistema y la resistencia del circuito.

Se deben emplear sistemas del tipo de corriente impresa para la protección catódica de estructuras de gran tamaño, descubiertas o con recubrimiento deteriorado.

Los sistemas de ánodos de sacrificio de protección catódica, se deben aplicar en tanques de pequeño diámetro. Ya que la corriente de protección es limitada.

Para los ánodos galvánicos en instalaciones sobre el suelo, se deben utilizar tres materiales:

- a) Aleaciones de magnesio con alto potencial.
- b) Aleaciones de magnesio estándar (certificación H-1).
- c) Zinc.

Se hallan disponibles en el mercado diferentes pesos, tamaños y configuraciones de ánodos de magnesio y zinc, los cuales pueden venir desnudos o empacados con material de relleno especial. La variedad en pesos, se utiliza para cubrir los distintos requerimientos del diseño, de acuerdo a la corriente de salida y la vida útil del ánodo.

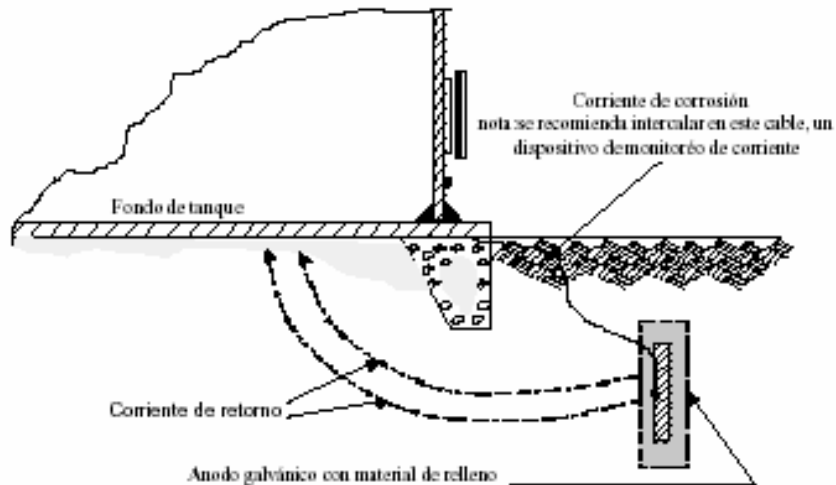
Es necesario considerar material de relleno especial, cuando se instalan ánodos en suelos de alta resistividad.

El material de relleno consiste en una mezcla de yeso, bentonita y sulfato de sodio, que reduce la resistencia e incrementa el área de contacto del ánodo con el suelo.

El número de ánodos que se requieren para la protección catódica de tanques de almacenamiento sobre el suelo, depende del requerimiento total de corriente y de la corriente de descarga promedio individual de los ánodos en el suelo. Al calcular la colocación de los ánodos, también deben considerarse los factores que influyen en la distribución de la corriente sobre la geometría de la estructura.

Generalmente se obtiene mejor distribución de la corriente y una polarización más uniforme, distribuyendo ánodos uniformemente alrededor del tanque o bajo los tanques de nueva construcción como lo muestra la figura 18.

Figura 18
Protección de tanque con ánodos de sacrificio

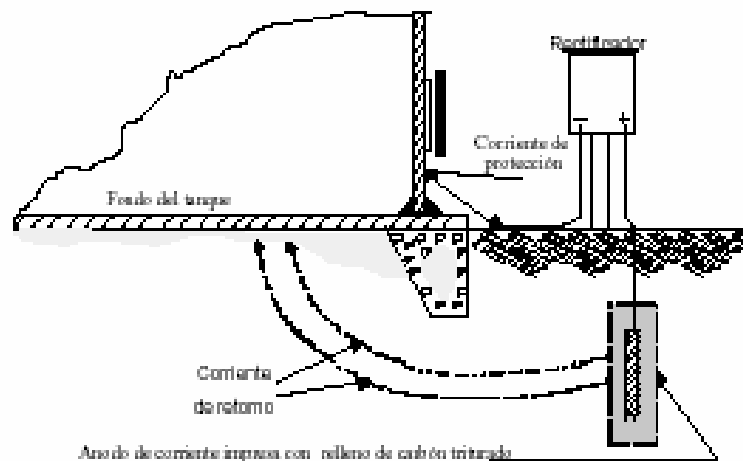


fuelle: NRF PEMEX 017-2001 Comité normalizador PEMEX Pág. 10

3.4.2 Ánodos para sistemas de corriente impresa

Los ánodos utilizados en el método de corriente impresa deben ser de materiales como el grafito; el hierro fundido con alto contenido de silicio; metales platinizados; la magnetita y mezcla de óxidos metálicos, entre otros. Estos ánodos se instalan desnudos con material de relleno especial (como el grafito pulverizado, con alto contenido de carbón). Están conectados, individualmente ó en grupos, a una terminal positiva o a una fuente de corriente directa, mediante conductores aislados. La estructura se conecta a la terminal negativa, desde una fuente de corriente directa (rectificador) como lo muestra la figura 19.

Figura 19 Protección de tanque con corriente impresa



fuelle: NRF PEMEX 017-2001 Comité normalizador PEMEX Pág. 10

Para instalaciones en el suelo se prefiere el grafito, el hierro fundido con alto contenido de silicio o mezcla de óxidos metálicos.

Cada material del ánodo tiene una densidad de corriente óptima que da una máxima vida de servicio al ánodo.

Los ánodos pueden ser localizados en camas o distribuidos cerca, abajo, ó alrededor, de las estructuras que se van a proteger. Un diseño adecuado para una cama de ánodos debe:

- Evitar interferencias físicas con las estructuras existentes, particularmente con los sistemas de tierra física.
- Suministrar una corriente uniformemente distribuida.
- Evitar interferencias de corrientes parásitas de estructuras adyacentes.

El número de ánodos para un diseño particular de protección catódica, se determina por el requerimiento total de corriente de las estructuras por proteger y por la densidad de corriente óptima del material seleccionado para el ánodo.

Al diseñar la distribución de los ánodos, deben instalarse ánodos adicionales para un flujo más uniforme de la corriente y para permitir un margen en caso de fallas aisladas en la conexión, o por agotamiento de algunos ánodos.

3.4.3 Materiales de los ánodos

Los ánodos inertes más comúnmente utilizados en los sistemas de protección catódica por corriente impresa son:

- **Ánodo de grafito:** El grafito es el material más empleado para la instalación de dispositivos anódicos en tierra, por su gran conductividad y bajo consumo en la mayoría de los suelos.

Uso: en todo tipo de suelos.

- **Ánodo de acero al alto silicio:** Este tipo de ánodos son más conocidos como de "Ferro-silicio" y se producen en dos aleaciones de acero al alto silicio cuyas características son:

- **Ánodo de acero al alto silicio (ferro silicio).**

Uso: Terreno de baja resistividad.

Ánodo de acero al alto silicio y cromo.

Se fabrican en formas cilíndricas tanto sólidas como tubulares.

Uso: en condiciones de muy baja resistividad y agua salada.

- **Ánodo de mezcla de óxidos metálicos.**

Estos ánodos son fabricados de un sustrato de titanio el cual es recubierto con un catalizador de mezcla de óxidos metálicos. Debido a que el sustrato de titanio es protegido en forma natural por una capa oxidante, el ánodo conserva sus dimensiones durante el tiempo de vida del sistema. La conducción de la corriente se lleva a cabo a través del catalizador de mezcla de óxidos metálicos, el cual es altamente conductor y totalmente oxidante por lo que se pueden lograr corrientes de alta intensidad.

- **Ánodo platinizado:** El platino siendo un buen conductor presenta un consumo prácticamente nulo a cualquier densidad de corriente. Pero debido a su alto costo su uso es muy restringido.

Uso: en forma de recubrimiento sobre otro metal base como la plata o el Titanio.

3.4.4 Ánodos galvánicos (de sacrificio)

Este tipo de ánodos sirven esencialmente como fuente de energía, donde no es posible obtener energía eléctrica con facilidad o en las que no es conveniente o económico instalar líneas de energía para este propósito, los materiales que más se utilizan como ánodos galvánicos son el magnesio, el aluminio y el zinc.

- **Ánodo de magnesio**

Se fabrican en diversos pesos y medidas incluyendo cintas y barras, considerando el criterio del diseñador. El magnesio es el material más utilizado como ánodo galvánico. Estos ánodos deben de cumplir con el procedimiento ASTM G97 o equivalente.

Uso: principalmente para proteger estructuras enterradas, tanques condensadores, ductos, entre otros.

- **Ánodo de aluminio.**

Se fabrican en diversos pesos y medidas.

Uso: para proteger estructuras sumergidas que operan con altas temperaturas en plataformas marinas.

- **Ánodo de zinc.**

Este tipo de ánodos se fabrican con zinc de alta pureza (99.99%) en diversos pesos y medidas con alma de tubo, varilla o patín de solera galvanizada para su instalación.

Usos: en forma de brazaletes para proteger estructuras sumergidas, tuberías de acero desnudas en suelos de baja resistividad, cascos de barcos, entre otros.

3.4.4.1 Materiales de relleno (*Backfill*)

Se utilizan para ampliar el área de los ánodos con el fin de reducir su resistencia de contacto con el suelo.

- **Para ánodos inertes**

En estos casos se usa como material de relleno, carbón de coque metalúrgico pulverizado.

- Para ánodos galvánicos.

En estos casos se usa como material de relleno la composición que a continuación se indica en la Tabla IX, pero dependiendo de la resistividad del terreno el porcentaje variará.

Tabla IX Especificaciones de ánodos

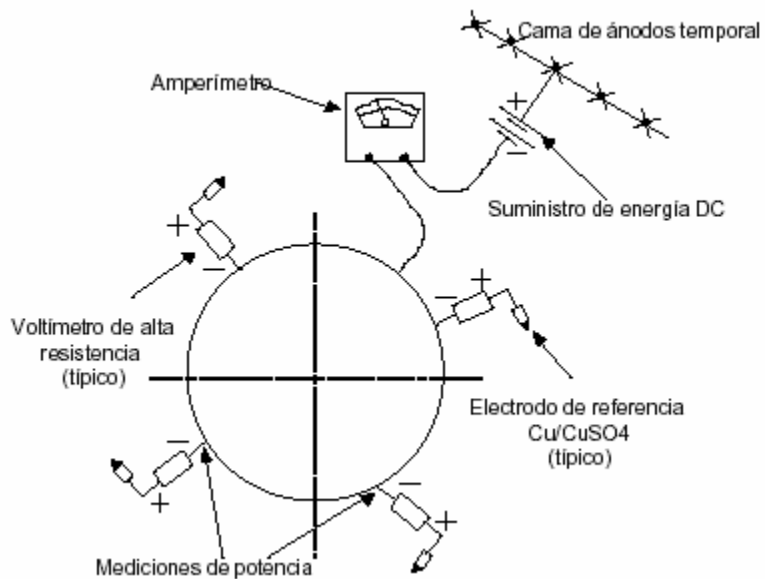
MATERIAL	PESO EN %
Yeso seco en polvo	75
Bentonita seca en polvo	20
Sulfato de Sodio anhidro.	5
Agua para saturar mezcla	
Peso de ánodo en Kilogramos (lb)	Cantidad de relleno en Kg (lb)
7.71 (17)	13.61 (30)
14.51 (32)	15.88 (35)
21.77 (48)	23.58 (52)

fuelle: NRF PEMEX 017-2001 Comité normalizador PEMEX Pág. 14

3.4.5 Requerimientos de corriente y voltaje

Para un diseño óptimo, la corriente requerida para la protección catódica debe calcularse utilizando los resultados de pruebas de requerimientos de corriente. Sin embargo, en ausencia de una prueba de requerimiento de corriente, una densidad aceptable de la corriente es de entre 2 a 3 miliamperios por 0.09 metro cuadrado (un pie cuadrado), en condiciones ambientales normales. (Principios y prevención de la corrosión por Denny A. Jones página 457). Si se lleva a cabo una prueba para determinar el requerimiento de corriente, ésta sólo puede efectuarse en los tanques que ya se encuentran instalados. Esta prueba se realiza utilizando una cama temporal de ánodos, con una fuente de corriente directa como lo muestra la figura 20.

Figura20 Configuración para una prueba Requerimiento de Corriente



fuelle: NRF PEMEX 017-2001 Comité normalizador PEMEX Pág. 14

La cama temporal se posiciona típicamente en el suelo, cerca del perímetro del tanque. Dependiendo de la corriente requerida, la fuente de energía puede ser desde una batería de 12 voltios, hasta una máquina de soldar de 300 amperios.

La prueba de requerimiento de corriente se lleva a cabo forzando una cantidad conocida de corriente, desde la cama temporal de ánodos a través del suelo y hacia el tanque que se va a proteger. La cantidad de la protección alrededor del tanque y bajo su centro, si es posible, se evalúa utilizando mediciones de potencial. Estas pruebas permiten aproximaciones de la corriente requerida para proteger el tanque. Las pruebas de requerimiento de corriente deberán realizarse con un nivel de líquido adecuado en el tanque (mínimo 75 %), para maximizar el contacto del fondo del tanque, con el material de relleno en el que se asienta. El voltaje necesario para la cantidad de corriente requerida, depende en gran parte del número y localización de ánodos y de la resistividad del suelo. Dado que la corriente se determina generalmente en las pruebas de requerimiento de corriente o es estimada, el voltaje requerido puede calcularse mediante la ley de Ohm ($E = I \cdot R$), si se conoce la resistencia del circuito.

