



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

---

**PLANEACION Y DISEÑO DE UN CAMPO DE  
PRÁCTICAS PARA PROTECCIÓN CATÓDICA**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

PRESENTA

**EMERSON OSVALDO NUÑEZ MORAN**



**MÉXICO, DF.**

**2007**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** JUAN GENESCÁ LLONGUERAS

**VOCAL:** FRANCISCO JAVIER RODRÍGUEZ GÓMEZ

**SECRETARIO:** CARLOS RODRIGUEZ RIVERA

**1er. SUPLENTE:** CARLOS ROSENDO ARGANIS JUÁREZ

**2o. SUPLENTE:** PEDRO ROQUERO TEJEDA

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA**

LABORATORIO DE CORROSIÓN DE LA FACULTAD DE QUÍMICA.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DR. JUAN GENESCÁ LLONGUERAS

\_\_\_\_\_

EMERSON OSVALDO NÚÑEZ MORÁN

\_\_\_\_\_

Esta tesis la quiero dedicar a las siguientes personas como una expresión de mi gratitud y aprecio:

A mis padres, **Azucena y Andrés**, por el apoyo incondicional mostrado en todo momento y por su interés constante en que me siga superando. Gracias de todo corazón.

A mi esposa **Karla**, porque estuvo a mi lado en todos los momentos cruciales de ésta tesis y de mi vida universitaria. Has sido la fuerza que me sigue y seguirá impulsando. Te amo.

A **Pamela**, mi hermana, porque la pasamos tan bien aunque peleemos mucho.

A mis amigos y compañeros de carrera: **Manuel, Pepe, Charmín, Daniel, Israel, Ajax, Coach, Lucero, Laura, Yanet, Benjamín, Leo, César, Héctor, Oaxaco, Saúl** y a toda la bola de borrachos que nos juntábamos cada vez que se podía para celebrar lo que fuera. Los voy a extrañar a todos.

A todos y cada uno de **mis profesores** de asignatura. Gracias por compartir su conocimiento conmigo y darme una preparación de excelencia.

Y finalmente, pero con la mayor importancia, a **Dios**. Porque me pusiste los obstáculos suficientes para aprender, mas no para detenerme. Gracias Padre.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 Corrosión y electroquímica	1
1.1.1 Corrosión.	1
1.2 Tipos de corrosión	2
1.2.1 Corrosión uniforme	2
1.2.2 Corrosión localizada	2
1.3 Termodinámica de los procesos de corrosión.	3
1.3.1 Celdas electroquímicas	3
1.3.1.1 Celdas galvánicas	3
1.3.1.2 Celdas electrolíticas	5
1.3.1.3 Comparación entre celdas electroquímicas	5
1.3.2 Ecuación de Nernst	5
1.3.3 Diagramas de Pourbaix	6
1.3.4 Electroodos de referencia	7
1.4 Cinética electroquímica.	8
1.4.1 Corrosión controlada por procesos de activación	8
1.5 Técnicas electroquímicas para el estudio y control de la corrosión	10
1.5.1 Resistividad de suelos	10
1.5.2 Medición de potenciales	11
1.5.3 Mapeo a intervalo cerrado	12
1.5.4 Determinación de la composición química	15
1.5.5 Determinación del requerimiento de corriente del sistema	16
1.6 Control de la corrosión	17
1.6.1 Protección Catódica	17
1.6.1.1 Criterios de NACE para sistemas de protección catódica	18
1.6.2 Recubrimientos	19
1.6.3 Inhibidores	20
1.6.3.1 Clasificación de los inhibidores de corrosión	20
1.7 Sistemas de protección catódica	21
1.7.1 Tipos de sistemas de protección catódica	21
1.7.1.1 Protección catódica con ánodos de sacrificio	21
1.7.1.2 Corriente impresa	21
<b>2. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>22</b>
<b>3. OBJETIVOS</b>	<b>24</b>
<b>4. METODOLOGÍA DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA</b>	<b>25</b>
4.1 Consideraciones previas al diseño	25
4.2 Ensayos de campo	26
4.2.1 Exploración de la ruta de construcción para una tubería nueva	26
4.2.2 Ensayos para una tubería sin protección catódica	26
4.2.3 Ensayos para una tubería con protección catódica	27
4.3 Consideraciones para el diseño	27
4.4 Diseño de la cama anódica	28
4.4.1 Ubicación y diseño de la cama de ánodos	28
4.4.1.1 Ubicación de la cama de ánodos	28
4.4.1.2 Diseño de la cama de ánodos	29
4.4.1.2.1 Camas anódicas de corriente impresa	29

4.4.1.2.2 Camas anódicas de ánodos galvánicos	34
4.4.2 Selección de los ánodos	38
4.4.2.1 Selección de ánodos galvánicos	38
4.4.2.2 Selección de ánodos para corriente impresa	40
4.4.2.2.1 Ánodos de grafito	41
4.4.2.2.2 Ánodos de hierro fundido al alto silicio	41
4.4.2.2.3 Ánodos de mezcla de óxidos metálicos	42
4.4.2.2.4 Ánodos de platino y niobio platinado	42
4.4.3 Cálculo de la vida útil de los ánodos	44
4.5 Detalles de la instalación	45
4.5.1 Sistemas de corriente impresa	45
4.5.1.1 Especificaciones de un rectificador de corriente	46
4.5.1.2 Eficiencia del rectificador	47
4.5.1.3 Detalles de la instalación de un rectificador	47
4.5.2 Sistemas de ánodos galvánicos	48
4.6 Guías de instalación	51
4.6.1 Tuberías con un recubrimiento	52
4.6.2 Instalación de estaciones de monitoreo	52
4.6.3 Instalación de un sistema de protección catódica	54
<b>5. CASO ESPECÍFICO: EDIFICIO “D”. FACULTAD DE QUÍMICA</b>	<b>56</b>
5.1 Consideraciones previas al diseño	56
5.1.1 Localización	56
5.1.2 Componentes del sistema	57
5.1.2.1 Tuberías de acero	57
5.1.2.2 Tanques de almacenamiento	57
5.1.2.3 Estructuras foráneas	57
5.1.2.4 Posibles fuentes de corrientes de interferencia	57
5.2 Ensayos previos al diseño	58
5.2.1 Resistividad del suelo	58
5.2.2 Determinación de la corriente de protección	60
5.2.3 Análisis químicos del suelo	60
5.3 Consideraciones para el diseño	60
5.3.1 Diseño de las camas anódicas	61
5.3.1.1 Cama de ánodos de grafito	61
5.3.1.2 Cama de ánodos galvánicos	63
5.3.1.3 Tira de Zinc	66
5.4 Detalles de la instalación	67
5.4.1 Sistema de protección con corriente impresa	67
5.4.1.1 Rectificador de corriente	67
5.4.1.2 Cama de ánodos de grafito	68
5.4.2 Sistema de protección con ánodos de Zinc	68
5.4.3 Instalación de las tuberías	68
5.4.4 Estaciones de monitoreo	68
5.4.5 Cajas de conexiones	69
5.5 Diagrama de diseño	69
<b>6. MEDICIONES Y PRUEBAS REALIZABLES EN EL LABORATORIO DE LA FQ</b>	<b>71</b>
6.1 Resistividad de suelos	71
6.2 Medición de potencial tubería/suelo	71
6.3 Determinación de la corriente de protección	72
6.4 Determinación de la resistencia de un recubrimiento	72

6.5 Evaluación de los criterios de protección catódica	73
6.6 Medición de potenciales ON/OFF	73
6.7 Mapeo a intervalo cerrado	73
6.8 Simulación y detección de interferencias	74
6.9 Aplicación de una corriente impresa de protección catódica	74
6.10 Medición de corriente en un sistema de ánodos galvánicos	74
6.11 Cálculo de la vida útil de un sistema de ánodos galvánicos	75
6.12 Empleo de cupones para el monitoreo de la corrosión	75
6.13 Adquisición y almacenamiento digital de datos	75
6.14 Monitoreo remoto de la velocidad de corrosión	75
6.15 Experimentación con nuevas aleaciones para ánodos galvánicos	76
6.16 Validación de modelos matemáticos para sistemas de protección catódica	76
<b>7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>77</b>
7.1 Resistividad del suelo	77
7.2 Cantidad de ánodos y tiempo aproximado de vida	77
7.3 Calidad del campo	78
7.4 Patrocinadores propuestos para reducir costos	78
7.5 Ventajas para los estudiantes, la facultad y el laboratorio de corrosión	78
<b>8. CONCLUSIONES</b>	<b>80</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>81</b>

## GLOSARIO

**ASTM (American society for testing and materials):** Organismo americano dedicado a establecer normas técnicas para los materiales, productos sistemas y servicios.

**AWG (American wire gauge):** Es la nomenclatura americana para describir el calibre o blindaje de un cable.

**Backfill:** Relleno activador. Es una mezcla de un químico de baja resistividad que propicia que la superficie de un ánodo no se pasive y que el mismo se consuma uniformemente.

**Casing:** Encamisado. Es una barrera física que protege a una tubería cuando ésta se encuentra expuesta a esfuerzos mecánicos, como pueden ser estar debajo de una vía de ferrocarril o de una autopista.

**CIS (Close interval survey):** Mapeo a intervalo cerrado. Es una técnica aplicada en el monitoreo de sistemas de protección catódica con corriente impresa.

**CSE (Copper sulfate electrode):** Electrodo de Cobre-Sulfato de cobre. Es el electrodo de referencia de mayor uso en la medición de potenciales en suelos.

**ECDA (External corrosion direct assessment):** Es una técnica utilizada en la evaluación de la corrosión de tuberías enterradas, la cual permite tener una idea del estado de la estructura sin necesidad de realizar una excavación.

**GPS (Global positioning system):** Sistema de posicionamiento global. Es un sistema en el que un equipo de recepción satelital, triangula la señal de tres o más satélites para obtener coordenadas cartesianas de ubicación en 3 dimensiones, latitud, longitud y altura.

**NACE (National Association of Corrosion Engineers):** Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión. Entidad americana encargada de proteger el ambiente y reducir el impacto económico de la corrosión a través de la ciencia y la ingeniería.

**OFF potential:** Potencial de una tubería con respecto al suelo cuando el rectificador de corriente se encuentra apagado.

**ON potential:** Potencial de una tubería con respecto al suelo cuando el rectificador de corriente se encuentra encendido.



## RESUMEN

Se describió detalladamente la metodología para el diseño de un sistema de protección catódica, en sus dos variantes: ánodos galvánicos y corriente impresa. Se propuso un campo de prácticas de protección catódica a instalarse en la Facultad de Química de la UNAM. Para el diseño del sistemas de protección se tomaron en cuenta todos los parámetros necesarios como son: la resistividad del suelo; la corriente de protección necesaria para obtener una buena protección; la resistencia de la tubería con el suelo, o en su caso del recubrimiento; la resistencia de la cama anódica; la resistencia de los cables de conexiones; el espaciado entre lo ánodos y la vida útil de los ánodos entre otros.

Para finalizar el diseño, se procede a detallar la instalación de un sistema de protección catódica. Entre estos detalles se encuentran la instalación del rectificador de corriente, la instalación de estaciones de monitoreo, el manejo de tuberías recubiertas, el cuidado necesario con el cableado en la cama anódica, la instalación de los ánodos de corriente impresa y galvánicos.

Una vez terminado el diseño, se proponen las técnicas para el monitoreo y control de la corrosión que se pueden realizar en dicho campo. Algunas de estas técnicas son: medición de resistividad de suelos, medición de potenciales, evaluación de criterios de protección catódica, mapeo a intervalo cerrado, medición de la corriente en un sistema de ánodos galvánicos, entre otros.

## ABSTRACT

The method for the design of a cathodic protection system by galvanic anodes and by impressed current is described in this work. A cathodic protection practice field design has been proposed for installation at the School of Chemistry, at UNAM. For this design, all the proper considerations were acquainted. Among these considerations is the soil resistivity, the minimum protection current, the pipe to earth resistance, or the coating resistance, if any, the ground bed resistance, the resistance of the wires, the anode spacing and the anode desired life.

To complete the design, the installation details for a cathodic protection system are detailed. Within these details are the rectifier installation, the test stations installation, the proper handling of coated pipes, the proper care of the wires in the anode ground bed, and the installation of the galvanic and impressed current anodes.

Once the design process is over, proper techniques for corrosion monitoring and control are proposed for this specific field. Some of these techniques are: soil resistivity measurements, potential measurements, evaluation of cathodic protection criteria, close interval survey, current measurements in a galvanic anodes installation, among others.

# 1. INTRODUCCIÓN

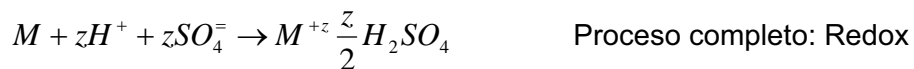
## 1.1 Corrosión y electroquímica

### 1.1.1 Corrosión.

Se entiende por corrosión la degradación o daño superficial de un material o metal al entrar en contacto con un medio agresivo. La corrosión es un proceso de oxidación y reducción electroquímico, en el cual el metal transfiere electrones al ambiente y sufre un cambio de valencia 0 a un valor positivo  $z$ . Dichos ambientes pueden ser un líquido, un gas, o una mezcla entre sólido y líquido y son llamados electrolitos, debido a que cada uno tiene una conductividad específica para permitir el transporte de electrones.