La resistencia puede ser estimada de varias formas:

- Mediante sistemas existentes de corriente impresa, similares al que se va a instalar.
- Mediante pruebas de requerimiento de corriente, si la cama de ánodos de prueba es similar.
- De las pruebas de resistividad del suelo, se puede calcular la resistencia del ánodo a tierra. La resistencia del ánodo a tierra es generalmente la

parte preponderante de la resistencia total del circuito en un sistema de corriente impresa.

3.4.6 Rectificador

El rectificador de corriente es el equipo que transforma la corriente alterna en directa, este procedimiento es uno de los más empleados para la protección catódica.

Generalmente se alimenta de corriente alterna de baja tensión (110/220/440 V. C. A.) monofásica o trifásica. En el proyecto se deben indicar las características eléctricas, de construcción, de operación e instalación procurando seleccionar la unidad más simple posible para su aplicación particular.

Es necesario que el rectificador tenga un enfriamiento adecuado, por lo que debe instalarse lejos de cualquier fuente que irradie calor o por donde circulen aire o gases calientes, así como también lejos de fuentes que tengan descargas corrosivas que pudieran atacar a la unidad, especialmente si es enfriado por aire.

El enfriamiento por aceite debe seleccionarse en áreas donde la atmósfera sea muy corrosiva o donde se acumule mucho polvo.

El gabinete del rectificador, independientemente del tipo de enfriamiento, debe conectarse a tierra.

El tablero de control del rectificador debe ser de fácil acceso y debe constar fundamentalmente de:

- Terminales de alimentación de corriente alterna.
- Terminales de salida de corriente directa.
- Elementos de protección de picos eléctricos.
- Elementos para registrar las condiciones de operación (amperímetro y voltímetro de corriente directa).
- Elementos para regular las condiciones de operación (taps o potenciómetros).
- Elemento de protección para descargas atmosféricas.

3.4.7 Selección del rectificador.

La selección de la capacidad de salida de un rectificador dependerá de los siguientes factores:

- Medición o estimación del requerimiento de corriente para la estructura a proteger.
- El voltaje necesario para generar el flujo de corriente desde el ánodo hasta la estructura enterrada.
- Los rectificadores deben seleccionarse con una sobrecapacidad moderada (generalmente del 10 al 50%), para permitir ajustes durante la vida del sistema de protección catódica y evitar daños por sobrecargas de corriente. Debe tenerse cuidado cuando el exceso de capacidad del rectificador se utiliza en los ánodos. Si se incrementa la corriente de salida de los ánodos por arriba de la capacidad de drenaje especificada por el fabricante, se reducirá sensiblemente su vida útil.

3.4.8 Aislamiento eléctrico

Se deben instalar dispositivos de aislamiento, consistentes en bridas, juntas aislantes prefabricadas, juntas monolíticas o monoblock o acoplamientos, cuando se requiere el aislamiento eléctrico del sistema para facilitar la aplicación del control de corrosión. Estos dispositivos deben seleccionarse para temperatura, presión y aislamiento eléctrico correcto.

Los dispositivos de aislamiento no deben instalarse en áreas cerradas, en las que existan normalmente atmósferas explosivas.

La conexión a tierra de los equipos eléctricos es un elemento esencial para la seguridad del personal.

3.5 Otros factores que afectan la protección catódica

El contenido de un tanque de almacenamiento puede influir en la corrosión del fondo del tanque. La corrosión puede acelerarse sobre la superficie externa del fondo de un tanque calentado a temperaturas elevadas, si el área de contacto es húmeda, los tanques de almacenamiento que contienen productos calientes pueden requerir un incremento en la densidad de corriente; para lograr una protección adecuada sobre la superficie externa del fondo.

Sin embargo, los operarios de los tanques deberán estar conscientes que si penetra agua en el aislamiento de un tanque, la resistividad del aislamiento puede disminuir, desarrollando una condición más corrosiva. Para esta situación, la instalación de sistemas de protección catódica deberán ser considerados.

3.5.1 Reemplazo de fondos de tanques

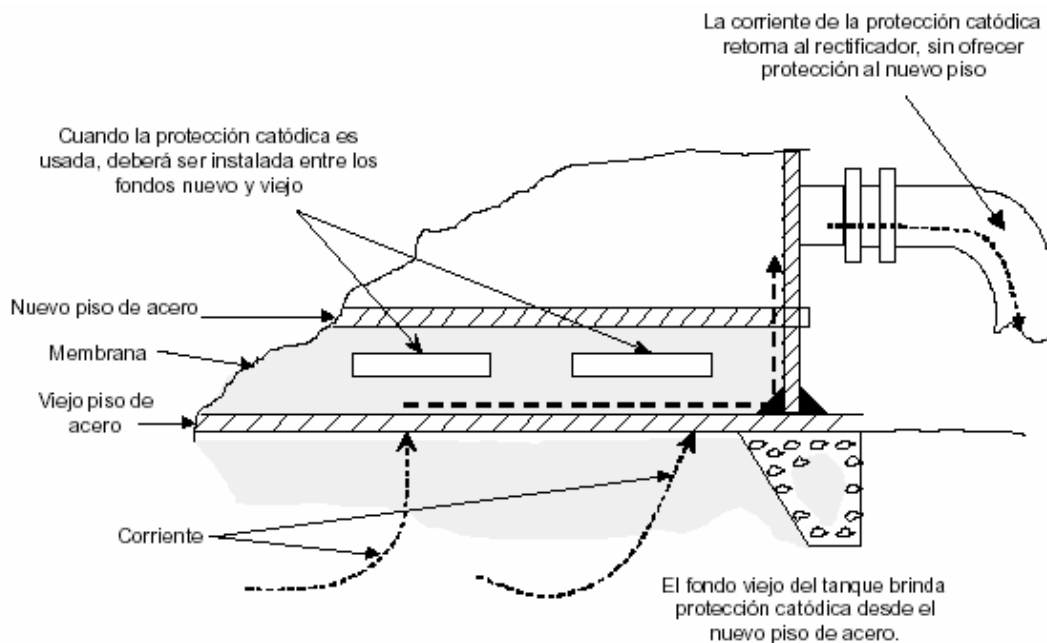
El reemplazo o reparación de fondos de tanques de acero es una práctica común, ya que las paredes de los tanques generalmente duran más que el fondo. Los recubrimientos se aplican frecuentemente en tanques para protección de la corrosión interior y exterior.

Si un fondo de tanque se protege con protección catódica o si se planea protección catódica para el nuevo fondo, el fondo viejo deberá ser retirado totalmente. Si este no se retira, el fondo viejo formará un escudo que recolectará la corriente catódica a través del suelo y bloqueará la protección catódica del fondo nuevo.

A menos que la protección catódica sea instalada entre los dos fondos de acero o el fondo viejo sea retirado, aislado eléctricamente o cubierto con un material no conductor ver figura 21, una celda galvánica puede resultar entre el nuevo y viejo fondo.

La experiencia en la industria nos muestra, que si el electrolito conductor existente entre ambos fondos, el flujo de corriente y la pérdida del metal será desde el nuevo fondo, resultando fallas prematuras en éste.

Figura 21 Nuevo fondo de acero sobre fondo viejo.



fuelle: NRF PEMEX 017-2001 Comité normalizador PEMEX Pág. 25

3.5.2 Contención Secundaria

Hay una variedad de métodos disponibles para contención secundaria. Estos incluyen, pero no es limitativo, los siguientes:

- Uso de impermeabilizantes de arcilla en diques de tanques.
- Diseño de fondos de tanques duales.
- Membranas impermeabilizantes no metálicas.

El uso de contención secundaria reducirá el riesgo ambiental en caso de una fuga. Sin embargo, el uso de ciertas técnicas de contención secundaria, pueden

impedir el uso de protección catódica y en algunos casos pueden acelerar la corrosión del fondo de un tanque.

Si un sistema de contención secundaria a base de revestimiento con membrana impermeable se encuentra colocado o se ha instalado en un área con diques antes de la construcción de un nuevo tanque, la posibilidad de la protección catódica es muy reducida.

La mayoría de los sistemas de protección catódica se vuelven ineficaces, debido a que el revestimiento actúa como una barrera para el flujo de corriente eléctrica necesaria para la protección. Otra consecuencia de contención secundaria incluye el uso de un revestimiento impermeable que puede entrapar líquidos corrosivos, resultando una corrosión más severa del fondo del tanque.

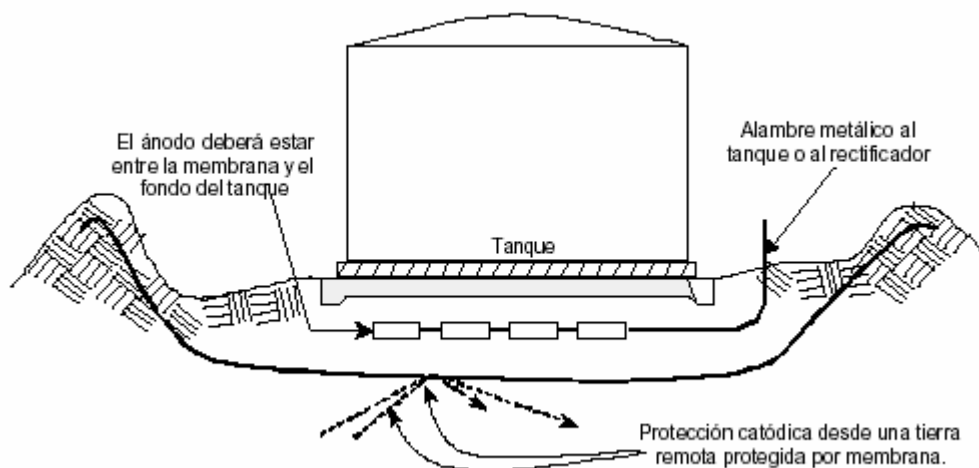
Los recubrimientos a base de gruesas capas laminadas y resistentes a la corrosión, se instalan en tanques principalmente para prevenir la corrosión interna y frecuentemente, se usan como una alternativa al reemplazo del fondo de acero. Siempre que existan condiciones corrosivas debajo del tanque el recubrimiento podría fallar, debido a un inadecuado soporte estructural, por no estar diseñado para soportar cargas. El uso de laminados de capas gruesas u otro tipo de recubrimiento interno, no debe ser suficiente justificación para eliminar la necesidad de la protección catódica externa de fondos de tanques.

3.5.2.1 Recubrimiento de membrana impermeable

Es un método utilizado para suministrar una contención secundaria, recubriendo el área entera del dique con una membrana impermeable como lo muestra la figura 22. Una membrana existente debajo de un tanque o proponer una para un tanque nuevo puede tener un impacto significativo sobre las alternativas y el diseño de un sistema de protección catódica.

En cada caso, los ánodos deben ser colocados entre la membrana y el fondo del tanque para que funcione la protección catódica.

Figura 22 Membrana Impermeable bajo tanque de almacenamiento



fuelle: NRF PEMEX 017-2001 Comité normalizador PEMEX Pág. 24

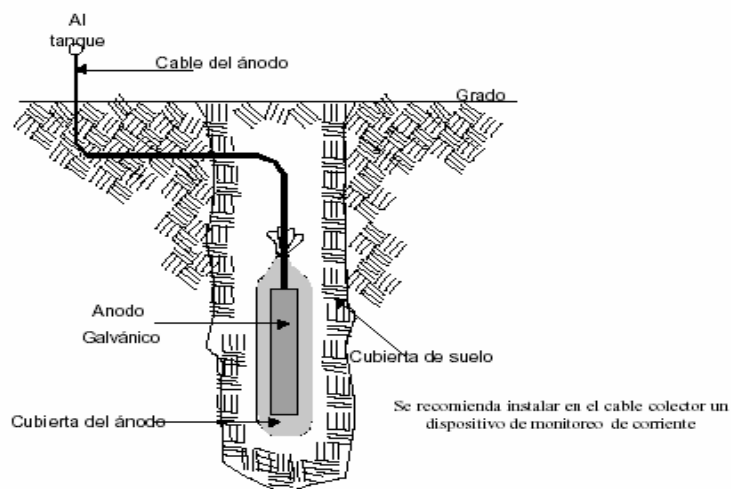
Sin embargo, si se instala debajo del tanque una capa de arcilla bentonítica como contención secundaria, la experiencia ha demostrado que no afectará significativamente la operación de un sistema de protección catódica convencional.

3.6 Construcción de sistemas de protección catódica

3.6.1 Sistema de ánodos de sacrificio

Los empaques de los ánodos deberán inspeccionarse para asegurar la integridad de su contenido y mantenerse secos durante su almacenamiento. Si los ánodos empacados individualmente se suministran en envases herméticos, éstos deberán retirarse antes de su instalación. La continuidad eléctrica entre el ánodo y su cable metálico, deberá probarse sin dañar la integridad del empaque. Los ánodos galvánicos empacados deberán rellenarse con tierra del lugar compactada. La figura 23 muestra la instalación típica de un ánodo galvánico.

Figura 23 Instalación Típica de Ánodo Galvánico



fuelle: NRF PEMEX 017-2001 Comité normalizador PEMEX Pág. 30

Los ánodos deberán colocarse al centro del agujero y empacarse con el material de relleno especial, cuando se suministran por separado de dicho material, y deberá compactarse con tierra natural el resto de la excavación. Cuando vienen preempacados, simplemente se colocan al centro del agujero y se rellenan con tierra natural.