Un electrolito es una sustancia que contiene iones cargados positiva y negativamente, llamados cationes y aniones, respectivamente. Un ión es un átomo que ha ganado o perdido electrones en su capa externa y por lo tanto lleva con él una carga eléctrica. Debido a que el proceso de la corrosión es de naturaleza electroquímica, conlleva la presencia de una corriente, y es necesario que se lleven a cabo dos reacciones: una anódica y una catódica.

Las reacciones anódicas y catódicas que se presentan en los procesos de corrosión se ejemplifican a continuación, en el ejemplo se observan las reacciones de oxidación, reducción y el proceso completo para un metal  $M$  inmerso en una solución de ácido sulfúrico  $H_2SO_4$ .



Donde  $M$  es el metal inmerso en la solución,  $M^{+z}$  es el catión del metal,  $H^{+}$  es el catión del Hidrógeno,  $SO_4^{-}$  es el anión sulfato y  $z$  es el estado de oxidación del metal. **[1]**

## **1.2 Tipos de corrosión**

Organizar los tipos de corrosión presenta como ventaja que los procesos de corrosión con mecanismos similares pueden ser considerados en la misma categoría. Esta forma de categorizar los procesos de corrosión ha existido durante varios años, grosso modo, los procesos se dividen en dos categorías: Corrosión uniforme, la cual no es influenciada por ningún otro proceso; y corrosión localizada, la cual es influenciada por un proceso externo como esfuerzos mecánicos o erosión.

### **1.2.1 Corrosión uniforme**

Es el tipo de corrosión en el cual la totalidad de la superficie de un metal se deteriora a la misma velocidad, en estos procesos se presentan varios fenómenos que se encuentran dentro del campo de la ciencia e ingeniería de corrosión. La mayoría de esos fenómenos tienen que ver con corrosión acuosa o seca, aunque existe también en los materiales que se utilizan en ambientes de sales fundidas y metales líquidos. La corrosión seca es comúnmente asociada con operaciones a alta temperatura. La corrosión atmosférica no es considerada como corrosión seca, ya que la reacción electroquímica se da en una delgada capa de agua en la superficie del metal. La corrosión galvánica y por corrientes de interferencia no es específica de un ambiente, sino más bien pueden ocurrir en cualquiera de los ambientes mencionados con anterioridad.

### **1.2.2 Corrosión localizada**

Es descrita como la corrosión que se da en locaciones específicas de un metal, mientras esto es cierto, y es lo que le da su nombre, es causada por las condiciones localizadas que se presentan en el metal. Así que, la propagación de una picadura, el ataque agresivo en la junta de dos metales y el característico ataque filiforme en las estructuras con recubrimientos orgánicos resultan de diferencias en la microestructura de la aleación y debido a las condiciones localizadas del ambiente, las cuales son diferentes del seno del ambiente. [2]

### **1.3 Termodinámica de los procesos de corrosión.**

#### **1.3.1 Celdas electroquímicas**

Primero que nada, la corrosión es un proceso electroquímico en el que se dan interacciones que tienen como resultado la disolución del metal. Así que, para entender la teoría de la corrosión, primero debemos entender los eventos electroquímicos en un sistema metal-electrolito. Lo anterior nos dice que para poder clasificar el tipo de celda electroquímica, debemos saber cual es la fuerza motriz de los eventos electroquímicos que se están llevando a cabo.

De manera general, las celdas electroquímicas cuentan con cuatro componentes básicos llamados:

- 1 El electrolito**, el cual es un conductor eléctrico en solución, o suelo húmedo.
- 2 El ánodo**, es un metal en contacto con el electrolito sobre el cual se dan las reacciones anódicas.
- 3 El cátodo**, es un metal en contacto con el electrolito sobre el cual se dan las reacciones catódicas.
- 4 Una fuente de poder**, la cual está conectada al ánodo y al cátodo, proveyendo el potencial necesario para las reacciones electroquímicas de reducción (electrólisis), o corriente sobre el cátodo para protegerlo de la corrosión.

De manera adicional, un sistema electroquímico puede ser clasificado como celdas galvánicas ó celdas electrolíticas, como se describe a continuación.

##### **1.3.1.1 Celdas galvánicas**

Es una celda que consta de dos metales diferentes, uno actuando como ánodo y otro como cátodo. En estas celdas, se produce energía eléctrica que se obtiene de la energía química almacenada en el ánodo de la siguiente manera: la corriente fluye del cátodo al ánodo a través del circuito eléctrico y se produce energía eléctrica. La reacción redox se da espontáneamente en éstas celdas sin necesidad de una corriente externa.

Para presentar este tipo de celdas de una manera más clara, se muestra en la tabla 1 la serie electromotriz, la cual indica cuales metales tienen un potencial estándar más noble (positivo) o más activo (negativo). Cuando dos de éstos metales forman una celda galvánica, el metal más activo hará las veces de ánodo, mientras que el metal más noble actuará como cátodo. Como un ejemplo se puede tomar el par galvánico entre el hierro (Fe) y el Zinc (Zn). Al conectar éstos dos metales se forma una celda galvánica en la cual el Zn actúa como ánodo y por lo tanto se llevan las reacciones de oxidación en su superficie, y el Fe actúa como cátodo. Este es el fundamento de la protección catódica. El valor absoluto de la diferencia entre los dos potenciales estándar es conocido como potencial galvánico.

	Reacción de reducción	$E^0$ , V vs. SHE	
↑ Noble	$Au^{+3} + 3e^- = Au$	+1.498	
	$O_2 + 4H^+ + 4e^- = H_2O$	+1.229	
	$Pt^{+2} + 2e^- = Pt$	+1.200	
	$Pd^{+2} + 2e^- = Pd$	+0.987	
	$Ag^+ + e^- = Ag$	+0.799	
	$Cu^{+2} + 2e^- = Cu$	+0.337	
	$Re^{+3} + 3e^- = Re$	+0.300	
	$2H^+ + 2e^- = H_2$	0.000	
	↓ Activo	$Fe^{+3} + 3e^- = Fe$	-0.036
		$Pb^{+2} + 2e^- = Pb$	-0.126
$Sn^{+2} + 2e^- = Sn$		-0.136	
$Ni^{+2} + 2e^- = Ni$		-0.250	
$Co^{+2} + 2e^- = Co$		-0.277	
$Cd^{+2} + 2e^- = Cd$		-0.403	
$Fe^{+2} + 2e^- = Fe$		-0.440	
$Cr^{+3} + 3e^- = Cr$		-0.744	
$Zn^{+2} + 2e^- = Zn$		-0.763	
$Ti^{+2} + 2e^- = Ti$		-1.630	
$Al^{+3} + 3e^- = Al$	-1.662		
$Mg^{+2} + 2e^- = Mg$	-2.363		
$Na^+ + e^- = Na$	-2.714		
$K^+ + e^- = K$	-2.925		
$Li^+ + e^- = Li$	-3.045		

Tabla 1. Serie electromotriz de los metales

### 1.3.1.2 Celdas electrolíticas

A diferencia de una celda galvánica, en una celda electrolítica se utiliza una fuente de poder externa, en éste tipo de celdas los electrodos pueden ser del mismo metal o de dos metales diferentes. En una celda electrolítica, la reacción espontánea redox es forzada a ocurrir en el sentido opuesto, esto es posible únicamente si el potencial aplicado es mayor al potencial galvánico.

Este tipo de celdas es muy útil en el campo de la electrometalurgia para recuperar metales puros a partir de una solución de sus iones en el cátodo de la celda.

### 1.3.1.3 Comparación entre celdas electroquímicas

En la tabla 2 se presenta una comparación entre las celdas galvánicas y las celdas electrolíticas. [1]

<b>Celda galvánica</b>	<b>Celda electrolítica</b>
Provee energía eléctrica	Produce energía química
E. química → E. eléctrica	E. eléctrica → E. química
$\Delta G^0 < 0$ y $E^0 > 0$	$\Delta G^0 > 0$ y $E^0 < 0$
Reacción redox espontánea	Reacción redox forzada
Cátodo positivo	Cátodo negativo
Ánodo negativo	Ánodo positivo
Pila seca	Electrodeposición, protección catódica

**Tabla 2. Comparación entre celdas electroquímicas**

### 1.3.2 Ecuación de Nernst

Para calcular el potencial de una celda electroquímica fuera del equilibrio se utiliza la ecuación de Nernst:

$$E = E^0 - \frac{RT}{zF} \ln(K)$$

La aplicación de ésta ecuación surge de la necesidad de conocer potenciales de media celda fuera del equilibrio, es decir, a diferentes concentraciones, temperaturas y/o presión parcial de oxígeno.

Una de las aplicaciones más importantes de ésta ecuación es en la construcción de diagramas E-pH (Pourbaix), de lo cual se hablará en el siguiente tema. [1]

### 1.3.3 Diagramas de Pourbaix

Son una representación gráfica de las relaciones (derivadas de la ecuación de Nernst) entre el pH y los potenciales de equilibrio de las reacciones electroquímicas que más probablemente ocurrirán en una solución con un metal en específico en solución.

Los potenciales de equilibrio son calculados a partir de la termodinámica de las reacciones y las regiones de estabilidad son determinadas mediante las relaciones obtenidas de la ecuación de Nernst para las interacciones entre los otros compuestos.

Una vez obtenido el diagrama es fácil identificar las regiones de estabilidad para cada uno de los compuestos, iones o elementos y dicho diagrama es de gran utilidad para hacer predicciones en cuanto a los procesos de corrosión o electrometalurgia.

Un ejemplo muy ilustrativo es el caso del diagrama de Pourbaix para el Fe en agua (figura 1), en el cual se pueden identificar cada una de las regiones de estabilidad de los compuestos y a su vez se han etiquetado estas zonas con 3 nombres:

- 1 **Corrosión ( $\text{Fe}^{2+}$ )**. Es el área de estabilidad del ion ferroso, por lo cual se propiciará termodinámicamente su formación.
- 2 **Pasivación (óxidos de hierro)**. Si bien es cierto que en ésta zona se presenta la oxidación de la superficie del hierro, el óxido formado actúa también como una capa protectora (pasivante), evitando así la subsiguiente oxidación de la superficie del metal.
- 3 **Inmunidad (Fe)**. En ésta zona, el Fe existe en un estado inactivo, es decir, que no reaccionará con el oxígeno del ambiente, esto es posible debido a los potenciales alcanzados en esa zona. [3]



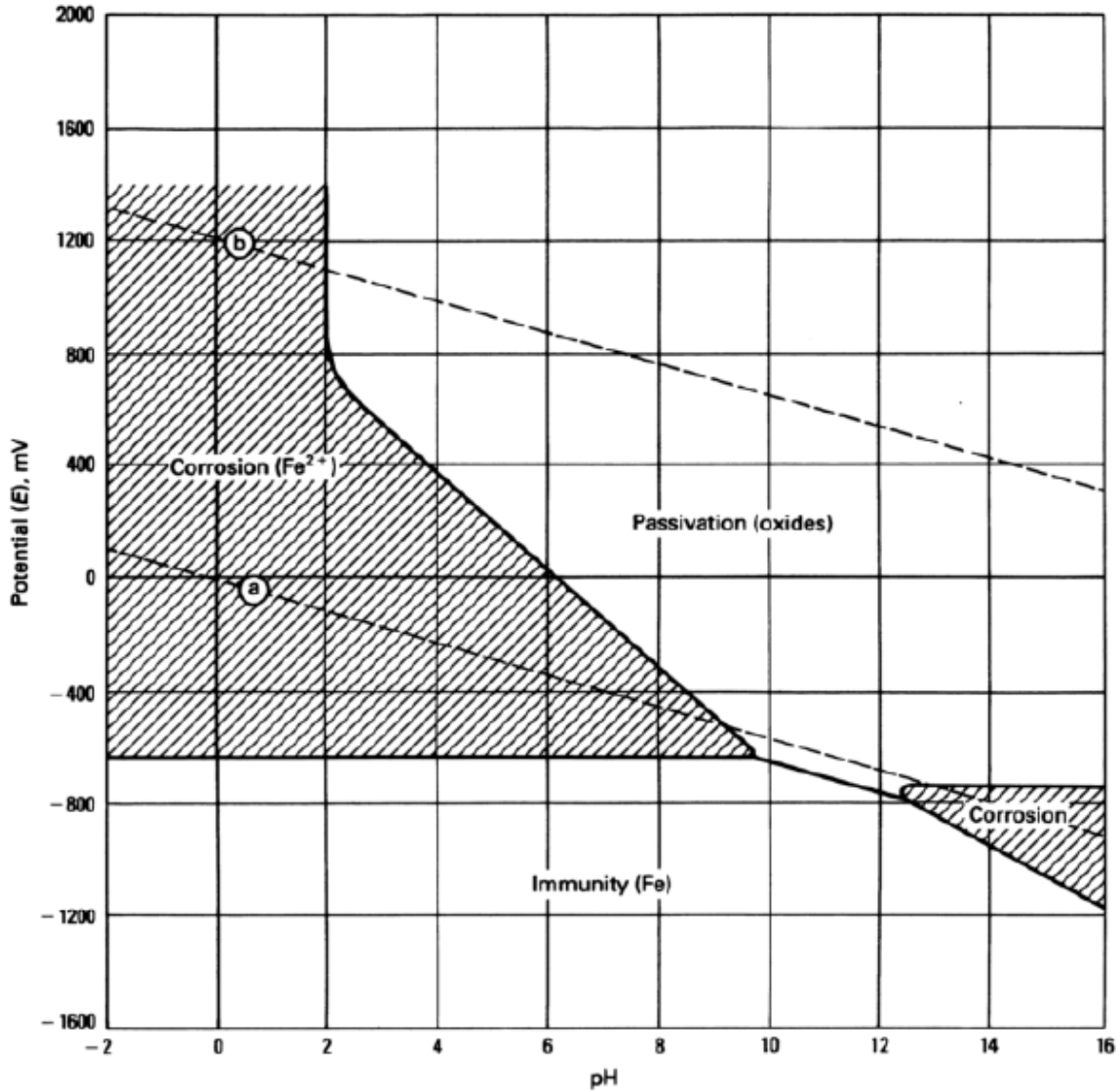


Figura 1. Diagrama de Pourbaix para el hierro en agua

### 1.3.4 Electrodo de referencia

Dado que los voltajes se miden como una diferencia de potencial, para poder conocer el potencial de media celda de un metal se necesita un electrodo que funcione como referencia y que tenga un potencial estable, que no varíe con factores externos como la temperatura o la presión atmosférica.