Cuando se utilizan ánodos galvánicos para proteger las superficies internas de los fondos de los tanques, éstos deben ser asegurados o soldados al fondo del tanque. La conexión puede ser recubierta, teniendo cuidado de no recubrir o pintar el ánodo; estos son instalados sin relleno y se debe dejar un espacio entre el ánodo y el fondo del tanque con el objeto que exista electrolito entre el ánodo y cátodo.

Durante el relleno de los ánodos con material especial, deberá cuidarse que no se dañen los alambres y conexiones. Los cables no deben estar tensos para prevenir esfuerzos. Los ánodos no deben sujetarse por los cables al transportarse o colocarse en zanjas o agujeros.

3.6.2 Sistemas de corriente impresa

Los ánodos de corriente impresa pueden enterrarse verticalmente, horizontalmente, en ángulo ó en fosas profundas. Los ánodos de corriente impresa son comúnmente instalados en rellenos carbonosos, que deben cumplir con la especificación 3.4.4.

Si el relleno se instala adecuadamente, de manera que no se forme vacío alrededor del ánodo, la mayor parte de la corriente que alcanza éste, es

conducida al relleno por contacto eléctrico. Esto promueve el consumo del relleno, en lugar del ánodo y alarga substancialmente la vida de este último.

Los rellenos carbonosos también tienden a reducir la resistencia total del circuito reduciendo la resistencia de contacto entre el suelo y el ánodo.

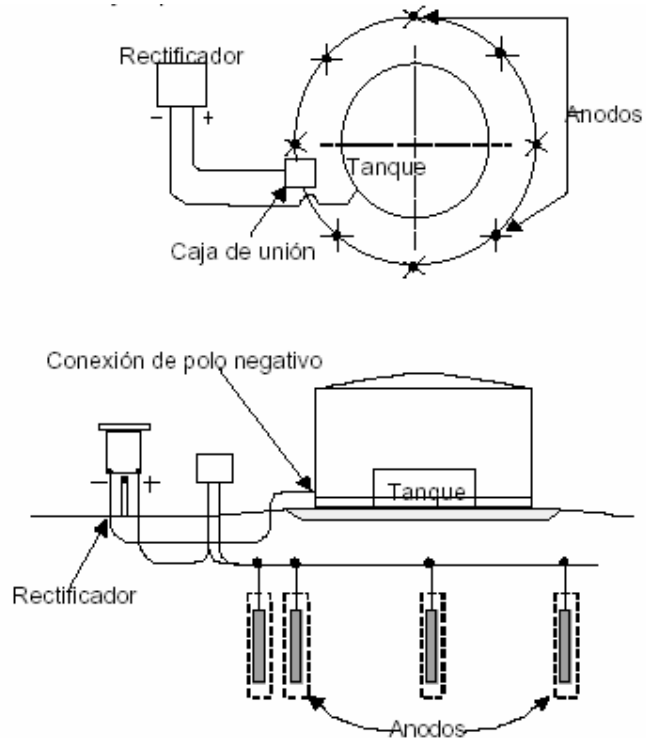
Los principales aspectos a observar en la instalación de ánodos de corriente impresa son:

- El relleno carbonoso debe instalarse correctamente debido a que un relleno insuficiente puede significar una elevada resistencia y acortar la vida del ánodo. El ánodo debe centrarse dentro del bloque carbonoso. Si el ánodo entra en contacto con el suelo, pueden ocurrir fallas prematuras.
- Debe protegerse y aislarse cuidadosamente la conexión entre el cable y el ánodo, por ser el punto más débil del ánodo y muy propenso a fallas por entrada de humedad a través de la más pequeña fractura.
- Los ánodos y sus cables deben instalarse a una profundidad suficiente para protegerlos contra cualquier daño por accidente. Debe recordarse que el cable del ánodo puede cortarse por corrosión si existe la más pequeña fractura en su aislamiento.
- Deben instalarse señalamientos visibles sobre la tierra, para indicar la localización de los ánodos o camas anódicas.

3.6.3 Instalación de camas de ánodos poco profundas

La figura 24 muestra el modelo de instalación de una cama anódica poco profunda.

Figura 24 Instalación típica de camas de ánodos poco profundas



fuelle: NRF PEMEX 017-2001 Comité normalizador PEMEX Pág. 32

Para una instalación vertical típica de los ánodos, se excava una fosa de 20 a 30 centímetros de diámetro por 3 a 6 metros de profundidad, aproximadamente. Cuando se dispone de barrenas, éstas pueden utilizarse, si el terreno y el derecho de vía lo permiten. El ánodo se centra en la fosa y el material de relleno debe compactarse cuidadosamente.

Muchos ánodos vienen en sacos de 20 centímetros de diámetro nominal, empacados con material de relleno compactado. Algunas veces es necesario instalar ánodos horizontales donde las rocas se encuentran a poca profundidad o donde la resistividad del suelo se incrementa marcadamente con la profundidad.

Se excava una zanja a la profundidad adecuada y se coloca una columna horizontal de rellenos carbonoso, generalmente de sección cuadrada. El ánodo es colocado horizontalmente en el centro de esta columna. En algunos casos, para mejorar la distribución de corriente en el centro del fondo del tanque, se instalan ánodos en fosas barrenadas con un ángulo, por debajo del perímetro del fondo del tanque. Los ánodos encapsulados pueden ser benéficos para tales instalaciones, para asegurar que el ánodo permanezca centrado en el relleno carbonoso.

Deben instalarse protecciones adicionales a rectificadores u otras fuentes de energía para minimizar la posibilidad de daños o vandalismos.

Deberá suministrarse un interruptor de desconexión externa con cableado de corriente alterna. La cubierta del rectificador debe estar debidamente aterrizada.

Las conexiones del cableado al rectificador deben ser mecánicamente seguras y buenas conductoras eléctricas. "Antes de energizar, deberá verificarse que la terminal negativa del cable esté conectada a la estructura por proteger y que la terminal positiva esté conectada a los ánodos, así como el rectificador debe estar ajustado en la mínima salida", para ajustar de acuerdo a los criterios de protección.

Se prefiere una conexión de polvo de soldadura por aluminotermia cadweld®, thermOweld®, para conectar la terminal negativa del rectificador a la estructura por proteger; sin embargo se puede sustituir por conexiones mecánicas adecuadas, si fuera necesario. Todas las conexiones positivas de los cables y sus empalmes deben protegerse cuidadosamente contra el agua y cubrirse con aislamiento eléctrico. Si se utilizan conexiones metálicas, no deben enterrarse, porque pueden actuar como ánodos y pueden ser consumidas en una reacción anódica.

3.6.4 Instalación del cableado

Todo el cableado subterráneo, conectado a la terminal positiva de un rectificador, tiene un potencial positivo, con respecto al suelo.

Si no se halla totalmente aislado, el cableado puede descargar corriente (actuar como un ánodo), lo que resultará en corrosión del cableado y en una rápida falla de la instalación de protección catódica.

Por lo tanto, todos los cables del ánodo, los cables principales y cualquier empalme del cableado debe ser cuidadosamente inspeccionado antes de enterrarse. El aislamiento de los mismos, deberá ser del tipo, polietileno negro de alto peso molecular (HMWPE) (*high molecular weight polyethylene*).

Los cables pueden instalarse manualmente y/o con equipo tomando las precauciones adecuadas. El material de relleno debe estar libre de piedras con bordes afilados o de otros materiales que pudieran dañar el aislamiento del cableado. En áreas sujetas a excavaciones frecuentes o donde el aislamiento del

cableado esté propenso a los roedores, deberá considerarse instalar el cableado en conductos rígidos.

En el cable principal alimentador no se aceptan empalmes subterráneos, solo en la conexión entre el cable de alimentación (terminal positiva) y las camas de ánodos.

Las conexiones entre el cableado principal y las terminales del ánodo, deben ser mecánicamente seguras y buenas conductoras eléctricas. Debe dejarse suficiente holgura para evitar tensiones o deformaciones en el cableado. Debe sellarse todas las conexiones, para evitar la penetración de la humedad y asegurar el aislamiento eléctrico con respecto al ambiente.

3.6.5 Cajas de Unión para pruebas de corrosión, conexiones y uniones

El cableado de la estructura y el de pruebas, deberá estar limpio, seco y libre de materiales extraños en los puntos de conexión.

Las conexiones del cableado de prueba a la estructura deben instalarse de manera que permanezcan mecánicamente seguras y con buena conductividad eléctrica. Un método preferido, desde el punto de vista eléctrico, es el utilizar una conexión de polvo de soldadura por aluminotermia, cadweld®, thermOweld®. Sin embargo, en este método durante su aplicación se deben tomar las medidas de seguridad correspondientes en áreas donde pueda existir una atmósfera explosiva durante el proceso de fijación.

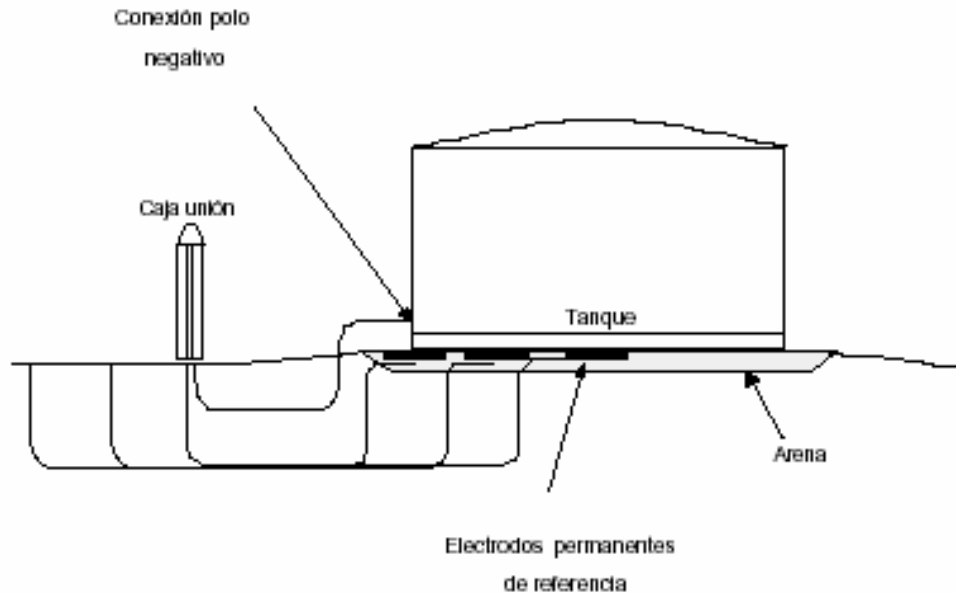
Se debe poner atención a la manera de instalar los cables de prueba para las pruebas de control de corrosión, para evitar afectar los esfuerzos físicos de la estructura, en los puntos de sujeción.

Todos los accesorios de los cables de prueba y todos los cables desnudos deberán ser recubiertos con un material eléctricamente aislante. El cableado de prueba debe ser identificado permanentemente, de cualquier forma. Debe dejarse suficiente holgura para evitar tensión mecánica en los cables. Se deben evitar daños a los aisladores y, si ocurrieran, deben ser reparados adecuadamente.

Uno de los problemas inherentes al monitoreo de los sistemas de protección catódica en el fondo de tanques, es la dificultad de colocar un electrodo portátil de referencia en la cercanía del tanque, bajo la superficie. Para la construcción de tanques nuevos el problema de medir el potencial del suelo al tanque en el centro, puede ser resuelto instalando cualquiera de los siguientes:

- Electrodo de referencia permanentes y cableado por debajo del asiento del tanque por todo su perímetro, donde pueda terminarse en un tablero de control para utilizarlo en pruebas futuras, figura 25.

Figura 25 Tablero de Control y Electrodo de Referencia Permanente



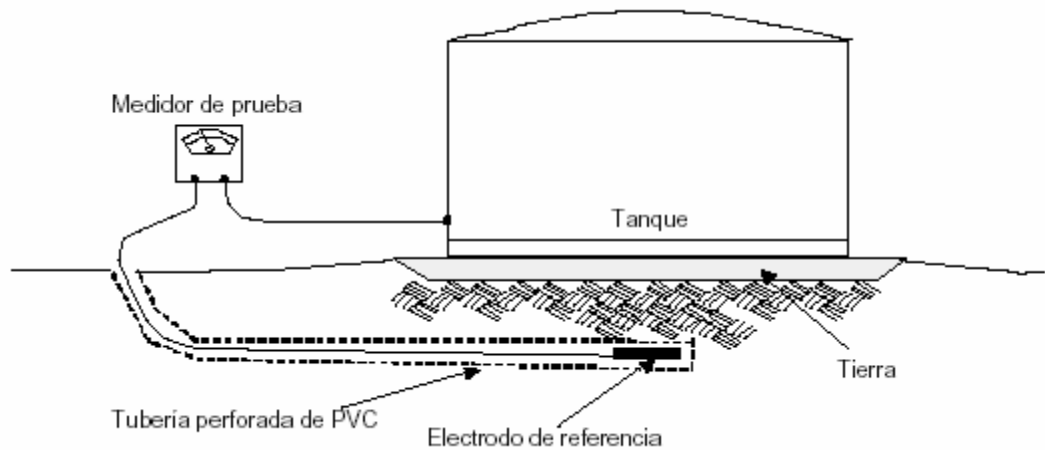
fuelle: NRF PEMEX 017-2001 Comité normalizador PEMEX Pág. 34

- Un tubo perforado de cloruro de polivinilo (PVC) o de plástico de fibra reforzada, para utilizarse al perfilar el potencial entre el tanque y el suelo, desde el perímetro hasta el centro. Cuando se especifica un electrodo de referencia permanente, su instalación deberá efectuarse bajo los procedimientos recomendados por el fabricante.

Si se programa el reemplazo ó la reparación del fondo de un tanque, se debe considerar la instalación de uno ó más electrodos de referencia permanente bajo el tanque. La instalación de electrodos permanentes de referencia en los tanques existentes no programados para reparación, puede realizarse utilizando un chorro de agua ó un procedimiento mecánico. Se puede barrenar un agujero desde el perímetro del tanque hacia el centro del tanque, para instalar un tubo

perforado de PVC ó de plástico de fibra reforzada, por debajo del tanque existente (figura 26).

Figura 26 Tubería Perforada para electrodo de Referencia



fuelle: NRF PEMEX 017-2001 Comité normalizador PEMEX Pág. 19

El tubo perforado es utilizado e instalado a manera de suministrar continuidad de corriente eléctrica en toda su longitud, entre el suelo exterior al tubo y el electrodo dentro del tubo.

Un electrodo de referencia, de cobre/ sulfato de cobre (Cu/CuSO_4), puede insertarse dentro del tubo, utilizando una cinta no metálica de electricista o un tubo de PVC de pequeño diámetro, para obtener un perfil del potencial entre el suelo y el tanque, a través del fondo. Si se utiliza un dispositivo metálico para insertar el electrodo de referencia, este debe ser extraído antes de tomar las lecturas.

PRECAUCIÓN: Debe tenerse cuidado al emplear técnicas de chorro de agua similar a *water blasting*, para evitar socavaciones en los cimientos del tanque.

Se debe controlar cuidadosamente los medios mecánicos de inserción del tubo, para evitar daños en el fondo del tanque.

Es común poner en contacto el tanque con un cuchillo o piqueta, al tomar las medidas del potencial entre el tanque y el suelo. Esta acción repetida, puede causar fallas tempranas en la pintura del tanque. Esto se puede evitar instalando testigos permanentes de prueba, terminales a tierra, o piezas cortas de cable o tubo, que también permiten identificar rápidamente los lugares normales de monitoreo.

Si se requieren dispositivos de aislamiento, se debe realizar una inspección y efectuar mediciones eléctricas para asegurar que el aislamiento eléctrico es efectivo y cubre los requerimientos de protección catódica. Los dispositivos eléctricos aislados del sistema de almacenamiento de líquidos, para los fines de la protección catódica, deben contar con tierra segura, de acuerdo con los códigos eléctricos aplicables.

3.7 Mantenimiento

3.7.1 Operación y Mantenimiento de Sistemas de Protección Catódica

Los ánodos de corriente impresa deben inspeccionarse para evitar defectos, verificar la conformidad con las especificaciones de material, tamaño y longitud de los cables y que si se utiliza un contenedor para el ánodo, éste sea seguro.

Se debe tener cuidado para evitar grietas o daños a los ánodos durante su manejo e instalación. Los ánodos fracturados no deben emplearse. Los

cables deben inspeccionarse cuidadosamente para evitar cualquier defecto de aislamiento. Debe tomarse todas las precauciones para evitar daños de aislamiento en los cables.

Las mediciones eléctricas y las inspecciones son necesarias para determinar que la protección se ha establecido de acuerdo al criterio aplicable y que cada parte del sistema de protección catódica esta operando adecuadamente. Las condiciones que afectan la protección están sujetas a cambio con el tiempo. Pueden requerirse cambios en el sistema de protección catódica para mantener la protección. Son necesarias mediciones periódicas e inspección para detectar cambios en la operación del sistema de protección catódica.

Debe tenerse cuidado al seleccionar la localización, número y tipo de medición de corriente usada para determinar la adecuada protección catódica. Si los tanques están vacíos, hay posibilidad que grandes áreas del fondo no estén en contacto con el subsuelo. Las medidas del potencial en este caso pueden ser poco confiables.

3.7.2 Seguridad

Todo el sistema de corriente impresa debe ser diseñado pensando en la seguridad. Se debe tener cuidado de asegurar que todos los cables estén protegidos para evitar daños y la posibilidad de un arco eléctrico.

Los rectificadores y cajas de conexiones, deben cumplir convenientemente los requerimientos para el lugar específico y ambiente en donde estén instalados. El tanque debe estar perfectamente aterrizado.

Una guía adicional que regula arcos debidos a electricidad estática, presencia de corriente o alumbrado se puede obtener en API RP Z003, "Protección contra fuentes de ignición que provienen de estática, alumbrado y presencia de corriente" o su equivalente.

4. PROTECCIÓN CATÓDICA EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE LA PLANTA CARPESA

4.1 Introducción

Hanson Survey & Desingn, en nombre de CB&I Industrial provee los servicios de diseño, ingeniería, materiales e inspección a los sistemas de protección catódica por corriente impresa, para seis fondos de tanques de almacenamiento localizados en la planta CARPESA localizada en Puerto Quetzal Guatemala.

Donde se encuentran dos sistemas separados, uno para cuatro tanques de 78 pies de diámetro y el segundo para dos tanques de 115 pies de diámetro.

Los componentes bajo los tanques fueron instalados por CB&I junto con la construcción de los anillos base de los mismos. Los materiales bajo el tanque consisten en ¼" X 0.025" Ánodos tipo cinta de Titanio con Óxidos metálicos *Mixed metal Oxide Titanium Ribbon Anode* ubicados en la base del tanque a 5 pies del centro.

Todos los tanques tienen cables AWG #8 HMWPE positivos y tres electrodos permanentes de referencia con cable AWG #14 HMWPE color amarillo.

Ambos sistemas fueron energizados satisfactoriamente.

Las lecturas hechas para los cuatro tanques de 78 pies de diámetro, tanques #3, #4, #5 y #6, fueron hechas con los tanques llenos hasta un pie de producto. La base del tanque fue construida a base de concreto, y cuando el tanque es llenado con producto la base metálica del fondo desciende para un mejor contacto con el fondo y las lecturas de potencial y corriente pueden cambiar pero el nivel de protección se mantendrá en el rango de protegido. Si la salida del rectificador provee corriente por encima del rango, el rectificador puede ser ajustado por medio del tap de ajuste hasta un valor aproximadamente al 90% del rango del valor de protección.

Ambos rectificadores pueden entregar una corriente de salida entre 25 y 30 amperes.

Este capítulo proporcionará la siguiente información:

- Descripción de la estructura del sistema de Protección Catódica
- Conocimiento de materiales (*Bill of Materials*)
- Planos
- Procedimientos de prueba y resultados
- Diagrama de los rectificadores y listado de partes.

4.2 Sistema de Protección Catódica en tanques de Almacenamiento

Para tanques nuevos éste sistema de protección catódica es el ideal para proveer protección contra la corrosión para el nuevo fondo del tanque. Éste sistema ha sido diseñado para una vida de más de cincuenta años extendiendo la vida útil del fondo del tanque.

Este sistema una vez instalado tiene muchas ventajas sobre otros sistemas a continuación en la tabla X ventajas del sistema.

Tabla X Ventajas del Sistema de Protección Catódica De Ánodos de Cinta de Óxidos Metálicos

Sistema Ánodos de Cinta	Otros
Proveen alto desempeño	Muchas fallas
Diseño dieléctrico aislando de otros sistemas	No permiten tener sistemas aislados unos de otros
Completa protección y distribución de corriente en el fondo del tanque	Completa protección a veces, distribución de corriente insuficiente
Conexiones positivas múltiples, disminuyen el riesgo de falla en operación	Una simple falla en el cable resulta en el colapso de todo el sistema
Vida del diseño mayor a 50 años	Diseños no sobrepasan los 20 años
Sin interferencia eléctrica con estructuras cercanas	Interferencia es probable
Densidad de corriente de operación < 0.50 mA/Pie ²	Densidad de corriente de diseño esta en el rango entre 1 y 2 mA/pie ²
No existen pérdidas de corriente al enterrar mallas de tierra	La pérdida de corriente es considerable
No necesita sombra o blindaje el anillo	Se necesita sombra o blindaje
No se requiere aislamiento eléctrico para el tanque	El aislamiento del tanque es esencial para la apropiada operación
Bajo consumo de energía	Alto consumo de energía

fuelle: CB&I Industrial the woodlands, texas, Hanson Survey & Design, pág. 3

4.3 Descripción e Instalación del Sistema

El sistema es compuesto por Ánodos tipo cinta de Titanio con Óxidos metálicos, espaciados cinco pies entre sí, en una configuración en paralelo. Además están provistos con un cable multipar AWG # 8 HMWPE, de polaridad positiva para proveer una distribución de corriente uniforme a través de los ánodos. El cercano espaciamiento entre los ánodos y las redundantes conexiones eléctricas están diseñados para garantizar que éste diseño provea una distribución uniforme de corriente en todas las áreas del fondo del tanque.

Los ánodos de cinta usados en éste sistema están hechos de ¼" X 0.025" Ánodos tipo cinta de Titanio con Óxidos de pared ancha. La corriente catódica de protección se transfiere desde el titanio por la capa de acabado de óxido metálico, que es altamente conductiva así que permite una alta salida de corriente. El ánodo de cinta esta cubierto con un catalizador de óxido metálico a base de iridio y tantalio. El titanio está naturalmente protegido a sí mismo por una película de óxido que lo mantiene dimensionalmente estable para alargar la vida del sistema. Algún daño físico en la cinta puede ser tolerado y no tiene efectos adversos ya que tienen muchos puntos de conexión donde fluya corriente de protección.

La cinta de ánodos es instalada en el lugar donde estará el fondo del tanque junto con la protección de contención de derrames *liner* o junto con ésta y/o 6 pulgadas debajo del fondo metálico del tanque, cubierta y limpia con arena lavada para tanque a una profundidad mínima de 6 pulgadas.

Todas las intersecciones entre la cinta y la barra de conductores se hicieron con soldadura de aluminio-termia cadweld ®, para asegurar la continuidad eléctrica.

Celdas múltiples de referencia cobre / sulfato de cobre saturado fueron instaladas para permitir las medidas posteriores de potencial, bajo las siguientes condiciones:

- Potencial Natural (*Native Potential*) - Antes de que alguna corriente de protección haya sido aplicada al fondo del tanque.
- Potencial ON (*ON Potential*) - Después de la polarización con corriente aplicada.
- Potencial OFF (*OFF Potential*) - Después de la polarización con la corriente interrumpida.

Imposición precisa del nivel de protección para determinar acatamiento de acuerdo con los criterios de NACE RP 193-93.

Todos los cables positivos de ánodos y cables de electrodos de referencia terminan en una caja de unión (*junction box*) montada fuera del tanque, adyacentes y canalizados a través del anillo de la base del tanque.

Las conexiones negativas hacia el tanque fueron hechas por medio de un cable simple conectado al tanque y éste aterrizado por una conexión adyacente a la caja de unión.

Los rectificadores son del tipo enfriados por aire y catalogados para servicios en áreas no peligrosas.

4.4 Conocimiento de Materiales

El sistema entero está provisto de los siguientes componentes.

4 Tanques 78 pies.

- 3,850 pies de Ánodos MMO tipo cinta IV de titanio de 0.25" X 0.025" grado I, norma ASTM 265, Sustrato de Titanio con Iridio y camisa de Tantaló, proporcionados en rollos de 11 X 350' pies empacados en dispensadores manuales de cartón.
- 1500 pies de Barra conductora de Titanio de 0.5" X 0.04" norma ASTM 265 grado I, proporcionados en rollos de 3 X 500 pies empacados en dispensadores manuales de cartón.
- 12 cables de conexión de polaridad positiva cada uno con 100 pies de AWG # 8 HMWPE de aislamiento.
- 12 Celdas permanentes de referencia marca Borin Selth2 Modelo SER-007-CUY de Cobre / Sulfato de cobre saturado con 100 pies de cable AWG # 14 y RHH-RHW de aislamiento color amarillo.
- 4 Cajas unión de fibra de vidrio, con 3 X AGW # 8 terminales positivos con resistencia de 0.001 Ω shunt, 3 X AWG # 14 terminales de referencia, 1 AWG # 14 terminal negativo de prueba, 1 AWG # 8 terminal positivo y 1 AWG # 8 terminal negativo.
- 1 Rectificador enfriado por aire, salida de D.C. de 12 voltios 34 amperes, entrada de A.C. 230 voltios 1 fase 60 hertz, control manual de voltaje constante, diodos de Silicón, Puente de diodos de onda completa, filtros de eficiencia, supresores para A.C. y D.C., gabinete de aluminio robusto, Interruptor termo-magnético, 4 AWG # 8 terminales positivos y 4 AWG # 8 terminales negativos.
- 1,000 pies de cable positivo / negativo cable AWG # 8, HMWPE.