Un electrodo de referencia es típicamente una media celda compuesta por un metal y sus iones en solución. El electrolito que rodea al metal está en contacto con el medio mediante un diafragma poroso.

En la práctica, se utilizan diferentes electrodos de referencia, dependiendo del medio y la función a desempeñar. Se debe observar lo siguiente en particular:

- 1 Estabilidad del potencial del electrodo de referencia con el tiempo.
- 2 Resistividad del medio en el que se realizará la medición.
- 3 Compatibilidad con el sistema en cuestión.

Para efectuar mediciones de potencial en suelos, se recomienda el electrodo de cobre- sulfato de cobre (Cu-CuSO<sub>4</sub> ó CSE), el cual tiene un error aproximado de ± 5mV. Si existe un error más grande en la medición, se debe a cambios en la concentración del electrolito.

Para efectuar mediciones de potencial de hierro en medios acuosos, el electrodo de Cu-CuSO<sub>4</sub>, no se recomienda, debido a que puede haber precipitación de cobre sobre la superficie del acero. Para estos casos es recomendado el electrodo de calomel saturado (KCl), el cual no presenta ningún problema. [4]

## 1.4 Cinética electroquímica.

### 1.4.1 Corrosión controlada por procesos de activación

*Control activacional* es el término para describir los procesos de corrosión que son controlados por semireacciones electroquímicas, ya sea ésta de oxidación o de reducción. Para describir este comportamiento y determinar la relación entre corriente y potencial, se utiliza la ecuación de Butler-Volmer:

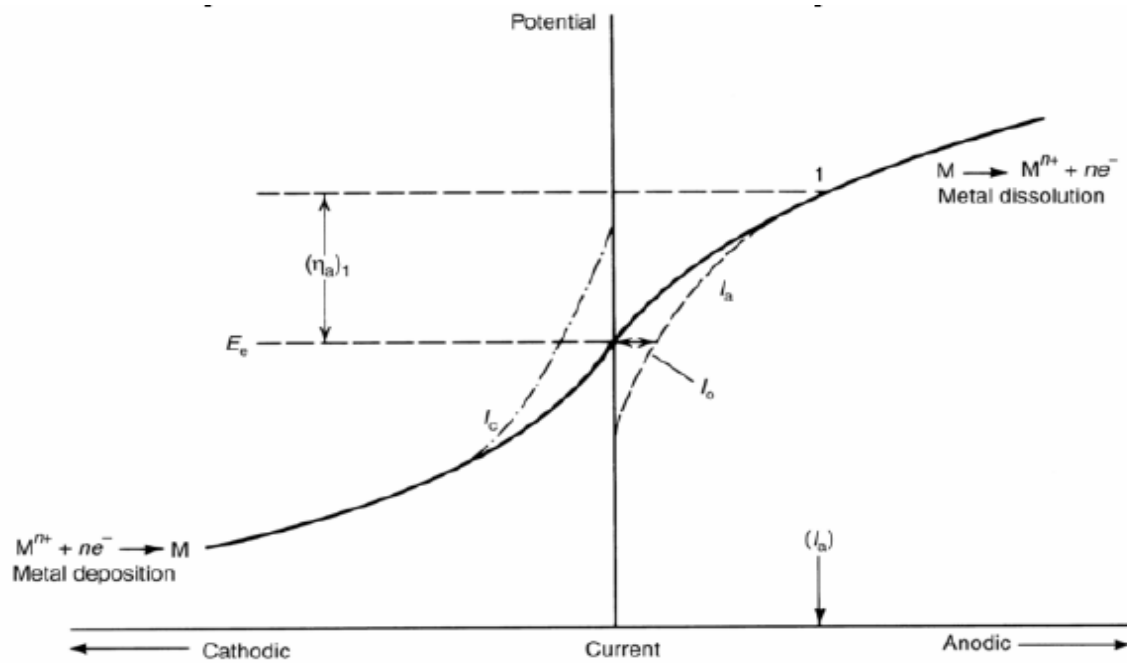
$$I = I_0 \left\{ \exp\left(\frac{\alpha F}{RT} \eta\right) - \exp\left(1 - \alpha\right) \frac{F}{RT} \eta \right\}$$

Donde  $I$  es la corriente,  $I_0$  es la corriente de intercambio,  $F$  es la constante de Faraday,  $R$  es la constante de los gases,  $T$  es la temperatura absoluta,  $\alpha$  es el coeficiente

de transferencia, generalmente considerado 0.5 y el término  $\eta$  es el sobrepotencial, definido como:

$$\eta = E - (E_e)_{M/M^{n+}}$$

Donde  $E$  es el potencial aplicado experimentalmente y  $E_e$  es el potencial obtenido de la ecuación de Nernst para esa reacción. Un sobrepotencial es una medida de qué tan lejos está una reacción del equilibrio.



**Figura 2. Relación corriente-potencial para una reacción de disolución/deposición de un metal. La línea sólida representa la corriente medida, y las líneas punteadas ( $I_a$ ,  $I_c$ ) muestran las corrientes de disolución o deposición parcial,  $I_0$  es la corriente de intercambio en  $E_e$  y  $h_a$  es el sobrepotencial anódico que existiría si el potencial se mantuviera constante en el punto 1.**

En el equilibrio ( $\eta=0$ ,  $E=E_e$ ), no se miden flujos de corriente, sin embargo éste es un equilibrio dinámico, donde la velocidad de la reacción anódica (disolución) es la misma que la velocidad de la reacción catódica (deposición):

$$I_a = -I_c = I_0$$

Donde  $I_0$  es la corriente de intercambio para esta reacción química en específico. La corriente de intercambio es el equivalente de una constante electroquímica y por lo tanto una medida directa de la cinética de la reacción. [5]

## 1.5 Técnicas electroquímicas para el estudio y control de la corrosión

### 1.5.1 Resistividad de suelos

La técnica para medir la resistividad de un suelo es conocida como el método de Wenner de los cuatro electrodos [6] y es utilizada en el control de la corrosión de estructuras enterradas. Las mediciones de resistividad indican la capacidad relativa de un medio para transportar corrientes eléctricas. Cuando una estructura metálica está inmersa en un medio conductivo, la capacidad de conducción del medio influirá en la magnitud de las corrientes galvánicas y corrientes de protección catódica, otro factor que tendrá un efecto en dichas corrientes es el grado de polarización del ánodo.

Para medir la resistividad del suelo, se deben colocar cuatro electrodos de manera equidistante en una línea recta, enterrándolos a una profundidad no mayor al 5% de la distancia entre ellos. La separación de los electrodos debe ser seleccionada de acuerdo a la capa del suelo que se desea ser evaluada. La medida de resistividad obtenida representa un promedio del semi-hemisferio del suelo de radio igual a la distancia entre los electrodos.

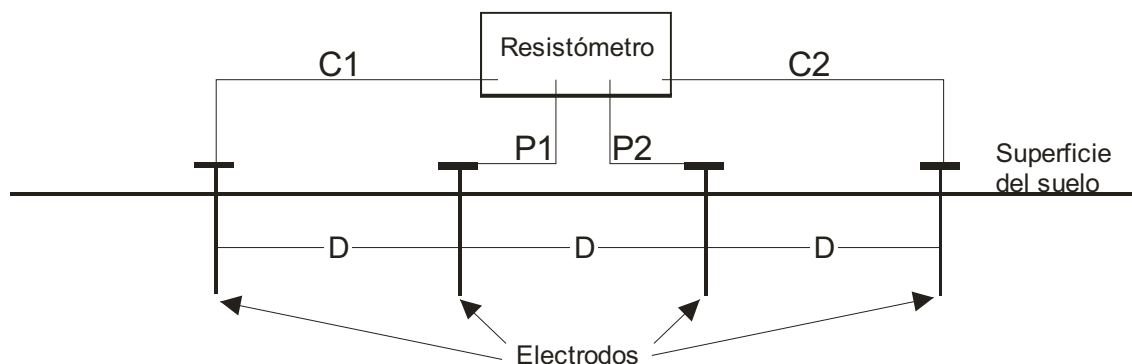


Figura 3. Diagrama de conexión para el método de los cuatro electrodos

Como se puede observar en la figura 3, un voltaje es impuesto al suelo a través de los electrodos externos, causando un flujo de corriente, representado por C1 y C2, y en los electrodos internos se mide la diferencia de potencial creada por esa corriente.

Aplicando la siguiente fórmula se puede conocer la resistividad,  $\rho$  en  $\Omega \cdot \text{cm}$ :

$$\rho = 2\pi DR$$

Donde  $D$  es la separación entre electrodos en cm y  $R$  es la resistencia en  $\Omega$ .

En la tabla 3 se presenta la relación entre la resistividad de un suelo y grado de corrosividad. [7]

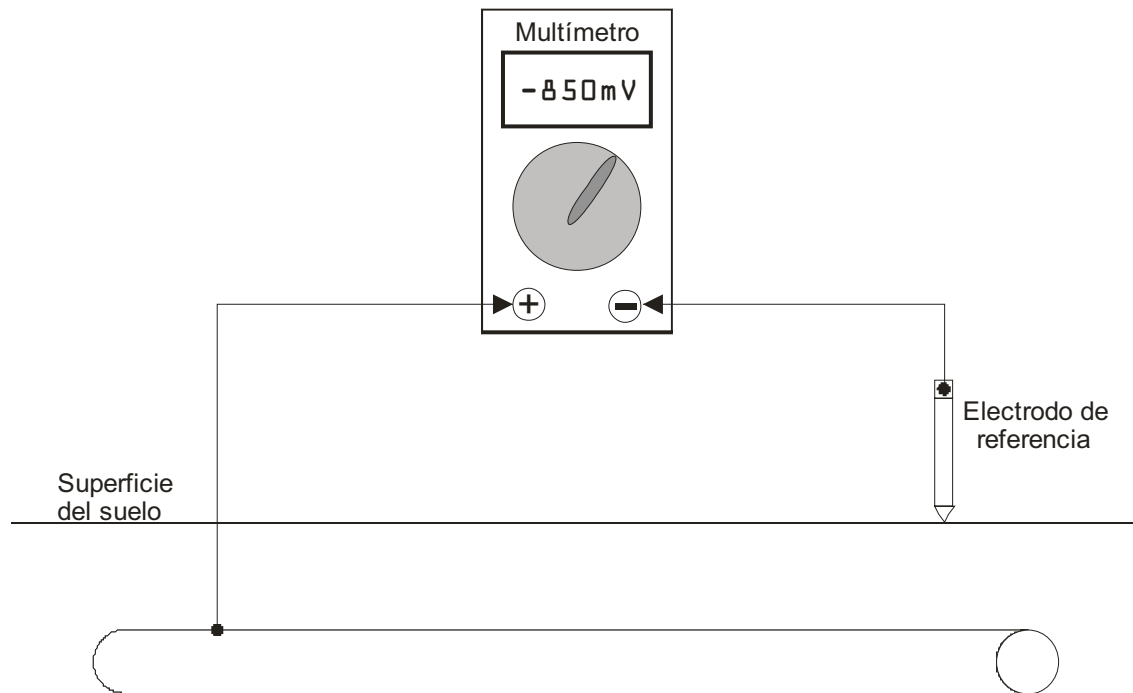
Resistividad del suelo, $\Omega \cdot \text{cm}$	Grado de corrosividad
0-500	Muy corrosivo
500-1000	Corrosivo
1000-2000	Moderadamente corrosivo
2000-10000	Medianamente corrosivo
Arriba de 10000	Despreciable

**Tabla 3. Relación entre resistividad del medio y su corrosividad**

### 1.5.2 Medición de potenciales

Debido a que el monitoreo de la corrosión de una tubería enterrada por el método de inspección visual es algo impráctico debido a razones económicas, comúnmente es utilizada la técnica de medición de potenciales, con la cual se puede conocer el potencial de la tubería en contacto con el suelo. Para interpretar estas mediciones se deben utilizar criterios de protección catódica, en el caso de que ésta sea aplicada, o en su defecto, se debe comparar el potencial del metal en cuestión con su diagrama de Pourbaix para determinar la zona en la que se encuentra el material (corrosión, pasividad o inmunidad).