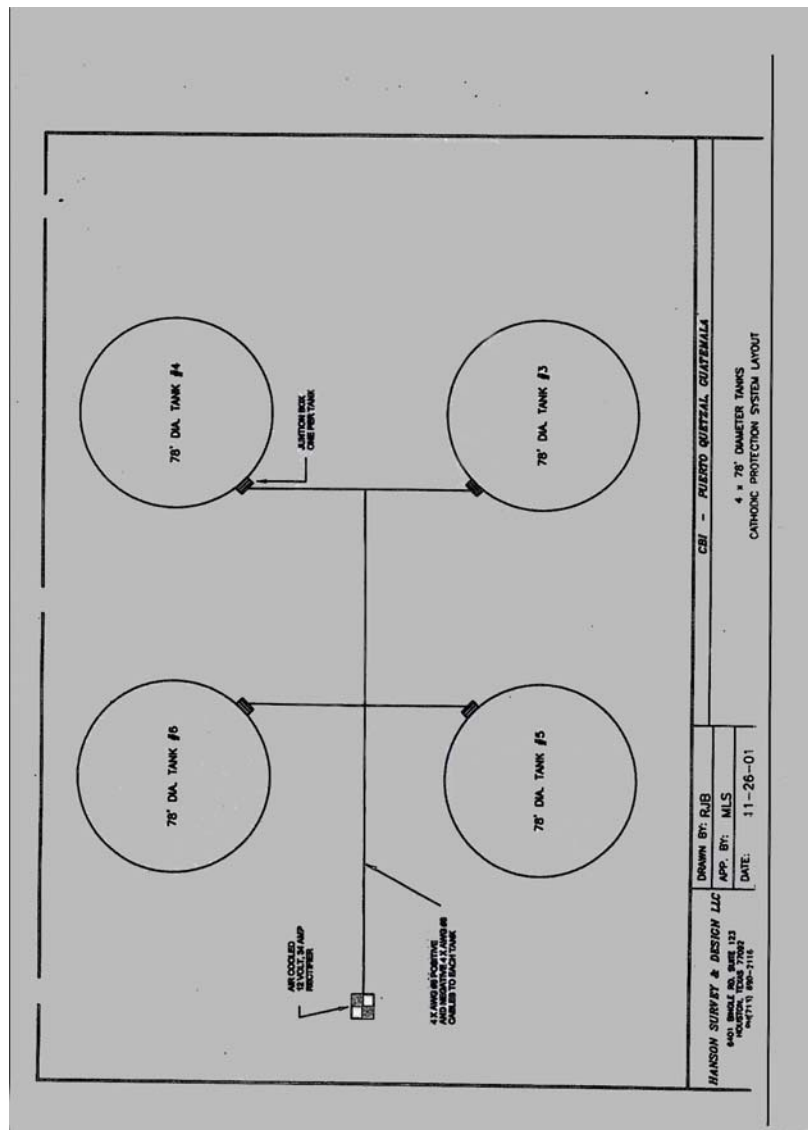
2 Taques de 115 pies

- 4,200 pies de Ánodos MMO tipo cinta IV de titanio de 0.25" X 0.025" grado I, norma ASTM 265, Sustrato de Titanio con Iridio y camisa de Tantaló, proporcionados en rollos de 11 X 350' pies empacados en dispensadores manuales de cartón.
- 1500 pies de Barra conductora de Titanio de 0.5" X 0.04" norma ASTM 265 grados uno, proporcionados en rolos de 3 X 500 pies empacados en dispensadores manuales de cartón.
- 6 cables de conexión de polaridad positiva cada uno con 100 pies de AWG # 8 HMWPE de aislamiento.
- 6 Celdas permanentes de referencia marca Borin Selth2 Modelo SER-007-CUY de Cobre / Sulfato de cobre saturado con 100 pies de cable AWG # 14 y RHH-RHW de aislamiento color amarillo.
- 2 Cajas unión de fibra de vidrio, con 3 X AGW # 8 terminales positivos con resistencia de 0.001 Ω shunt, 3 X AWG # 14 terminales de referencia, 1 AWG # 14 terminal negativo de prueba, 1 AWG # 8 terminal positivo y 1 AWG # 8 terminal negativo.
- 1 Rectificador enfriado por aire, salida de D.C. de 18 voltios 34 amperes, entrada de A.C. 230 voltios 1 fase 60 hertz , control manual de voltaje constante, diodos de Silicón, Puente de diodos de onda completa, filtros de eficiencia, supresores para A.C. y D.C., gabinete de aluminio robusto, Interruptor termo-magnético, 2 AWG # 8 terminales positivos y 2 AWG # 8 terminales negativos.
- 500 pies de cable positivo / negativo cable AWG # 8, HMWPE.

4.5 Planos y Diagramas

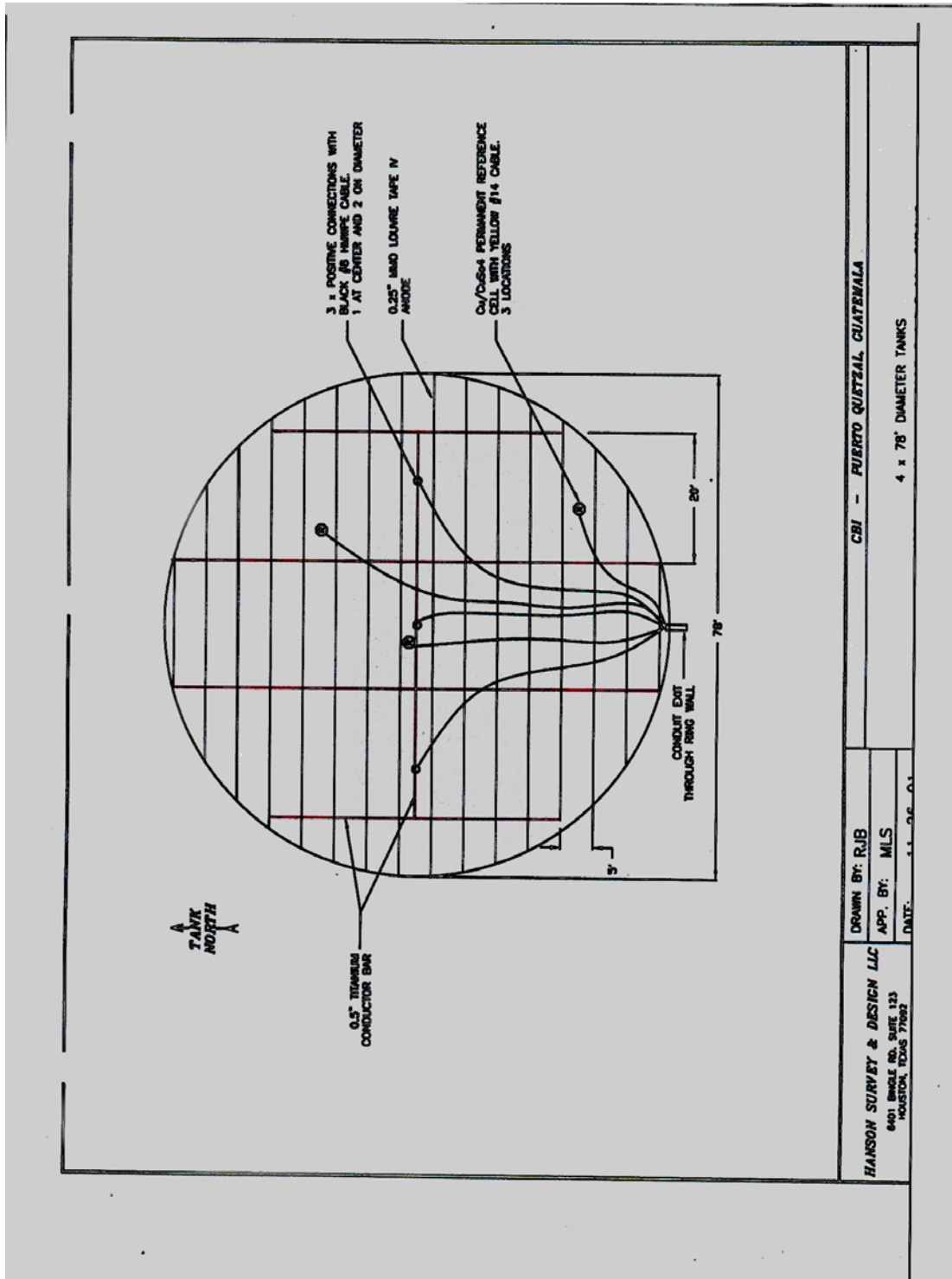
A continuación se presenta los planos del primero de los dos sistemas independientes de protección catódica en el parque de tanques de la planta CARPESA.

Figura 27 Plano del Sistema de Protección Catódica Tanques de 4 X 78 pies de diámetro



fuelle: CB&I Industrial the woodlands, texas, Hanson Survey & Design, pág. 8

Figura 28 Plano del Sistema de Protección Catódica Para cada tanque de 78 pies de diámetro

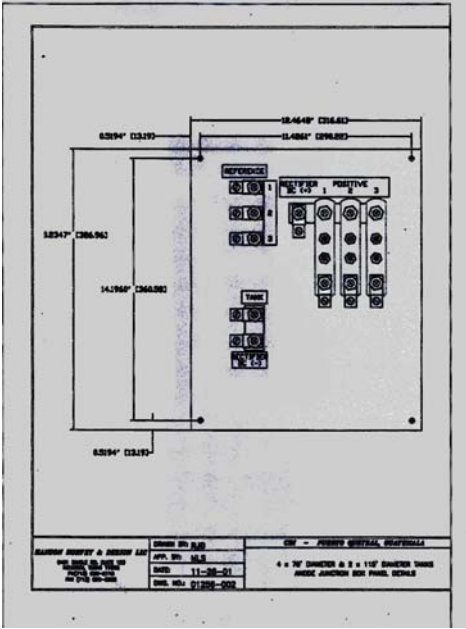


fuelle: CB&I Industrial the woodlands, texas, Hanson Survey & Design, pág. 9

Como muestran las figuras 27 y 28 el diseño para los cuatro tanques de 78 pies de diámetro es tipo malla, cuentan con cables y accesorios para el funcionamiento del sistema. Las cajas de unión para cada tanque así como la configuración en paralelo de las barras de titanio y la cinta anódica, también incluye la distribución de las celdas de referencia de cobre / sulfato de cobre saturado. La separación de los ánodos tipo cinta es de cinco pies y la de las barras conductoras es de 20 pies. El aislamiento de los conductores para los ánodos son del tipo polietileno de alto peso molecular (HMWPE) (*high molecular weight polyethylene*).

En la figura 29 se muestra la configuración de la caja unión donde se hacen las conexiones del sistema, así como sus dimensiones.

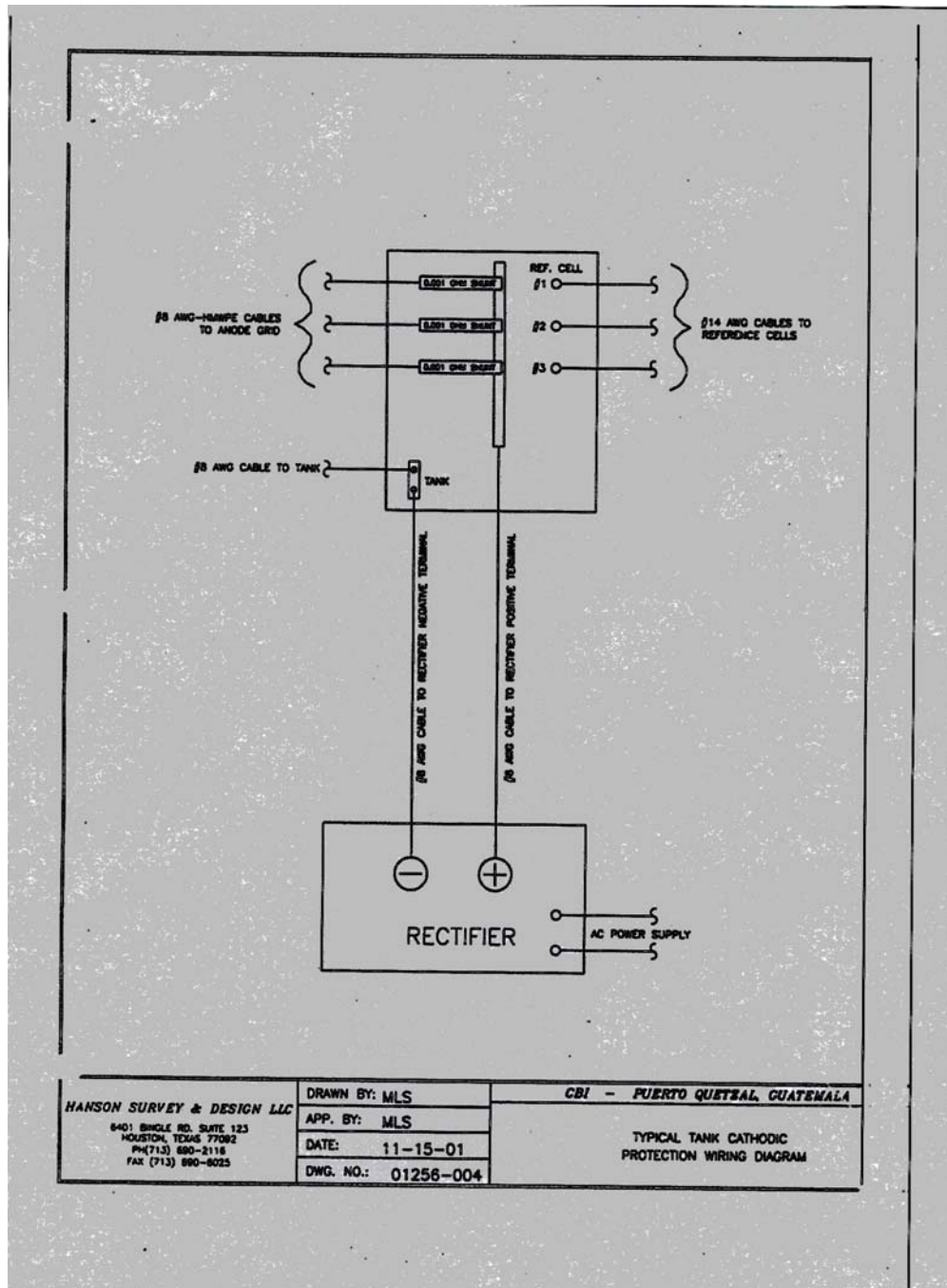
Figura 29 Caja Unión para ánodos



fuente: CB&I Industrial the woodlands, texas, Hanson Survey & Design, pág. 10.