Este tipo de medición es el principio del mapeo a intervalo cerrado el cual se discutirá más adelante.



**Figura 4. Diagrama de conexión para la medición de un potencial de una tubería**

En la figura 4 se puede observar el diagrama de conexión para la medición de potenciales de tuberías enterradas. Para realizar esta medición se debe utilizar un multímetro de alta impedancia, donde el polo positivo se conectará a la tubería enterrada, y el polo negativo se conectará a un electrodo de referencia apropiado, por ejemplo uno de  $\text{Cu-CuSO}_4$ .

Para obtener mediciones confiables es necesario asegurarse de que todas las conexiones tengan un buen contacto, tanto el electrodo con el suelo como el cable con la tubería. [11]

### 1.5.3 Mapeo a intervalo cerrado

La técnica de mapeo a intervalo cerrado (*Close interval survey, CIS*) es ampliamente utilizada en el monitoreo de la corrosión de tuberías enterradas. El principio de operación de ésta técnica es la medición de potenciales. El operador debe caminar tomando mediciones sobre la tubería con un electrodo de referencia portátil, el cual se

encuentra ubicado en la punta de un sofisticado bastón. Dicho bastón cuenta con un botón, el cual al ser presionado realiza cinco funciones, la primera es registrar las coordenadas del sistema de posicionamiento global (GPS), la segunda es medir el potencial de la tubería enterrada cuando el rectificador se encuentra en la posición de “ON”. Inmediatamente después de esto, el rectificador de corriente es apagado. La cuarta función es medir el potencial de la tubería enterrada con la protección en “OFF”. Por último, el rectificador es encendido de nuevo.

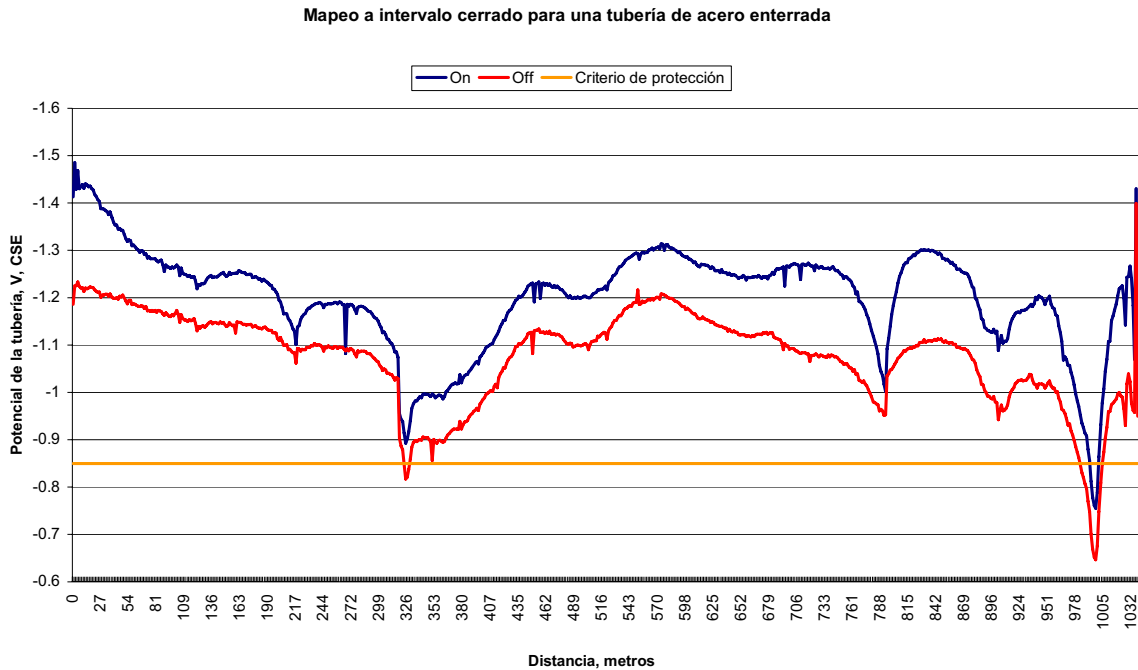
Este proceso se repite en un intervalo que se encuentra entre los tres y cinco pies de distancia hasta que se cubra la sección de tubería que se desee monitorear. Al terminar el sondeo, se recupera la información en tablas que pueden ser graficadas para interpretar los datos adecuadamente.

En la figura 5 se observa cómo es llevada a cabo la técnica de CIS.



**Figura 5. Técnica de mapeo a intervalo cerrado, CIS, por sus siglas en inglés**

En la figura 6 se presenta un ejemplo de un mapeo a intervalo cerrado para una tubería de acero enterrada, en la gráfica se registran los potenciales de la tubería con la protección catódica en “ON” y en “OFF”, así como el criterio de protección.



**Figura 6. Técnica de mapeo a intervalo cerrado, CIS, por sus siglas en inglés**

Del ejemplo en la figura 6 se pueden apreciar dos cosas importantes: Primera, que los potenciales de “ON” y “OFF” siguen la misma tendencia y segunda, que los potenciales de protección varían a lo largo de la tubería. Es difícil dar una explicación al porque de la variación en el potencial de la tubería, debido a la enorme cantidad de factores que afectan esta medición, como pueden ser la temperatura del suelo y/o la tubería, la humedad del electrolito, la resistividad del suelo, la composición del suelo, el estado del recubrimiento, la distancia de la tubería a los ánodos o la existencia de productos de corrosión en el punto de inspección. Como se observa en la gráfica en los puntos 326 m y 1005 m se registran potenciales muy positivos con respecto al resto de la tubería, en adelante estos puntos son identificados como “zonas calientes” (*hot spots*) y, en casos donde el criterio de los -850mV no se cumple, como en el punto 1005 m, es recomendable realizar una excavación para llevar a cabo una inspección visual. [11]



#### 1.5.4 Determinación de la composición química

Para determinar la composición química del suelo en el cual está enterrada la tubería, se deben tomar muestras a la profundidad a la cual la tubería se encontrará enterrada, únicamente en los sitios en los que la resistividad del suelo presente un valor que indique peligro de sufrir corrosión. Las muestras deben ser enviadas a un laboratorio calificado para realizar el análisis de acuerdo a los estándares correspondientes.

A continuación se presenta una tabla con la relación entre la concentración y el grado de corrosividad en un suelo que contiene cloruros, sulfatos, y diferentes niveles de pH. [11]

Concentración, ppm	Grado de corrosividad
<b>Cloruros</b>	
>5000	Severo
1500-5000	Considerable
500-1500	Corrosivo
<500	Ligero
<b>Sulfatos</b>	
>10000	Severo
1500-10000	Considerable
150-1500	Posible
0-150	Despreciable
<b>pH</b>	
<5.5	Severo
5.5-6.5	Moderado
6.5-7.5	Neutral
>7.5	Ninguno

Tabla 4. Grado de corrosividad de un suelo en función del pH y su composición química

### 1.5.5 Determinación del requerimiento de corriente del sistema

Para determinar que cantidad de corriente será necesaria para proteger una sección de tubería, se debe colocar una cama de ánodos temporal y aplicar una corriente de protección conocida a una sección determinada de tubería.

A lo largo de la tubería se deben colocar electrodos de referencia para medir el potencial de la tubería respecto al suelo. En cada ensayo se debe aplicar una corriente mayor, hasta que los electrodos que se encuentran en los extremos de la tubería indiquen un potencial de  $-0.85V$ , respecto al electrodo de  $Cu-CuSO_4$ , tal y como lo indica el criterio de protección de la *National Association of Corrosion Engineers, NACE*.

En la figura 7 se observa el diagrama de conexión para determinar el requerimiento de corriente de protección.

Debe tomarse en cuenta que al aplicar la corriente necesaria para alcanzar el nivel de protección deseado, una tubería desnuda puede tardar inclusive semanas en polarizarse por completo, para obtener una predicción del grado de polarización adquirido se puede aplicar una corriente constante e ir graficando el potencial de la tubería en función del tiempo, para después extrapolar un valor final aproximado de potencial. Al realizar este experimento con diferentes corrientes se puede encontrar la corriente de protección. [11]

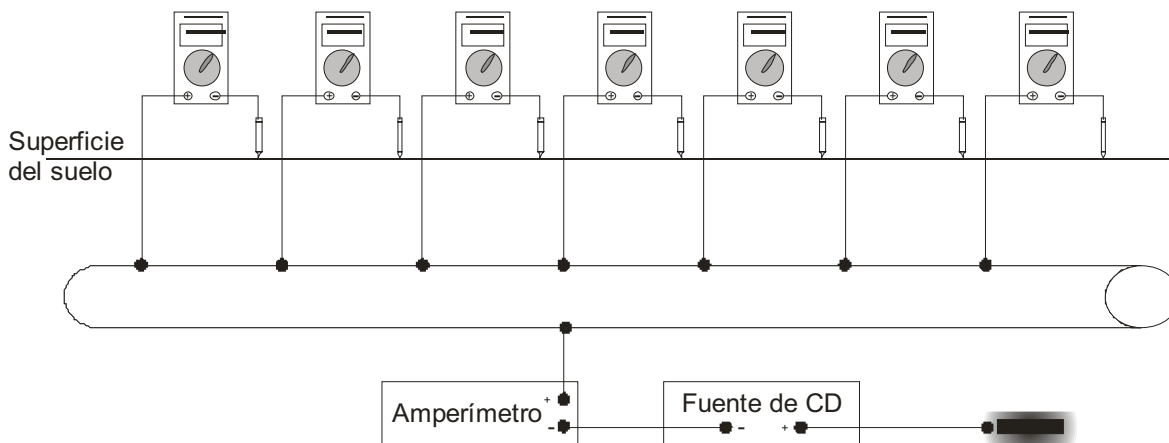


Figura 7. Diagrama de conexión para medir el requerimiento de corriente de protección.

## **1.6 Control de la corrosión**

### **1.6.1 Protección Catódica**

La protección catódica (PC) es una técnica electroquímica que es comúnmente utilizada para reducir la velocidad de corrosión de una estructura enterrada o sumergida. Puede ser aplicada para estructuras metálicas desnudas, pero es aplicada de manera más común en combinación con algún tipo de recubrimiento superficial. Cuando un sistema tiene un buen diseño, instalación, mantenimiento y monitoreo, la protección catódica en conjunto con los recubrimientos es muy probablemente el método más eficiente para reducir la velocidad de corrosión de estructuras metálicas.

Existen diferentes maneras de explicar el proceso de protección catódica, una de ellas es considerar la superficie de la estructura metálica como si estuviera constituida de ánodos y cátodos locales que se desarrollan en cuanto el metal es inmerso en el electrolito como puede ser el suelo. Los ánodos y cátodos locales se presentan debido a variaciones de composición química o de algún otro tipo en la superficie del metal y/o en el electrolito. La reacción de corrosión se presenta en los sitios anódicos resultando en la oxidación del metal para formar iones metálicos, en los cátodos, deben ocurrir reacciones simultáneas para mantener un equilibrio de las cargas.

Cuando se emplea protección catódica, una corriente neta (en corriente directa, DC) es aplicada a la superficie metálica. Mientras el metal comienza a polarizarse (cambiar su potencial), la corriente anódica correspondiente a la velocidad de corrosión decrece de manera proporcional con la corriente neta aplicada. Cuando la corriente catódica es lo suficientemente grande, la corriente catódica y la velocidad de corrosión son reducidas a un valor casi despreciable. En general, la cantidad de corriente, específicamente, la densidad de corriente necesaria para alcanzar un nivel óptimo de protección depende del metal, el ambiente y varios factores que pueden influenciar en la

polarización del metal, y determinarán el tipo de protección catódica que se aplicará en el sistema. [8]

#### **1.6.1.1 Criterios de NACE para sistemas de protección catódica**

La efectividad de un sistema de protección catódica o algún otro sistema externo de control de corrosión pueden ser evaluados por apreciación visual, mediciones de espesores de pared, o mediante el uso de dispositivos de inspección interna. Debido a que dichos métodos son muchas veces imprácticos, el alcanzar alguno de los criterios o una mezcla de los mismos presenta evidencia de que se ha alcanzado un buen nivel de protección catódica. Sin embargo, cuando se lleven a cabo excavaciones por cualquier motivo, la estructura debe ser inspeccionada para buscar evidencia de corrosión y/o verificar el estado del recubrimiento.

Estos criterios han sido desarrollados a partir de experimentos de laboratorio y/o verificados evaluando información proporcionada de sistemas exitosos de protección catódica. En ocasiones será necesario combinar más de un criterio para una sola estructura.

NACE tiene establecidos 3 criterios para estructuras de hierro y acero [9], los cuales son necesarios verificar para asegurar la protección de un sistema:

- 1 Alcanzar un potencial negativo de por lo menos  $-850\text{mV}$  con la protección catódica funcionando. Este potencial es medido con respecto a un electrodo de referencia de  $\text{Cu-CuSO}_4$  en contacto con el electrolito. Cabe mencionar que este es el criterio de protección más utilizado para sistemas de protección catódica.
- 2 Una polarización negativa de por lo menos  $-300\text{mV}$  con respecto al potencial de corrosión libre de la estructura.
- 3 Un mínimo de  $100\text{mV}$  de polarización catódica entre la estructura de la superficie y un electrodo de referencia estable en contacto con el electrolito. La formación o decaimiento de la polarización puede ser medida para satisfacer este criterio.

## 1.6.2 Recubrimientos

La función de un recubrimiento exterior es controlar la corrosión mediante el aislamiento de la superficie externa de la estructura del ambiente, reducir los requerimientos de protección catódica y mejorar la distribución de corriente. Los recubrimientos deben ser seleccionados y aplicados de manera adecuada para cumplir con estas funciones.

Entre las características deseables de un recubrimiento se encuentran: Que sea un buen aislante de la corriente eléctrica; una buena barrera contra la humedad; que el método de aplicación no afecte las propiedades mecánicas de la estructura; que sea aplicado a la estructura con un mínimo de defectos; que tenga una buena adhesión; que tenga la habilidad de resistir el crecimiento de los defectos con el tiempo; que la resistividad del material no varíe con el tiempo y que no sea tóxico al ambiente.

Como recomendación al utilizar un recubrimiento, se debe de utilizar por lo menos uno de los primero dos tipos de recubrimiento listados en la tabla 5, en dicha tabla se nombran las prácticas recomendadas para su aplicación. [9]

<b>Sistema de recubrimientos genérico</b>	<b>Referencia</b>
Coal Tar	ANSI/AWWA C203
Wax	NACE Standard RP0375
Films prefabricados	NACE Standard MR0274 ANSI/AWWA C214 ANSI/AWWA C209
Fusion-Bonded Epoxy (FBE)	Peabody's Control of pipeline corrosion ANSI/AWWA C213 API RP 5L7 CSA Z245.20M NACE Standard RP0190
Polyolefin	NACE Standard RP0185 DIN 30 670 ANSI/AWWA C215

**Tabla 5. Recubrimientos genéricos y prácticas recomendadas para su aplicación**

### 1.6.3 Inhibidores

El uso de inhibidores químicos para disminuir la velocidad de los procesos de corrosión presenta varias opciones. En las industrias del petróleo e ingeniería de procesos, los inhibidores siempre han sido considerados la primera línea de defensa contra la corrosión.

Un inhibidor es una sustancia química que cuando se aplica en una pequeña concentración en el ambiente, reduce efectivamente la velocidad de corrosión del metal. La eficiencia de un inhibidor de corrosión se puede expresar de acuerdo a la siguiente relación:

$$Eficiencia(\%) = 100 \frac{V_{corr_{sin.inhibidor}} - V_{corr_{con.inhibidor}}}{V_{corr_{sin.inhibidor}}}$$

Donde  $V_{corr}$  representa la velocidad de corrosión de la estructura.

#### 1.6.3.1 Clasificación de los inhibidores de corrosión

Los inhibidores de corrosión han sido clasificados de diferentes maneras por varios autores, algunos prefieren agruparlos por su funcionalidad química, sin embargo el esquema de organización más popular consiste en categorizarlos de acuerdo a su funcionalidad como sigue [10]:

- 1 Pasivantes (anódicos)
- 2 Catódicos
- 3 Orgánicos
- 4 De precipitación
- 5 De corrosión volátil

## **1.7 Sistemas de protección catódica [11]**

Para el diseño de un sistema de protección catódica se deben tener en cuenta diversos factores, entre los cuales se encuentran las características del medio que rodea la estructura como pueden ser la resistividad, composición química, etc; y las características del sistema a proteger como pueden ser el tipo de material, las dimensiones, otros sistemas de control de corrosión, etc.

### **1.7.1 Tipos de sistemas de protección catódica**

#### **1.7.1.1 Protección catódica con ánodos de sacrificio**

En una celda de corrosión (galvánica), un metal es activo (negativo) en comparación al otro y se corroe, en este tipo de protección se aprovecha ese efecto al establecer una celda entre la estructura a proteger y un metal muy activo, al cual se le llama ánodo de sacrificio. En éste tipo de protección, el fenómeno de la corrosión no se ve eliminado, simplemente se transfiere de la estructura en operación al ánodo de sacrificio.

Bajo circunstancias normales, la corriente disponible de los ánodos galvánicos es limitada. Por ésta razón, la protección catódica con ánodos galvánicos es utilizada cuando los requerimientos de corriente son pequeños. De manera similar, la diferencia de potencial entre la estructura y los ánodos se ve limitada. Por lo tanto, la resistencia en el contacto de los ánodos con la tierra debe ser baja para que sea posible descargar una cantidad de corriente suficiente para la protección.

#### **1.7.1.2 Corriente impresa**

Para evitar las limitaciones de corriente y potencial asociadas a los ánodos de sacrificio, se puede suministrar corriente desde otra fuente a la estructura a proteger mediante el uso de una cama anódica y una fuente de poder. La fuente de poder más comúnmente utilizada es el rectificador, éste dispositivo convierte corriente alterna (AC) en corriente directa (DC) de bajo voltaje y tiene una gran flexibilidad para establecer voltajes de protección.

## 2. JUSTIFICACIÓN

Es bien sabido que la corrosión de estructuras metálicas tiene un impacto significativo en la economía de los Estados Unidos, incluyendo los sectores de infraestructura, transporte, utilidades, producción y gobierno. Un estudio que data de 1975 realizado por Battelle-NBS calculó que el costo de la corrosión era de USD \$70 billones por año, lo que equivalía al 4.2% del producto interno bruto (PIB) de ese país.

En el periodo de 1999-2001, CC Technologies condujo un estudio en cooperación con la Federal Highway Administration (FHWA) en el cual se realizó un análisis más detallado al evaluar 26 sectores industriales en los cuales se tiene conocimiento de que existen problemas de corrosión y se extrapolaron esos resultados para tener un estimado nacional. El costo total de la corrosión fue determinado en USD \$279 billones por año, lo cual representa el 3.2% del PIB de EE.UU.

Las nuevas tecnologías para prevenir la corrosión se siguen desarrollando y éstas permitirán reducir los costos causados por la corrosión. Sin embargo, para poder tener un mejor control de la corrosión debe haber una cooperación entre propietarios, operadores, usuarios, gobierno y el público en general. **[12]**

En el caso de México, un ejemplo de daños ocasionados por la corrosión aunada a otras responsabilidades fue la explosión de una alcantarilla, la cual quitó la vida a más de 200 personas en abril de 1992 en Guadalajara, Jalisco. Además de los decesos humanos, la serie de explosiones dañó 1600 edificios e hirió a 1500 personas. Los daños fueron valuados en USD \$75 millones. La explosión de la alcantarilla fue rastreada hasta la instalación por un contratista varios años antes del accidente de una tubería de agua que goteaba sobre un ducto de gasolina debajo de la tubería. La subsiguiente corrosión del ducto de gasolina provocó una fuga hacia la alcantarilla. **[13]**



Es de suma importancia que los estudiantes del campo de la ingeniería de corrosión cuenten con las herramientas (no sólo teóricas) necesarias para que estén preparados para enfrentar el reto que representa combatir a la corrosión.

El contar con un campo de prácticas de protección catódica no es una ventaja exclusiva para los estudiantes, sino también para el laboratorio de corrosión, al poder impartir cursos de certificación en protección catódica en el laboratorio.

En el campo de protección catódica se puede realizar investigación relacionada con el desempeño de nuevas aleaciones utilizadas como ánodos de sacrificio, las cuales se desarrollan en la actualidad en el laboratorio de corrosión.

### **3. OBJETIVOS**

- Elaborar una guía genérica para el diseño de un sistema de protección catódica de tuberías enterradas, ya sea mediante ánodos galvánicos o corriente impresa.
- Diseñar un sistema de protección catódica para ser instalado en Ciudad Universitaria que cuente con un sistema de ánodos galvánicos, corriente impresa, estaciones de monitoreo, tanques de almacenamiento en la superficie y enterrados, además de diferentes tuberías para ser protegidas, donde el personal del laboratorio de corrosión pueda realizar prácticas, impartir cursos y realizar investigación en el área de protección catódica.

## 4. METODOLOGÍA DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA

### 4.1 Consideraciones previas al diseño

El primer paso que el ingeniero de corrosión debe tomar antes de siquiera realizar mediciones de campo es reunir tanta información como sea posible de la tubería a proteger. Esto puede proveerlo de información valiosa que lo ayudará a determinar las condiciones de corrosión que se pueden esperar en el sistema, lo cual ayudará a diseñar un plan de ensayos de campo que le permitan obtener los datos necesarios para diseñar el sistema de protección. A continuación se enlista la información necesaria al planear un sistema de protección catódica:

- ¿De que material está construida la tubería? En esta sección se debe ser específico, incluyendo el grado del acero, si es el caso, o la nomenclatura de la aleación.
- ¿Existe algún tipo de recubrimiento en la tubería? ¿Cuál? ¿Cuál es el estado del recubrimiento?
- Si ésta es una tubería existente, ¿Existe algún registro de fugas? Si es así, se debe analizar este registro para ubicar las áreas de mayor agresividad para la tubería y determinar las posibles causas.
- ¿Cuál es el diámetro de la tubería y el espesor de la pared? ¿Existen variaciones en estos valores a lo largo de la línea?
- Tamaño o tamaños de los *casings* utilizados a lo largo de la tubería, aleación de acero utilizada, tipo de aislante entre el *casing* y la tubería.
- Ubicación y detalles de construcción de las estaciones de monitoreo de corrosión.
- ¿La línea fue unida con soldadura o con coples mecánicos?
- Tener un plano o mapa detallado de la ubicación de la tubería.

- ¿Existen coples aislantes que impidan la continuidad eléctrica a lo largo de la tubería?
- Ubicación de estructuras subterráneas que crucen con la tubería a proteger, si alguna de estas estructuras está protegida catódicamente, ¿dónde se ubica la fuente de protección de dicho sistema?
- ¿Existen posibles fuentes de corrientes de interferencia que pudieran afectar la tubería a proteger?
- ¿En algún punto de la tubería ésta se encuentra a menos de 60 metros de distancia de una torre de transmisión eléctrica de alto voltaje?
- ¿La tubería es o será operada a una alta temperatura? Si es así, se puede dañar el recubrimiento de protección.

## **4.2 Ensayos de campo**

Tomando en cuenta los resultados obtenidos de las preguntas arriba planteadas, se pueden emplear varios o todos los ensayos descritos en esta sección.

### **4.2.1 Exploración de la ruta de construcción para una tubería nueva**

En el caso de una tubería nueva se deben realizar mediciones de resistividad del suelo a lo largo de la ruta de la nueva tubería, tal como se explicó en la sección 1.5.1, así como la determinación de algunos agentes altamente corrosivos en el suelo como pueden ser cloruros, sulfatos, sulfuros y carbonatos ácidos, esto es explicado en la sección 1.5.4. De la misma manera se debe evaluar la capacidad del suelo para desarrollar corrosión por bacterias anaeróbicas.

### **4.2.2 Ensayos para una tubería sin protección catódica**

Para una tubería existente sin protección catódica se deben realizar los ensayos mencionados en la sección anterior, y en adición a lo anterior, se deben llevar a cabo mediciones de potenciales eléctricos entre la tubería y el suelo, como fue descrito en la sección 1.5.2 y medición de corrientes que fluyan en la tubería. La resistencia eléctrica del

recubrimiento debe ser evaluada, así como la presencia de corrientes de interferencia. En caso de que un sistema de protección catódica sea necesario, evaluar los requerimientos de corriente eléctrica del sistema tal y como se propone en la sección 1.5.5.

#### **4.2.3 Ensayos para una tubería con protección catódica**

Para una tubería existente con protección catódica se deben realizar mediciones de potenciales eléctricos entre la tubería y el suelo, como fue descrito en la sección 1.5.2, o inclusive un mapeo a intervalo cerrado como se indica en la sección 1.5.3 y medición de corrientes que fluyan en la tubería. La resistencia eléctrica del recubrimiento debe ser evaluada, así como la presencia de corrientes de interferencia.

#### **4.3 Consideraciones para el diseño**

De acuerdo a las tres secciones anteriores, pareciera que es necesario realizar la totalidad de estos ensayos, sin embargo, es responsabilidad del ingeniero de corrosión proponer las evaluaciones pertinentes para evitar la pérdida de tiempo, dinero, y sobre todo, terminar con una gran cantidad de información que no será útil.

Una vez realizados los ensayos pertinentes, quedan todavía algunas preguntas que deben ser contestadas previas al diseño del campo de protección catódica, éstas son preguntas más específicas que le dan al ingeniero de corrosión la posibilidad de realizar la “ingeniería de detalle”. Se debe conocer el perfil de resistividad del suelo para decidir cuales serán las mejores ubicaciones para instalar los sistemas de protección catódica, una vez ubicados estos sitios se debe investigar si en el área se encuentra disponible el servicio eléctrico, en caso de utilizar corriente impresa, y registrar el nombre de la compañía que lo ofrece, el voltaje, el número de poste, si es monofásico o trifásico, etc. Se debe medir la resistencia eléctrica del recubrimiento, los requerimientos de corriente de protección, como se detalló en la sección 1.5.5, además se deben ubicar secciones del terreno que cuenten con condiciones en extremo agresivas para la tubería como pueden ser un pH ácido, alta concentración de cloruros, sulfatos u otro agente agresivo, o que

puedan presentar con facilidad problemas de corrosión inducida por bacterias. También es necesario investigar el efecto que tendrán las corrientes de interferencia, si existen, así como los cruces con otras tuberías o los *casings* bajo carreteras o vías de tren.