Para tener una idea clara de cómo se comportará el sistema se tiene el diagrama simplificado en la figura 30 del sistema de protección catódica por corriente impresa.

Figura 30 Diagrama simplificado de cableado del sistema



fuelle: CB&I Industrial the woodlands, texas, Hanson Survey & Design, pág. 11.

4.6 Sistema de Protección Catódica para tanques de 115 pies de diámetro.

Las variantes significativas al sistema de tanques de 78 pies, son la capacidad del rectificador, la cantidad de materiales y accesorios, así como la magnitud de la corriente de protección por el volumen de metal en el fondo del tanque.

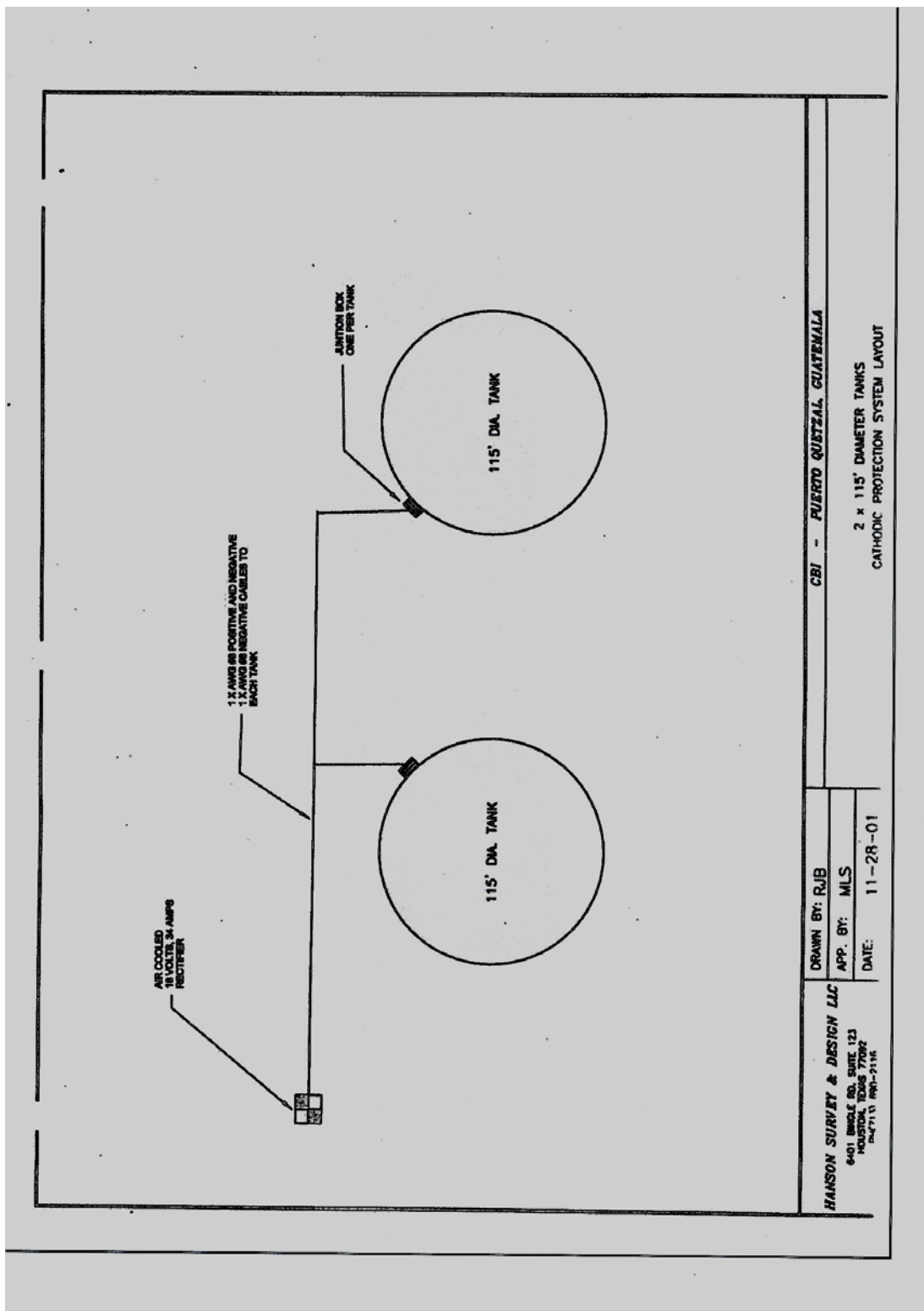
4.7 Planos y Diagramas del sistema de Protección Catódica de tanque de 115 pies de diámetro en planta Carpesa

En las figuras 31, y 32 observamos las especificaciones para el sistema para los tanques más grandes prácticamente son los mismos materiales. En estos planos podemos encontrar la configuración de los ánodos, también como están conectadas las barras conductoras y los cables.

- En la figura 31 configuración del sistema completo
- En la figura 32 configuración de ánodos tipo cinta, de celdas de referencia, puntos de conexión y espaciamiento entre elementos.

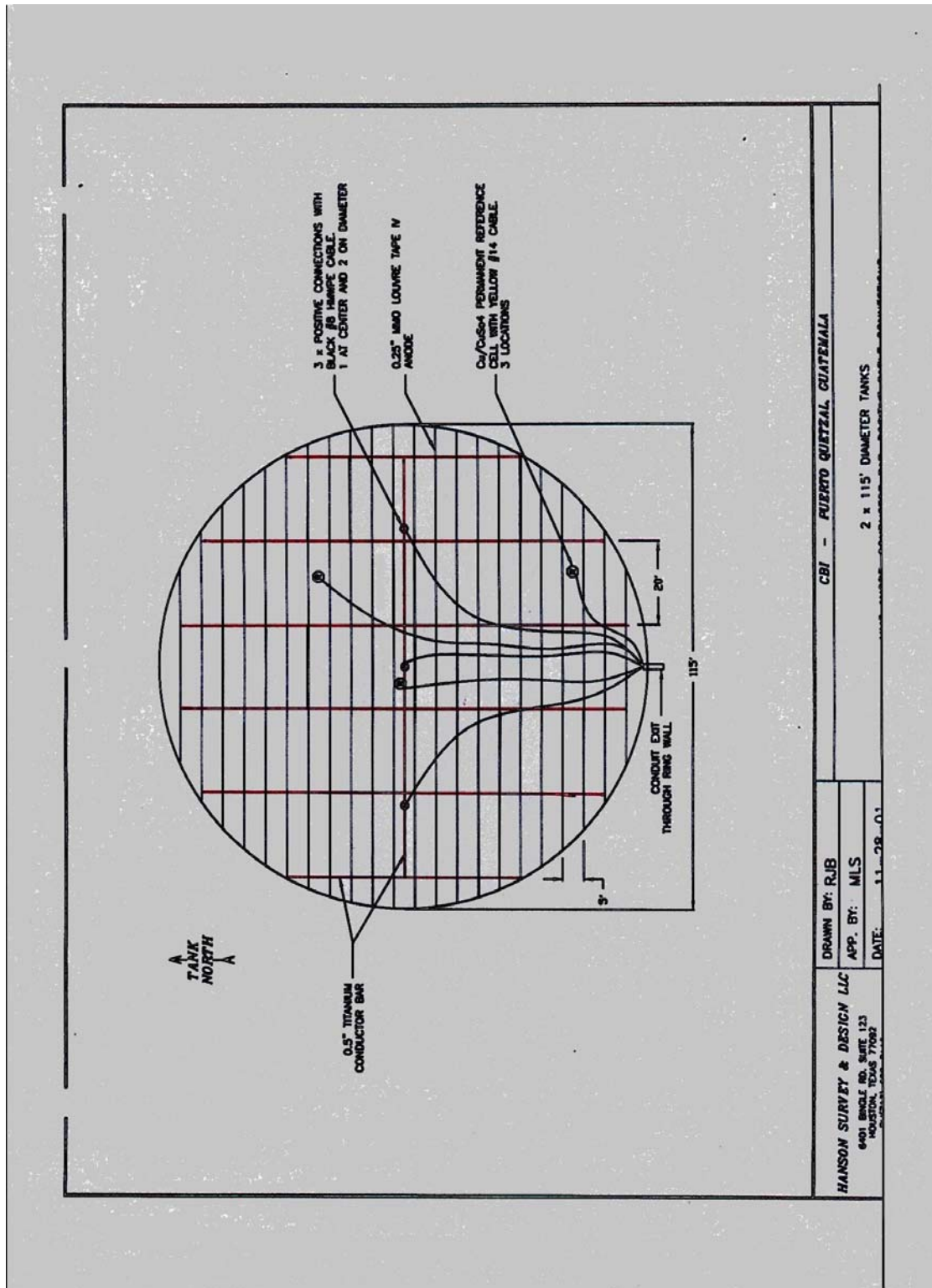
Las conexiones en la caja tipo unión son exactamente iguales a las de la figura 29, y el cableado del sistema es idéntico al de la figura 30.

Figura 31 Configuración del sistema Completo tanques 115 pies



fuelle: CB&I Industrial the woodlands, texas, Hanson Survey & Design, pág. 12.

Figura 32 Configuración del sistema de cada tanque 115 pies

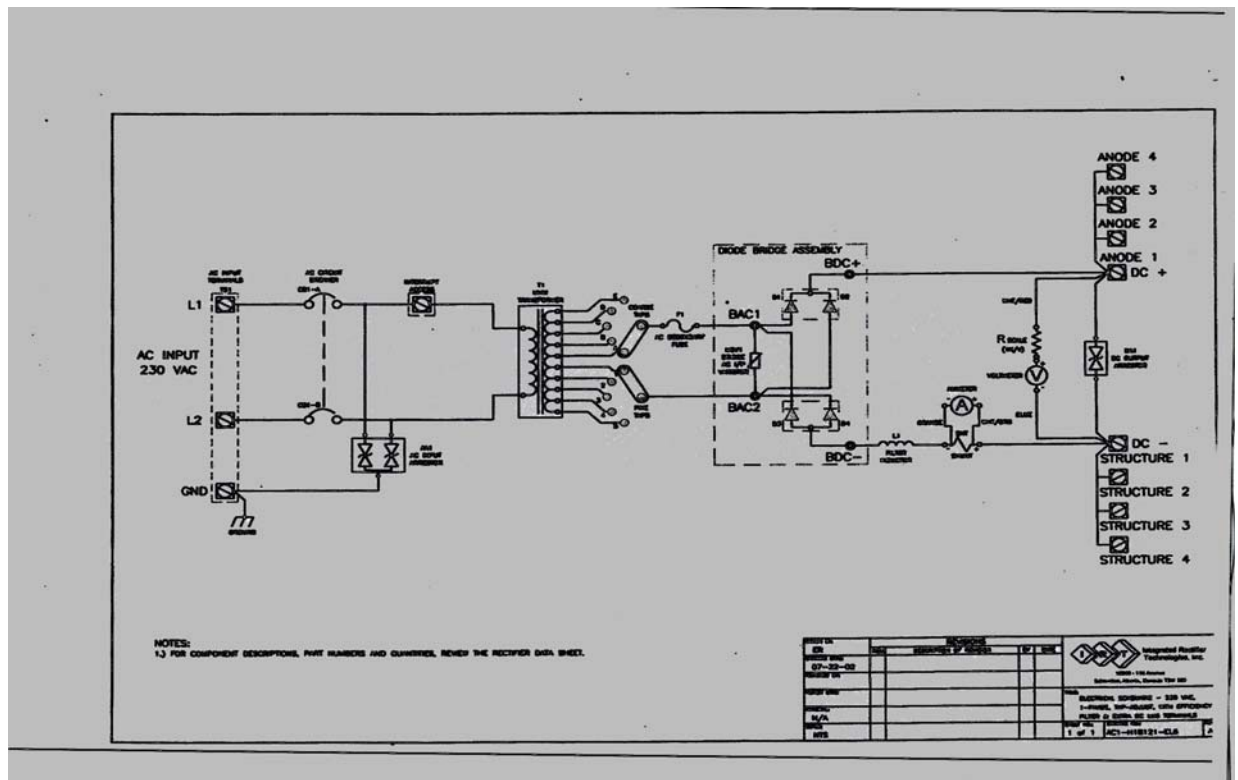


fuentes: CB&I Industrial the woodlands, texas, Hanson Survey & Design, pág. 13.

4.8 Circuito del Rectificador

Para cada uno de los dos rectificadores como los muestra la figura 33, estos se instalaron en los dos sistemas, cuentan con una serie de elementos que posteriormente se describirán. Pero básicamente consta de una entrada de corriente alterna A.C, una fase de rectificación de onda completa, otra de regulación y también la alternativa de cambio de taps en el transformador con monitoreo de corriente de salida por medio de una resistencia calibrada de monitoreo shunt.