Únicamente cuando toda la información descrita en las secciones anteriores ha sido reunida se puede proceder al diseño de un sistema de protección catódica que funcione de la manera más eficiente.

#### **4.4 Diseño de la cama anódica**

Los primeros pasos para llevar a cabo el diseño del sistema de protección catódica son determinar dónde debe ser aplicada la corriente de protección y qué cantidad de corriente debe ser aplicada. Una vez se tiene esta información se pueden escoger sitios y condiciones específicos para la instalación de las camas anódicas.

##### **4.4.1 Ubicación y diseño de la cama de ánodos**

###### **4.4.1.1 Ubicación de la cama de ánodos**

La consideración de mayor importancia al seleccionar alguna ubicación de una cama anódica es la determinación de la resistividad de suelo efectiva, sin embargo, existen otras consideraciones que no se deben pasar por alto como son:

- ¿Existen otras estructuras metálicas en el área que rodea la cama anódica? Si es así, se necesitará una medida correctiva en caso de que el sitio sea elegido para la operación.
- Si se va a instalar un rectificador, ¿existe una toma de corriente en el lugar? Si no, ¿es viable colocar una toma de corriente que llegue hasta el rectificador?
- ¿El sitio propuesto para la ubicación se encuentra en el derecho de vía de la tubería? Si no es así, ¿Se puede conseguir un permiso?
- ¿Es el lugar razonablemente accesible para propósitos de construcción y mantenimiento?

- ¿Existen planes de construcción a futuro que harán la construcción en ese lugar algo no viable?

#### **4.4.1.2 Diseño de la cama de ánodos**

Una vez seleccionado el lugar el lugar donde se ubicará la cama anódica y la resistividad del suelo ha sido determinada, se puede proceder con la etapa de diseño. El diseño es razonablemente simple cuando existen los planos de la estructura a proteger.

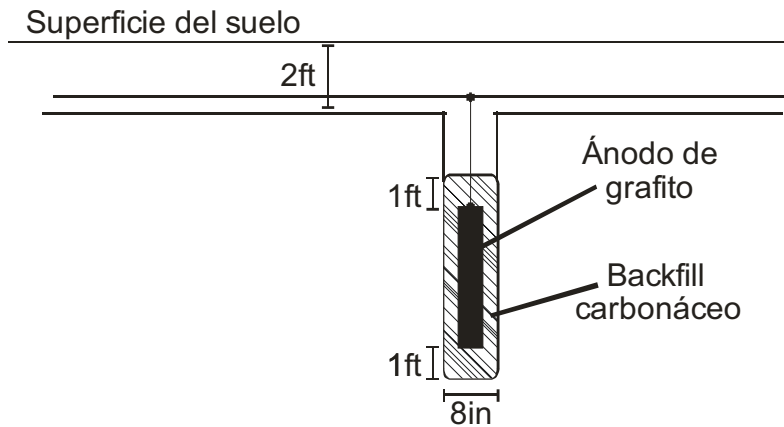
Debido a que existe una gran cantidad de factores, se deben tomar en cuenta el mayor número de ellos para que los cálculos relacionados con un sistema de protección catódica conlleven un margen de error relativamente bajo. El ingeniero de corrosión puede considerar un proyecto como un éxito si los resultados se encuentran en un margen de error menor al 10% respecto a los cálculos de diseño.

##### **4.4.1.2.1 Camas anódicas de corriente impresa**

Para elaborar un diseño de camas anódicas para sistemas de corriente impresa los cálculos deben basarse en los tipos de ánodos adoptados para el mismo.

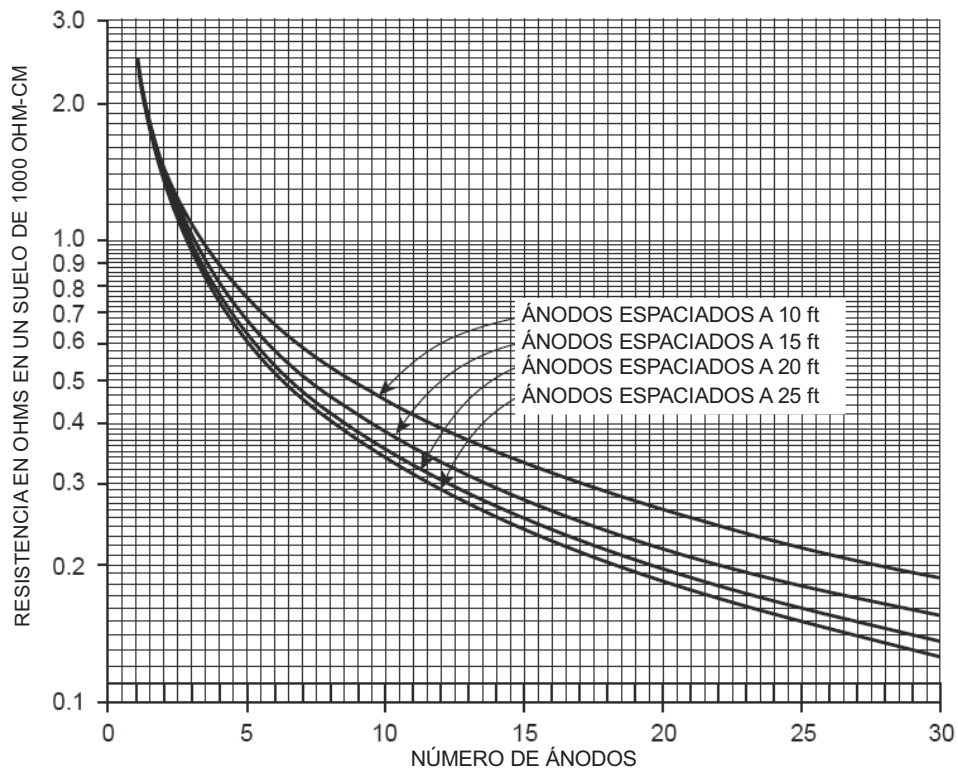
Es muy importante tomar las precauciones necesarias al elaborar las conexiones entre cable y ánodo para que éstas queden perfectamente aisladas, ya que los ánodos se encargarán de imprimir un potencial positivo en el medio, y si alguna pieza metálica queda en contacto con el suelo, ésta se corroerá a una velocidad extremadamente alta, interrumpiendo eventualmente la protección de manera parcial o total.

Para el diseño de camas anódicas de corriente impresa, el ingeniero de corrosión se debe basar en el arreglo de las mismas. A continuación se ilustrará el arreglo vertical, que es el más conveniente y el que se aplica con mayor frecuencia, de cualquier manera, se puede escoger el que mejor se ajuste a las necesidades del sistema a proteger. En la figura 8 se muestra un esquema simplificado de un arreglo vertical de ánodos.



**Figura 8. Arreglo para la instalación vertical de ánodos de grafito.**

Para determinar el número de ánodos en este tipo de arreglo se debe utilizar la gráfica en la figura 9, asumiendo que todos los ánodos se encuentran en línea recta.



**Figura 9. Gráfica de resistencia para una cama de ánodos de corriente impresa verticales. [11]**



Gráficas similares se pueden preparar para combinaciones ánodo-*backfill* de otras dimensiones, las curvas en estas gráficas fueron preparadas con las siguientes fórmulas y procedimientos.

La resistencia total entre cada ánodo y el suelo consiste en la resistencia de cada ánodo hacia el *backfill* más la resistencia del *backfill* con el suelo. La resistencia del ánodo con el *backfill* es obtenida con la siguiente formula:

$$R_v = \frac{0.00521\rho}{L} \left( 2.3 \log \frac{8L}{d} - 1 \right)$$

Donde:  $R_v$  es la resistencia del ánodo a la tierra en  $\Omega$ ,  $\rho$  es la resistividad del *backfill* en  $\Omega \cdot \text{cm}$ ,  $L$  es la longitud del ánodo en pies y  $d$  es el diámetro del ánodo en pies.

La resistencia de varios ánodos en paralelo puede ser calculada mediante la siguiente ecuación

$$R_v = \frac{0.00521\rho}{NL} \left( 2.3 \log \frac{8L}{d} - 1 + \frac{2L}{s} (2.3 \log 0.656N) \right)$$

Donde:  $R_v$  es la resistencia del ánodo a la tierra en  $\Omega$ ,  $\rho$  es la resistividad del *backfill* en  $\Omega \cdot \text{cm}$ ,  $L$  es la longitud del ánodo en pies y  $d$  es el diámetro del ánodo en pies,  $N$  es el número de ánodos en paralelo y  $s$  es el espaciamiento entre ánodos en pies.

Para la gráfica de la figura 9 se utilizó una columna de *backfill* de 7 pies por 8 pulgadas de diámetro, sin embargo, no se ha considerado la resistencia interna del ánodo (resistencia entre el ánodo y el *backfill*), lo cual se debe calcular para un ánodo y la resistencia total de los ánodos en paralelo será el valor obtenido para un ánodo entre el número total de ánodos.

Evidentemente, entre más ánodos se conecten en paralelo menor será la resistencia interna del ánodo. La misma gráfica es para ánodos en suelos de  $1000\Omega \cdot \text{cm}$ , y las curvas varían directamente con la resistividad del suelo, así, si se obtuvo un valor de

resistividad para el *backfill* con el suelo de  $0.4 \Omega$  en un suelo de  $2400 \Omega \cdot \text{cm}$ , la resistividad será de  $0.96 \Omega$  más la resistencia interna del ánodo.

A continuación se supone que se pretende instalar un sistema de ánodos de corriente impresa en un suelo con una resistividad promedio de  $2800 \Omega \cdot \text{cm}$ , que la cama anódica se encontrará a 300 pies de distancia de la tubería, que se utilizará cable de cobre AWG 4 y que la cama anódica debe descargar 20A y 24V. Antes de utilizar la gráfica, se deben tomar en cuenta los siguientes factores: la caída de voltaje entre la cama de ánodos y la tubería, la resistencia de la tubería al suelo en las inmediaciones de la cama anódica y la resistencia del cable de conexión entre la tubería y el rectificador y el rectificador y la cama de ánodos

- **Caída de voltaje entre la cama de ánodos y la tubería.** Para camas anódicas con un *backfill* carbonáceo este valor se encuentra en el orden de 2V
- **Resistencia de la tubería al suelo.** Este valor se encuentra en función de la calidad del recubrimiento de la tubería, entre mejor sea el recubrimiento, será mayor la resistencia efectiva en la zona de la cama anódica. Por ejemplo, si en la determinación de corriente de protección se obtuvo que para obtener un cambio de potencial en la tubería de  $-1.5\text{V}$  se necesitaron aplicar 20A, la resistencia del recubrimiento será de:  $1.5\text{V}/20\text{A} = 0.075 \Omega$
- **Resistencia de los cables.** Es la suma de la resistencia del cable que va de la tubería al rectificador más la resistencia del cable que va del rectificador a la cama de ánodos más la resistencia de los cables que conectan a los ánodos en paralelo. En la tabla 6 se muestran algunas de las resistencias para los cables de cobre más comúnmente utilizados en protección catódica a  $25^\circ\text{C}$ , así como los factores de conversión para otras temperaturas.

Uso general	Calibre (AWG)	Resistencia * 10 <sup>3</sup> , Ω·ft
Corriente impresa	4/0	0.0509
	3/0	0.0642
	2/0	0.0811
	1/0	0.102
	1	0.129
	2	0.162
	4	0.259
Ánodos galvánicos	6	0.410
	8	0.654
Estaciones de monitoreo	10	1.04
	12	1.65
Instrumentos de medición	14	2.62
	16	4.18
	18	6.66
	20	10.6
	22	17

Temperatura, °C	Múltiplo de resistencia
-10	0.862
-5	0.882
0	0.901
5	0.921
10	0.941
15	0.961
20	0.980
30	1.020
35	1.040
40	1.059

**Tabla 6. Resistencia de los conductores de cobre a 25°C**

Con la discusión anterior en mente, el diseño de una cama anódica para corriente impresa se puede estimar de la siguiente manera:

- El voltaje máximo de la fuente de poder será  $24V - 2V = 22V$
- Aplicando la ley de Ohm,  $22V/20A = 1.10 \Omega$ , ésta es la resistencia máxima que puede tener el sistema
- A este valor se le debe restar la resistencia del recubrimiento, que en este caso se determinó como  $0.0750 \Omega$  y la resistencia del cable conductor, cuya longitud se tomará como 330 pies, para darle un 10% de seguridad, lo cual da como resultado

0.082  $\Omega$ . La resistencia máxima permitida entonces para la cama anódica es de 0.94  $\Omega$ .

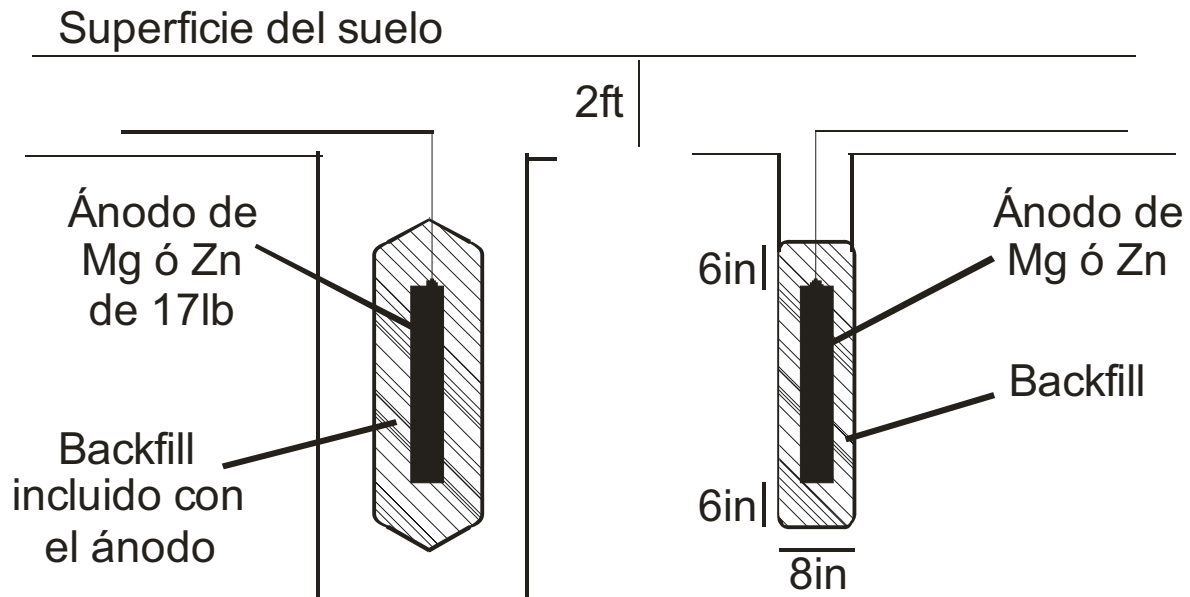
- Se supone ahora que la resistencia del ánodo con el backfill será de 0.90  $\Omega$ , la cual debe ser convertida a resistencia en un suelo de 1000  $\Omega$  para poder usar la gráfica, esto da una resistencia de 0.321  $\Omega$  y un número de ánodos entre 11 y 12 para un espaciamiento de 20 pies. Para propósitos de diseño se utilizarán 12 ánodos.
- Los cables de conexión entre los doce ánodos serían 11, con una distancia de 20 pies entre cada uno, lo cual da una distancia de 220 pies, sin embargo, debido a que la corriente se va distribuyendo en cada uno de los ánodos, para consideraciones de diseño siempre se usa la mitad, o sea 110 pies, lo cual da una resistencia de 0.029  $\Omega$ .
- La resistencia total de los 12 ánodos con sus cables sería entonces 0.308 $\Omega$  que se leen de la gráfica y luego se convierten a la resistencia en un suelo de 2800  $\Omega\cdot\text{cm}$ , más la resistencia interna de los ánodos, la cual es 0.106  $\Omega$ , dividido entre el número de ánodos más 0.029  $\Omega$ . Como resistencia total de la cama anódica se obtiene el valor de 0.90  $\Omega$ , lo cual está dentro del límite de 0.94  $\Omega$ .

Otra consideración importante en la selección del número de ánodos es la vida deseada para los mismos, esto se discutirá un poco más adelante, sin embargo, si el número de ánodos propuesto no satisface la expectativa de vida, se pueden utilizar más ánodos.

#### **4.4.1.2.2 Camas anódicas de ánodos galvánicos**

El diseño de camas anódicas de ánodos galvánicos involucra procedimientos similares a los de corriente impresa, sin embargo, las gráficas difieren un poco debido a que son basadas en un cálculo con un valor conservador de 300  $\Omega\cdot\text{cm}$  para el *backfill* de

los ánodos. En la figura 10 se observan dos configuraciones típicas para la instalación de ánodos galvánicos.



**Figura 10. Instalación típica de ánodos galvánicos de forma vertical.**

Para el diseño se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones: La resistencia con el suelo de un ánodo de 17 libras empacado con *backfill* es de alrededor de  $7.17 \Omega$  en un suelo de  $1000 \Omega \cdot \text{cm}$ . Para ánodos más grandes, este valor puede variar de  $3.48 \Omega$  para ánodos con sección de 1.4 x 1.4 pulgadas a  $3.38 \Omega$  para ánodos con sección de 2 x 2 pulgadas en un suelo de  $1000 \Omega \cdot \text{cm}$ . Como se mencionó, éstos cálculo son conservadores, si se utiliza un *backfill* con una resistividad de  $50 \Omega \cdot \text{cm}$ , los valores bajan a 6.36, 2.94 y 2.92 respectivamente.

En la figura 11 se encuentran dos gráficas para el diseño, la primera para ánodos de Magnesio de 17 libras empacados con *backfill* y la segunda para ánodos de 5 pies de largo ya sea de Magnesio o de Zinc. Ambas gráficas son para camas anódicas con 15 pies de espaciamiento entre cada ánodo y pueden ser desarrolladas con los métodos proporcionados en la sección de camas anódicas de corriente impresa.

Como un ejemplo en el diseño de camas anódicas de ánodos galvánicos se propone el siguiente: se tiene un requerimiento de corriente de 0.5A para desplazar el voltaje de una tubería -1.0V en un suelo de  $800 \Omega \cdot \text{cm}$  empleando ánodos de magnesio de 2x2x60 pulgadas. Se asume también que los ánodos estarán espaciados a 15 pies, que la distancia entre la cama anódica es de 20 pies, y que el cable utilizado para las conexiones es AWG 8. La resistencia entre la tubería enterrada y el suelo en el sitio de la instalación es de  $0.4 \Omega$ . El potencial disponible desde el ánodo de Magnesio se debe calcular ahora de la siguiente manera: el potencial teórico (1.55V) menos el potencial necesario para proteger la tubería (1.0V) menos el potencial de polarización del ánodo (0.1V), lo cual da un valor de 0.45V, mediante la ley de Ohm se calcula la resistencia máxima permisible en el sistema:  $0.45\text{V}/0.5\text{A} = 0.90 \Omega$ .

De los  $0.90 \Omega$  permisibles se deben sustraer la resistencia de la tubería con el suelo ( $0.4 \Omega$ ) y la resistencia del cable de cobre, el cual se considera de 35 pies para permitir suficiente cable para conexiones y estaciones de monitoreo ( $0.02 \Omega$ ) con lo cual nos queda una resistencia máxima permisible de  $0.48 \Omega$ , la cual al transformar a un suelo de  $1000 \Omega \cdot \text{cm}$  se convierte en  $0.6 \Omega$ .

Al observar la gráfica de la figura 11, se puede observar que el número mínimo de ánodos necesarios es 7, luego se obtienen los valores de la gráfica para las resistencias que en el caso de los ánodos es de  $0.55 \Omega$ , lo cual se debe convertir para un suelo de resistividad de  $800 \Omega \cdot \text{cm}$  y al sumarle la resistencia interna del ánodo ( $0.60 \Omega / 7$ ) y la resistencia de 45 pies del cable de cobre ( $0.30 \Omega$ ) se obtiene el valor de  $0.556 \Omega$ , lo cual se encuentra por arriba del límite de  $0.48 \Omega$ . Al aumentar el número de ánodos mediante prueba y error se encuentra que 9 ánodos son el número mínimo para cubrir el requerimiento de corriente dentro de los límites permisibles de resistencia, siendo la resistencia de  $0.466 \Omega$ .

Cabe mencionar una vez más que en los cálculos realizados fue empleada una resistividad de  $300 \Omega \cdot \text{cm}$  para el *backfill*, y al utilizar un valor de  $50 \Omega \cdot \text{cm}$  la resistencia interna del ánodo disminuiría pudiendo utilizar un número menor de ánodos.

Debe considerarse también la expectativa de vida de los ánodos para elegir el número de ánodos.

A continuación se presenta información útil en la selección de materiales de ánodos de sacrificio, tamaños y los cálculos necesarios para determinar la vida estimada.

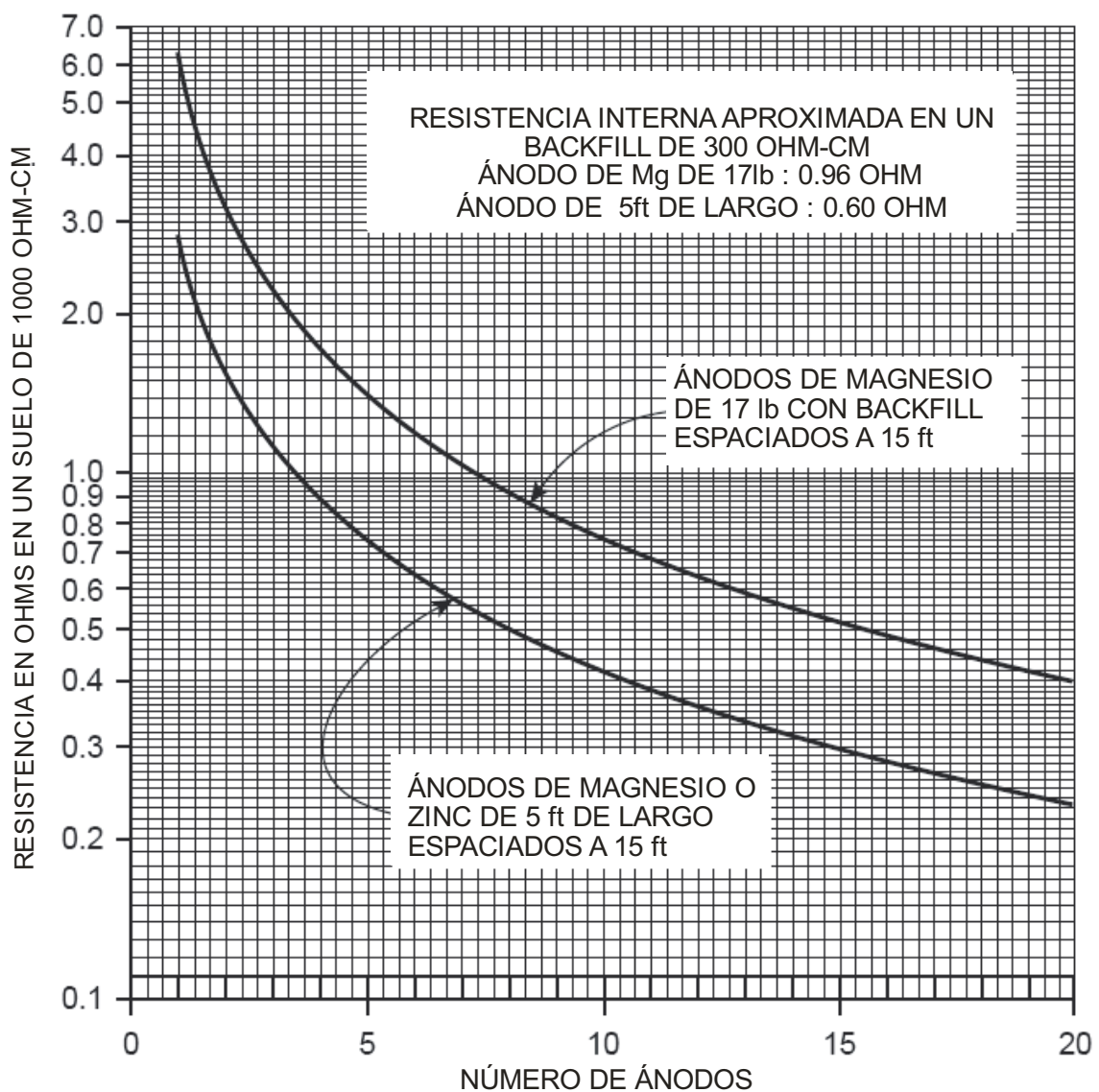


Figura 11. Gráfica de resistencia para una cama de ánodos galvánicos verticales. [11]

#### 4.4.2 Selección de los ánodos

##### 4.4.2.1 Selección de ánodos galvánicos

Los metales más comúnmente utilizados como ánodos de sacrificio son el Magnesio (Mg) y el Zinc (Zn). En la tabla 7 se presentan las características principales de los ánodos de Mg. La composición química para una aleación típica H-1 se muestra en la tabla 8. En la tabla 9 se muestran algunos de las dimensiones y pesos ofrecidos por los fabricantes para los ánodos de Mg. Las características de los ánodos de Zn se presentan en la tabla 10. En la tabla 11 se puede observar la composición química de dos aleaciones típicas en los ánodos de Zn. Los ánodos de Zn también están disponibles en una gran variedad de formas y éstas se exhiben en la tabla 12, la mayoría de ellos tienen una forma alargada para tener una baja resistencia en el contacto con el relleno (*backfill*), aunque también es común encontrarlos en tiras de alambón con núcleo de acero. En el mercado es común encontrar los ánodos ya empacados en conjunto con el *backfill*, listos para la instalación.