Figura 33 Esquema eléctrico de los rectificadores



fuelle: CB&I Industrial the woodlands, texas, Hanson Survey & Design, pág. 14.

4.8.1 Descripción de los componentes del rectificador.

Se hará una breve descripción de los componentes principales del rectificador para cada uno de los sistemas.

- **Supresores de A.C.:** es un dispositivo que protege a los componentes del rectificador de sobrevoltajes que puedan ocurrir desde la entrada de corriente alterna. Este dispositivo está provisto de un circuito by pass para que la corriente resultante de un sobrevoltaje sea rechazada al pasar de un límite de referencia. Además está diseñado para manejar cierto rango de sobrevoltajes.
- **Interruptor termo-magnético:** éste interruptor de A.C. tipo CB1 del tipo de protección magnética completa. Sus tres funciones básicas son como interruptor ON-OFF del sistema, proveer protección contra corto circuito en un menor grado. También protege contra sobrecargas.
- **Transformador T1:** provee aislamiento eléctrico entre la fuente de poder de A.C. y el circuito de protección catódica de D.C., además posee un interruptor de posición para diferentes niveles de voltaje y diferentes taps para ajuste de la salida D.C.
- **Fusible secundario de A.C.:** puede ser del tipo semiconductor o de acción rápida protege contra sobrecargas, cortos circuitos a la salida de D.C. como al puente de diodos.

- **Puente rectificador de diodos:** están hechos de diodos de silicón en una configuración de puente de onda completa. Fueron provistos adecuadamente de disipadores de calor para asegurarse que no excedan los 100 ° C a plena carga.
- **Varistor:** éste dispositivo fue instalado como protección adicional para posibles sobrevoltajes que logran pasar por el supresor de voltajes de A.C.
- **Resistencia calibrada Shunt:** resistencia de monitoreo de corriente del sistema, tipo monoblock con una exactitud del 0.25%. La corriente de D.C. es monitoreada por una conexión a través de un sistema de tornillos calibrados con la resistencia shunt.
- **Supresor de voltaje de D.C.:** éste dispositivo provee protección contra sobrevoltajes de D.C. a través de la salida.

4.9 Pruebas en campo.

Como se describió en el capítulo 3, existen una serie de pruebas y mediciones de potencial, donde se comprobará el funcionamiento correcto y de acuerdo a las normas establecidas para protección catódica.

Los potenciales fueron medidos usando un voltímetro Miller LC-4 portátil, es cual fue diseñado específicamente para protección catódica. Este voltímetro tiene una impedancia de entrada con rangos entre 10 M Ω hasta 200M Ω .

Estos potenciales fueron medidos bajo tres condiciones separadas:

- Antes de cualquier corriente de protección catódica circule por el sistema se midió el potencial entre la base del fondo del tanque y la celda de referencia de cobre / sulfato de cobre saturado.

Posterior a esto fue energizado el rectificador, para cada uno de los sistemas se hicieron mediciones separadas ya que son sistemas independientes entre sí. Y la corriente de salida fue ajustada para proveer la corriente suficiente para proteger las bases metálicas de los fondos de los tanques.

Después de un corto período de operación se midieron los siguientes potenciales.

- Potencial *ON* después de la polarización con la corriente aplicada.
- Potencial *OFF* después de la polarización con la corriente interrumpida.

El criterio utilizado es el utilizado en el capítulo 3 de acuerdo a la norma RP-0193-93 de NACE.

A continuación en las figuras 34 a 37 las mediciones hechas en campo por los ingenieros de hanson & survey. Se adjunta un tanque de cada sistema ya que las mediciones fueron las mismas para todos los tanques.

Figura 34 Hoja de operación del rectificador tanques 1 & 2 115 pies

Hanson

**CARPESA 115' Diameter TANKS 1 & 2
CP Tank Impressed Current System
RECTIFIER OPERATING RECORD**

Rectifier Unit Serial # : 02R-0354
 Rectifier Unit Model : ADASAS 18 34 EL2W
 Location of Rectifier : CARPESA, Guatemala
 Type of Rectifier : Air Cooled
 Type of Anodes : Titanium Ribbon
 Type of Ground bed : CP Tank System
 Rectifier Manufacturer : IRT
 AC Line Input : 230/1/60
 Rated DC Output : 18 Volt / 34 Ampere
 Date Energized : March 2003

RECORD OF READINGS AND INSPECTIONS

Date	Tap Setting		DC Output		Remarks	By
	Coarse	Fine	Volt	Ampere		
03/13/03	A	1	1	0.0		PB
03/13/03	A	2	1	0.0		PB
03/13/03	A	3	1.5	1.0		PB
03/13/03	A	4	2	3.5		PB
03/13/03	A	5	2.5	6.5		PB
03/13/03	B	1	3.5	9.5		PB
03/13/03	B	2	4.5	13.0		PB
03/13/03	B	5	6.5	22.5		PB
03/13/03	C	1	7.5	26.0		PB
03/13/03	C	2	8.5	28.5	OPERATING SETTING	PB

fuelle: CB&I Industrial the woodlands, texas, Hanson Survey & Design, pág. 14.

Figura 35 Medición de Potenciales a la Celda de Referencia

Hanson

**CARPESA 115' Diameter TANK #1
CP Tank Impressed Current System
REFERENCE CELL POTENTIAL MEASUREMENTS**

Company : CARPESA Guatemala
 Job Title : Cathodic Protection of External Bottom Plate of 115 ft Diameter Tank #1
 Job Number : Hanson Survey & Design #01256
 Engineer : Murray Smith
 Date : March 2003

DATA TABLE

DATE	Cell #	Native	ON	OFF	Shift	Remarks
03/13/03	1	-282	-611	-451	-169	Fully protected
03/13/03	2	-010	-302	-111	-101	Fully Protected
03/13/03	3	-122	-1900	-300	-178	Fully Protected
03/13/03						Shunt #1 4.1 ampere
03/13/03						Shunt #2 3.9 ampere
03/13/03						Shunt #3 4.1 ampere

All potential measurements are recorded in millivolt.
 Note:
 Native "Native" structure-to-soil potential measurements prior to energizing system.
 ON "ON" structure-to-soil potential measurements with current applied.
 OFF "Instant OFF" structure-to-soil potential measurements with current interrupted.
 Shift Potential Difference Shift from Native to Instant OFF. Shift required to improve
 Cathodic Protection (M.C.P. RP 0193-93 Section 4.3.1.1) to 100% protection.

Figura 36 Hoja de operación del rectificador tanques 3 a 6, 78 pies

Hanson

**CARPESA 78' Diameter TANKS 3, 4, 5 & 6
CP Tank Impressed Current System
RECTIFIER OPERATING RECORD**

Rectifier Unit Serial # : 02P-0353
 Rectifier Unit Model : ADASAS 12 34 L6W
 Location of Rectifier : CARPESA, Puerto Quetzal Guatemala
 Type of Rectifier : Air Cooled
 Type of Anodes : Titanium Ribbon
 Type of Ground bed : CP Tank System
 Rectifier Manufacturer : IRT
 AC Line Input : 220 volt / 1 phase / 60 Hertz
 Rated DC Output : 12 Volt / 34 Ampere
 Date Energized : March 2003

RECORD OF READINGS AND INSPECTIONS

Date	Tap Setting		DC Output		Remarks	By
	Coarse	Fine	Volt	Ampere		
03/08/03	A	3	0.7	1.0		MS
03/08/03	B	3	3.6	14.0		MS
03/08/03	C	3	6.6	28.0		MS
03/08/03	C	4	7.3	30.0	OPERATING SETTING	MS

fuelle: CB&I Industrial the woodlands, texas, Hanson Survey & Design, pág. 16.

Figura 37 Medición de Potenciales a la Celda de Referencia

Hanson

**CARPESA 78' Diameter TANKS 3, 4, 5 & 6
CP Tank Impressed Current System
RECTIFIER OPERATING RECORD**

Rectifier Unit Serial # : 02P-0353
 Rectifier Unit Model : ADASAS 12 34 L6W
 Location of Rectifier : CARPESA, Puerto Quetzal Guatemala
 Type of Rectifier : Air Cooled
 Type of Anodes : Titanium Ribbon
 Type of Ground bed : CP Tank System
 Rectifier Manufacturer : IRT
 AC Line Input : 220 volt / 1 phase / 60 Hertz
 Rated DC Output : 12 Volt / 34 Ampere
 Date Energized : March 2003

RECORD OF READINGS AND INSPECTIONS

Date	Tap Setting		DC Output		Remarks	By
	Coarse	Fine	Volt	Ampere		
03/08/03	A	3	0.7	1.0		MS
03/08/03	B	3	3.6	14.0		MS
03/08/03	C	3	6.6	28.0		MS
03/08/03	C	4	7.3	30.0	OPERATING SETTING	MS

fuentes: CB&I Industrial the woodlands, texas, Hanson Survey & Design, pág. 17.

4.10 Mantenimiento

Ya que la vida útil del sistema es de 50 años o más, el mantenimiento del mismo es mínimo, se recomienda una inspección cada dos meses para verificar que los valores de corriente y voltaje se mantengan en el rango de protegido, llevando una bitácora de lecturas como historial técnico.

Además una inspección anual por personal calificado a todo el sistema de protección catódica tanto en los rectificadores como en los puntos de conexión de la caja de unión, las celdas de referencia y medir potenciales natural, ON y OFF para el óptimo funcionamiento y aseguramiento del mismo.

CONCLUSIONES

1. La corrosión está presente en casi todos los materiales. Se puede contrarrestar sus efectos, pero no se pueden detener.
2. La protección catódica se puede aplicar a todo tipo de estructuras que estén expuestas a un medio corrosivo.
3. En Guatemala, hay otras aplicaciones donde se podría usar la protección catódica como tanques de almacenamiento de agua, sistemas de bombeo de agua.
4. Los métodos de protección catódica aplicados conjuntamente con un sistema de recubrimiento, brindan una protección muy efectiva que dará protección durante la vida útil del proyecto donde se aplique.
5. En tanques de almacenamiento de hidrocarburos es indispensable el correcto funcionamiento del sistema de protección catódica, ya que una falla podría significar derrames y/o incendios (debido a rupturas del metal por corrosión) arriesgando la seguridad de la planta, ambiente y personas.

RECOMENDACIONES

1. Efectuar inspecciones visuales del sistema mensualmente, chequeando medidores de potencial.
2. Llevar una bitácora de estas inspecciones y mediciones verificando que se encuentran en el rango de protegido de acuerdo a la hoja de prueba para los diferentes tanques.
3. Una inspección anual efectuada por personal calificado para protección catódica, a todo el sistema. Haciendo pruebas en los rectificadores, cajas unión, así como medición de potenciales en celdas de referencia, potencial natural, potencial *ON* y potencial *OFF*.

BIBLIOGRAFÍA

Seminario Inspector de Oleoductos. Ministerio de Energía y Minas de Guatemala. Ing. Jorge H. Goldin S. Celade Petróleos de Venezuela 2002.

Hanson Survey & Design, Protección Catódica para fondos de tanques de almacenamiento "*CATHODIC PROTECTION ON STORAGE TANKS BOTTOMS*" *CARPESA, PUERTO QUETZAL, GUATEMALA, 2003.*

Norma 019-93, Protección Catódica externa para fondos de tanques de almacenamiento práctica recomendada.

NACE Standard Recommended Practice, standard RP 019-93 "External Cathodic Protection of On-Grade Metallic Storage Tank Bottoms

API 651 práctica recomendada Protección catódica para tanques de almacenamiento instalados sobre el terreno 2da edición 1997. "*Cathodic protection of Aboveground Petroleum Storage Tanks*".

Inspección, modificación y reconstrucción de tanques de almacenamiento instalados sobre el terreno. API Standard 653 primera edición enero de 1991. "*Tank inspection, repair, alteration, and reconstruction API Standard 653 first edition, January 1991.*"

Sistemas de Protección Catódica

Especificación P 2.0413.01 de PEMEX Exploración y Producción.

ANEXOS

1. RESISTIVIDAD DE SUELOS, MÉTODO WENNER 4 BARRAS.

Equipos: Megger Nilsson, Metrawatt o similar

Accesorios: 4 barras, 4 cables, 1 martillo o masa, 1 cinta métrica.

1. Se revisa el terreno seleccionado. No debe haber tuberías, cables ni estructuras cercanas. No debe haber torres de alta tensión en un radio de 200 metros.
2. Se instalan las barras en una línea recta, con una separación entre cada dos barras consecutivas de 1 metro. Las barras se clavan hasta que queden firmes en el terreno.
3. Se conectan los cables, en un extremo de la barra y el otro al instrumento. Cuidado con los bornes de conexión: hay uno específico para cada barra. Siempre que sea posible utilice cables de diferentes colores para evitar errores de conexión.
4. Se efectúa la medición siguiendo el procedimiento indicado en el manual respectivo.
5. Se repite el procedimiento separando las barras dos metros entre sí.
6. Se repite el procedimiento separando las barras tres metros entre sí.
7. Se repite el procedimiento separando las barras cuatro metros entre sí.
8. Se toma nota de los valores de resistencia indicados por el instrumento.
9. Se calcula la resistividad utilizando la fórmula siguiente:

$$R = 2 * R_o * \pi * L$$

Donde: R= resistividad en ohms-cm R_o = Resistencia en ohms

π = constante y L = distancia entre barras en cm.

Interpretación de resultados:

Rango de Resistencia	Clasificación
0 – 1000 Ω -cm	Altamente Corrosivos
1001 – 5000 Ω -cm	Corrosivos
5001 – 10000 Ω -cm	Poco Corrosivos
> 10001 Ω -cm	Muy poco corrosivos

2. MEDICIÓN DE POTENCIAL

Equipos Tester o Multímetro, resistencia mínima de 10 Mega Ω usado en la escala de Milivoltios.

Accesorios. Electrodo de referencia, cable rojo, cable negro, cepillo de alambre, lima, navaja.

Procedimiento:

1. Se llena el electrodo de referencia con cristales azules de sulfato de cobre hasta una altura aproximada de 1/3 del total. Se completa con agua, sin llenar totalmente y se agita.
2. Se ubica el punto donde se apoyará el electrodo de referencia y el borne negativo con el cable negro a la estructura. Asegúrese de limpiar bien la superficie metálica para hacer buen contacto; para ello quite la pintura y cepille bien el metal hasta que brille.
3. Se enciende el tester o multímetro y se coloca en la escala de milivoltios. (mV).
4. Se anota el valor indicado.

5. Al terminar su sesión de mediciones vacíe la solución de sulfato de cobre del electrodo y sumerja la punta cerámica en agua. Déjela sumergida hasta su siguiente sesión de mediciones.

Interpretación de Resultados

POTENCIAL	ESTRUCTURA
Mayor o igual a -850 mV	Protegida
Menor que -850 mV	No protegida

3. SERIE DE POTENCIALES NORMALES Ó ESTÁNDAR

ELEMENTO QUÍMICO	SÍMBOLO	POTENCIAL VOLTS
POTASIO	K	-2,922
CALCIO	Ca	-2,870
SODIO	Na	-2,712
MAGNESIO	Mg	-2,340
BERILIO	Be	-1,700
ALUMINIO	Al	-1,670
MANGANESO	Mn	-1,050
CINC	Zn	-0,762
CROMO	Cr	-0,710
GALIO	Ga	-0,520
HIERRO	Fe	-0,440
CADMIO	Cd	-0,402

INDIO	In	-0,340
TALIO	Ti	-0,336
COBALTO	Co	-0,277
NÍQUEL	Ni	-0,250
ESTAÑO	Sn	-0,136
PLOMO	Pb	-0,126
HIDRÓGENO	H ₂	0,000
COBRE	Cu ++	0,345
COBRE	Cu +	0,522
MERCURIO	Hg	0,799
PLATA	Ag	0,800
PALADIO	Pd	0,830
MERCURIO	Hg ++	0,854
PLATINO	Pt	1,200
ORO	Au +++	1,420
ORO	Au +	1680

4. SERIE GALVÁNICA

EXTREMO ANÓDICO, ACTIVO, MÁS CORROSIVO

Magnesio y sus Aleaciones

Cinc

Aluminio 1100 (2S)

Cadmio

Aluminio 2017 (17ST)

Acero y Hierro

Fundición

Hierro-cromo (activo)

Acero inoxidable 304 (activo)

Acero inoxidable 316 (activo)

Plomo-estaño soldables

Plomo

Estaño

Níquel (activo)

Inconel (activo)

Latón

Cobre

Bronces

Aleaciones cobre-níquel

Monel

Plata soldable

Níquel (Pasivo)

Inconel (pasivo)

Cromo-hierro (pasivo)

Acero inoxidable 304 (pasivo)

Acero inoxidable 316 (pasivo)

Plata

Grafito

Oro

Platino

EXTREMO PROTEGIDO, CATÓDICO, MÁS RESISTENTE

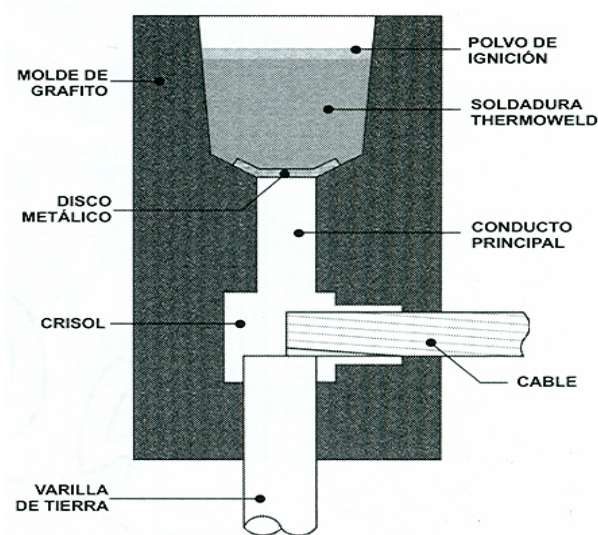
Fuente: Ing. Jorge H. Goldin, Inspector de Oleoductos, apéndice A, 2002.

4. Soldadura ThermOweld.

El proceso de conexión eléctrica ThermOweld[®] es un método simple y eficiente de soldar cobre a cobre y cobre a acero. El proceso thermOweld[®], no requiere de fuentes de alta temperatura de reacción del polvo de óxido de cobre y aluminio. La reacción se lleva a cabo en un molde semi-permanente de grafito, que tiene una vida útil de 50 disparos o más si se utiliza y cuida adecuadamente.

La reacción thermOweld[®] dura unos cuantos segundos, por lo tanto la cantidad de calor (calorías o BTU) que se aplica a los conductores o a las superficies metálicas, es mucho menor a la empleada en otros procesos de soldadura. Este es un factor importante cuando se está soldando cables desnudos de cobre a tuberías de pared delgada.

A4.1 Corte transversal de un molde tipo CR-1



Corte transversal de un molde Tipo CR-1

Fuente: thermOweld[®] Catálogo de Conexiones eléctricas 2004.

4.1 Procedimiento.

A4.2 Procedimiento de soldadura

COMO REALIZAR UNA CONEXIÓN THERMOWELD®



1

Coloque los conductores limpios en el molde después de haberse cerciorado que el molde se encuentra seco mediante precalentamiento o bien después de haber realizado una soldadura de prueba.



2

Coloque el disco metálico en el fondo de la cavidad del molde.



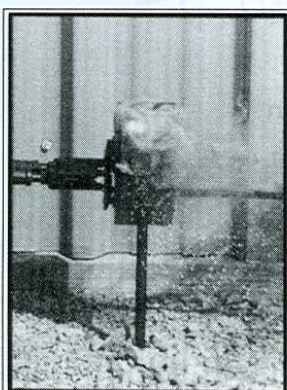
3

Vacíe la soldadura en polvo dentro de la cavidad, espolvoreando un poco de polvo de ignición en la orilla del molde.



4

Cierre la tapa e inicie la reacción con el chispero por un lado del molde, arrojando chispas hacia el polvo de ignición.

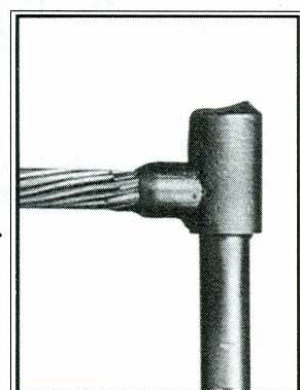


5

La reacción se lleva a cabo.

6

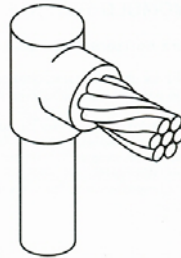
Retire y limpie el molde antes de realizar la siguiente conexión.



Thermomold tipo CR-1: éste molde es una soldadura horizontal de cable terminal a varilla de aterrizaje. El tipo CR-1 es utilizado para conexiones horizontales cobre terminal en la parte superior de una varilla de cable vertical.

El tamaño de los conductores de cobre sólido o concéntrico trenzado varia en calibres # 6 hasta 1000 MCM. El tamaño de la varilla de 1/2" hasta 1".

A4.4 Cable a Varilla de Aterrizaje ThermOweld®



Fuente: thermOweld® Catálogo de Conexiones eléctricas 2004.

Tabla A4.2 Thermomoldes tipo CR-1

THERMOMOLDES TIPO CR-1															
TAMAÑO DE VARILLA ◇	CALIBRE DEL CABLE ◆	MOLDE ESTANDAR ◇				MOLDE DE USO RUDO (Agregar "-H" al número de molde)		TAMAÑO DE VARILLA ◇	CALIBRE DEL CABLE ◆	MOLDE ESTANDAR ◇				MOLDE DE USO RUDO (Agregar "-H" al número de molde)	
		NO. DE MOLDE	CLAVE PRECIO	CARGA		CLAVE PRECIO	CARGA			NO. DE MOLDE	CLAVE PRECIO	CARGA	CLAVE PRECIO	CARGA	
1/2" *	#6	M-8402	18 †	25	4	65	3/4"	#6	M-8422	18 †	32	4	65		
	#4	M-8403	18 †	25	4	90		#4	M-8426	19 †	45	4	115		
	#2	M-495	4	65	4	90		#2	M-5781	4	90	4	115		
	#1	M-496	4	65	4	90		#1	M-514	4	90	4	115		
	1/0	M-497	4	90	4	115		1/0	M-515	4	90	4	150		
	2/0	M-498	4	90	4	115		2/0	M-516	4	90	4	150		
	3/0	M-499	4	90	4	150		3/0	M-517	4	90	4	150		
	4/0	M-500	4	90	4	150		4/0	M-518	4	90	4	150		
	250 MCM	M-501	4	90	4	150		250 MCM	M-519	4	90	4	150		
	300 MCM	M-502	4	90	4	150		300 MCM	M-520	4	115	4	200		
								350 MCM	M-521	4	115	4	200		
								500 MCM	M-523	4	150	4	250		
5/8"	#6	M-8414	18 †	32	4	65	1"	750 MCM	M-524	4	250	5	2-200		
	#4	M-8415	18 †	32	4	90		1/0	M-525	4	150	4	200		
	#2	M-503	4	65	4	90		2/0	M-526	4	150	4	200		
	#1	M-504	4	65	4	90		3/0	M-527	4	150	4	250		
	1/0	M-505	4	90	4	115		4/0	M-528	4	150	4	250		
	2/0	M-506	4	90	4	115		250 MCM	M-529	4	150	4	250		
	3/0	M-507	4	90	4	150		300 MCM	M-530	4	200	5	2-150		
	4/0	M-508	4	90	4	150		350 MCM	M-531	4	200	5	2-150		
	250 MCM	M-509	4	90	4	150		500 MCM	M-533	4	200	5	2-150		
	300 MCM	M-510	4	115	4	200		750 MCM	M-534	4	250	5	2-200		
	350 MCM	M-511	4	115	4	200		1000 MCM	M-535	5	2-150	5	500		
	500 MCM	M-513	4	150	4	250									

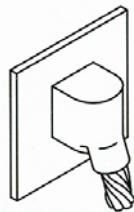
- ◆ Los moldes listados consideran el uso de cable concéntrico trenzado. Adicione el sufijo "S" al número del molde para conexiones de conductores sólidos.
- ◇ Los moldes listados consideran el uso de varillas cobrizadas de aterrizaje. Para soldaduras en varillas para aterrizaje fabricadas en acero, acero inoxidable o acero galvanizado, adicione el sufijo "N" al número de molde, por ejemplo el molde M-508-N se utiliza para soldar cable concéntrico trenzado calibre 4/0 a una varilla de aterrizaje fabricada en acero con 5/8" de diámetro.
- * Contacte a su representante ThermOweld o bien a la fábrica para soldadura en varillas de aterrizaje roscadas
- † Se suministra con manijas incluidas. Si no se requiere de manijas, especifique el número de molde adicionando el sufijo "G".

Fuente: thermOweld® Catálogo de Conexiones eléctricas 2004.

Thermomold tipo CS-3: Soldadura de cable angular a superficie de acero vertical. El tipo CS-3 es utilizado para conexión terminal de cable de cobre con ángulo de 45° a una superficie vertical de acero.

El tamaño de los conductores de cobre sólido o concéntrico varía de calibres #6 hasta 1000 MCM.

A4.5 Cable a superficie de Acero



THERMOMOLD Tipo CS-3

Fuente: thermOweld® Catálogo de Conexiones eléctricas 2004.

Tabla A4.3 Thermomoldes tipo CS-3

THERMOMOLDES TIPO CS-3					
CALIBRE DEL CABLE ♦	MOLDE ESTANDAR			MOLDE DE USO RUDO (Agregar "-H" al número de molde)	
	NO. DE MOLDE	CLAVE PRECIO	CARGA	CLAVE PRECIO	CARGA
#6	M-585	4	45	4	65
#4	M-586	4	45	4	65
#3	M-587	4	45	4	90
#2	M-588	4	45	4	90
#1	M-589	4	65	4	115
1/0	M-590	4	90	4	150
2/0	M-591	4	90	4	150
3/0	M-592	4	115	4	200
4/0	M-593	4	115	4	200
250 MCM	M-594	4	115	4	200
300 MCM	M-595	4	150	4	250
350 MCM	M-596	4	200	4	250
500 MCM	M-598	4	200	5	2-150
750 MCM	M-599	5	2-150	5	500
1000 MCM	M-600	5	2-200	5	3-200

♦ Los moldes listados consideran el uso de cable concéntrico trenzado. Adicione el sufijo "S" al número del molde para conexiones de conductores sólidos.

Fuente: thermOweld® Catálogo de Conexiones eléctricas 2004.