<b>Características de los ánodos de Magnesio</b>	
Gravedad específica	1.94
Amp-hora por libra, valor teórico	1000
Eficiencia de corriente, %	50
Amp-hora por libra, valor real	500
Potencial de disolución, V vs. CSE	-1.50 a -1.55
Polarización de tubería, V vs. CSE	0.55

**Tabla 7. Características de los ánodos de Magnesio [11]**

<b>Elemento</b>	<b>Grado A</b>	<b>Grado B</b>	<b>Grado C</b>
Aluminio	5.3 – 6.7	5.3 – 6.7	5.0 – 7.0
Manganeso	0.15 min.	0.15 min.	0.15 min.
Zinc	2.5 – 3.5	2.5 – 3.5	2.0 – 4.0
Silicio	0.10 máx.	0.30 máx.	0.30 máx.
Cobre	0.02 máx.	0.05 máx.	0.30 máx.
Níquel	0.002 máx.	0.003 máx.	0.10 máx.
Hierro	0.003 máx.	0.003 máx.	0.003 máx.
Otro	0.30 máx.	0.30 máx.	0.003 máx.
Magnesio	Restante	Restante	Restante

**Tabla 8. Composición química de la aleación H-1 para ánodos de Magnesio, % en peso [11]**



Tipo de ánodo	Alto, mm.	Ancho, mm.	Largo, mm.	Masa, Kg.
3 libras	76	76	114	1.4
5 libras	76	76	191	2.3
9 libras	51	51	686	4.1
9 libras	76	76	343	4.1
17 libras	51	51	1295	7.7
17 libras	76	76	648	7.7
20 libras	51	51	1524	9.1

**Tabla 9. Dimensiones típicas de los ánodos de Magnesio [11]**

Características de los ánodos de Zinc	
Gravedad específica	7
Amp-hora por libra, valor teórico	372
Eficiencia de corriente, %	90
Amp-hora por libra, valor real	335
Potencial de disolución, V vs. CSE	-1.10
Polarización de tubería, V vs. CSE	0.20

**Tabla 10. Características de los ánodos de Zinc [11]**

Elemento	ASTM B-418 Tipo I	ASTM B-418 Tipo II
Aluminio	0.1 – 0.5	0.005 máx.
Cadmio	0.02 – 0.07	0.003 máx.
Hierro	0.005 máx.	0.0014 máx.
Plomo	0.006 máx.	0.003 máx.
Cobre	0.005 máx.	0.002 máx.
Zinc	Restante	Restante

**Tabla 11. Composición química típica de los ánodos de Zinc, % en peso [11]**

Tipo de ánodo	Alto, mm.	Ancho, mm.	Largo, mm.	Masa, Kg.
5 libras	35.5	35.5	228.5	2.3
12 libras	35.5	35.5	609.6	5.4
18 libras	35.5	35.5	914.4	8.1
30 libras	35.5	35.5	1524	13.5
30 libras	50.8	50.8	762	13.5
45 libras	50.8	50.8	1143	20.4
60 libras	50.8	50.8	1524	27.2

**Tabla 12. Dimensiones típicas de los ánodos de Zinc [11]**

A pesar de que el Aluminio (Al) tiene un mayor contenido energético teórico en términos de Amp-hora por libra que el Zinc y el Magnesio, no ha probado tener una alta eficiencia en términos prácticos debido a problemas asociados con mantenerlo eléctricamente activo y eficiente. Por lo anterior, se prefiere en la práctica el uso de ánodos galvánicos de Mg y Zn.

Los ánodos de aluminio son utilizados básicamente para aplicaciones de protección catódica en ambientes marinos, lo cual no se tratará aquí.

Para tener una operación confiable en las instalaciones en suelos, los ánodos de Zn y Mg deben ser utilizados en conjunto con un *backfill* (relleno) que no es más que un químico que los rodea completamente. Existen varias razones para utilizar un *backfill*, con el ánodo rodeado de un material de composición química homogénea, la corriente proporcionada es más eficiente, si el ánodo estuviera en contacto directo con el suelo, heterogeneidades en el suelo podrían dar lugar a procesos de corrosión localizada en el ánodo provocando un consumo no uniforme del mismo. En la interacción con fosfatos, carbonatos y bicarbonatos (existentes en el suelo), los ánodos de Zn pueden desarrollar capas pasivas y así dejar de producir cantidades de corriente útiles para la protección. Los carbonatos y bicarbonatos influenciarán al Mg de la misma manera, mientras que los cloruros inducen la auto-corrosión de los ánodos de Mg y disminuyen su eficiencia.

El *backfill* ayuda en la absorción de humedad del suelo que lo rodea, manteniendo así una humedad adecuada alrededor del ánodo, para mantener una resistividad baja.

Para definir cuál de los ánodos será seleccionado para nuestro sistema de protección, existe una primera regla básica: En un suelo de resistividad baja (menor a  $1500 \Omega \cdot \text{cm}$ ) se utilizarán ánodos de Zinc, mientras que en suelos con valores de resistividad más altos ( $1500$  a  $10000 \Omega \cdot \text{cm}$ ) se utilizarán ánodos de Magnesio.

Además de esto se debe considerar la vida estimada que los ánodos pueden otorgar, ya que en ocasiones los ánodos de Zinc pueden ofrecer la misma protección sin un gasto elevado de corriente, lo cual alarga la vida del ánodo significativamente.

#### **4.4.2.2 Selección de ánodos para corriente impresa**

Los materiales popularmente utilizados en la actualidad como ánodos para sistemas de corriente impresa incluyen el grafito, ánodos de hierro fundido al alto silicio, de mezcla de óxidos metálicos, platino y acero.

#### 4.4.2.2.1 Ánodos de grafito

Los ánodos de grafito pueden ser obtenidos en varios tamaños, aunque el más común para la protección de tuberías es el 3in en diámetro por 60in de largo. Por lo general son entregados por el fabricante con cables de cobre aislados con polietileno de alto peso molecular. Las especificaciones de composición química para los ánodos de grafito son de 99.80% de carbón y 0.20% de ceniza. Las dimensiones más comunes para los ánodos de grafito se pueden observar en la tabla 13.

Dimensiones del ánodo, in		Masa del ánodo, lb.
Diámetro	Largo	
3	30	13
4	40	35
3	60	27
4	80	70

**Tabla 13. Dimensiones típicas de los ánodos de grafito.**

El grafito es un material frágil y por lo tanto estos ánodos deben tratarse con las debidas precauciones. Cuando el ánodo es enterrado en un *backfill* carbonáceo, por lo general se establece una corriente de salida de hasta un ampere por pie cuadrado ( $1A/ft^2$ ). Un ánodo de las dimensiones típicas mencionadas al inicio de ésta sección puede tener una salida máxima de alrededor de cuatro amperes, lo cual se debe tomar en cuenta al diseñar la cama anódica. Los ánodos de grafito son consumidos a una velocidad no mayor a las dos libras por ampere por año cuando la corriente se descarga en un electrolito como el suelo. Sin embargo, cuando se utiliza un *backfill* carbonáceo, la mayoría del material consumido es *backfill* y no el ánodo.

#### 4.4.2.2.2 Ánodos de hierro fundido al alto silicio

Estos ánodos contienen normalmente entre 14 y 15% de Silicio (Si) más otros elementos en menores cantidades.

Las aleaciones de Si se comportan de manera diferente a las fundiciones de hierro comunes al momento de descargar corriente, ya que las fundiciones de hierro tienen una

velocidad de consumo de alrededor de 20 libras por ampere al año, mientras que las aleaciones de Si reportan velocidades que van de 0.1 a 0.25 libras por ampere por año. El material es algo frágil y debe ser tratado con las debidas precauciones.

#### **4.4.2.2.3 Ánodos de mezcla de óxidos metálicos**

Estos ánodos se encuentran disponibles en una gran variedad de formas y tamaños, por lo general la mezcla de óxidos metálicos es un recubrimiento aplicado a núcleos metálicos como Titanio o Niobio. Estos recubrimientos tienen una excelente conductividad, son resistentes a los ambientes ácidos, son químicamente estables y tienen velocidades de consumo relativamente bajas. Los requerimientos para este tipo de ánodos especifican que se deben de emplear en conjunto con material de *backfill* carbonáceo.

#### **4.4.2.2.4 Ánodos de platino y niobio platinado**

Este tipo de ánodos también se encuentra disponible en una gran variedad de formas y tamaños, existen en forma de barra y también en forma de alambre, también puede variar el espesor del recubrimiento de platino. Por lo general están compuestos de un núcleo metálico de Cobre rodeado de un sustrato de Niobio, el consumo del platino es extremadamente bajo, de 40 a 80 miligramos por ampere por año. Para alcanzar la vida de operación diseñada, se puede variar el espesor del recubrimiento, pudiendo variar éste entre 25, 50 y 100 micro pulgadas. Para tener un desempeño óptimo, este tipo de ánodos deben usarse con un *backfill* carbonáceo.

El término *backfill* carbonáceo es empleado para describir el relleno de material que rodea la cama anódica. Existen tres materiales que entran en esta descripción: “ceniza” de coque de carbón, “ceniza” de coque de petróleo calcinado y partículas de grafito de origen natural o fabricadas por el hombre. Todos ellos son básicamente carbón de baja resistividad. El término “ceniza” es empleado para describir un material finamente

dividido y para aplicaciones de protección catódica se pueden obtener tamaños de malla específicos.

Un *backfill* carbonáceo tiene dos propósitos cuando rodea ánodos de sistemas de corriente impresa:

- Incrementar el tamaño de ánodo para tener una menor resistencia del ánodo hacia el medio
- Disminuir el consumo del ánodo resultante de la descarga de corriente

El segundo propósito requiere de un buen contacto entre las partículas del *backfill* y el ánodo mismo. Para lograr esto, el *backfill* debe ser aglomerado sólidamente alrededor del ánodo. Ocasionalmente, las condiciones del subsuelo pueden impedir una presión adecuada de ésta aglomeración, o pueden permitir que se relaje con el tiempo, en ese caso, mucha de la corriente sería descargada directamente del ánodo al electrolito. Esto disminuye la vida del ánodo. La velocidad de consumo del *backfill* no debe superar las dos libras por ampere por año.

Todo el sistema de cableado subterráneo que sea parte de la cama anódica, tiene un potencial positivo con respecto al suelo. Si el cableado no está perfectamente aislado, éste se corroerá en dos y suspenderá total o parcialmente la corriente de protección. Por lo tanto, se deben usar cables con aislantes de primera calidad.

Los aislantes deben tener por lo menos un nivel de aislamiento de 600V y ser aptos para enterrarse directamente en el suelo. Comúnmente es utilizado el cable que tiene un aislamiento de polietileno de alto peso molecular.

Durante la instalación el cable debe ser inspeccionado de manera cuidadosa para asegurarse completamente de que no hay defectos tales como raspaduras o cortaduras que puedan presentar problemas en un futuro. Cualquier defecto como los antes mencionados debe ser encapsulado en material que lo aisle eléctricamente. Es

importante seleccionar un material para backfill que no tenga piedras filosas o algún otro material que pueda representar un riesgo para los cables.

#### 4.4.3 Cálculo de la vida útil de los ánodos

Si se conoce la descarga de corriente de un ánodo galvánico de peso conocido, se puede calcular su vida útil. Este cálculo está basado en el valor teórico de ampere hora por libra, la eficiencia de corriente y el factor de utilización, el cual es comúnmente utilizado como 85%.

Para el Magnesio, la vida estimada puede ser determinada mediante la siguiente ecuación:

$$Vida(años) = \frac{0.116 * Masa.del.ánodo(lb) * Eficiencia * Factor.utilización}{Corriente.de.diseño(A)}$$

Para el Zinc, la vida estimada puede ser determinada de manera similar mediante la siguiente ecuación:

$$Vida(años) = \frac{0.0424 * Masa.del.ánodo(lb) * Eficiencia * Factor.utilización}{Corriente.de.diseño(A)}$$

En el caso de los ánodos de grafito la vida del sistema se puede calcular en base al número de ánodos, a la velocidad de consumo del ánodo, la corriente requerida, el factor de utilización y la masa de cada ánodo. Se define de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$Vida(años) = \frac{Factor.de.utilización * Número.de.ánodos * Masa.del.ánodo}{Velocidad.de.consumo * Corriente.requerida}$$

Donde las unidades correspondientes son las siguientes: La masa del ánodo en libras, la velocidad de consumo en libras/ampere-año, la corriente requerida en amperes y el factor de utilización en decimales.

## **4.5 Detalles de la instalación**

### **4.5.1 Sistemas de corriente impresa**

En los sistemas de protección catódica por corriente impresa los rectificadores de corriente son uno de los elementos principales. Dichos equipos tienen los siguientes componentes principales:

- Un transformador para pasar de corriente alterna de alto voltaje a corriente directa de bajo voltaje
- Un arreglo que permita seleccionar el voltaje de salida
- Un elemento rectificador
- Una protección para montaje a la intemperie

Comúnmente se utilizan unidades monofásicas como trifásicas. En zonas donde prevalecen las tormentas eléctricas, es recomendable proveer al sistema de una protección contra daños por rayos.

En el mercado se pueden encontrar tres tipos de protección exterior dependiendo del ambiente en que se encuentre la estructura. Casetas ventiladas que proveen de aire con convección forzada (ventilador) al rectificador son frecuentemente empleadas en las instalaciones en tuberías. En atmósferas marinas o industriales, consideradas altamente corrosivas, el equipo puede ser inmerso en aceite en una caseta similar a un tanque. Para territorios sujetos a peligros y explosivos, existen casetas a prueba de explosiones con unidades sumergibles en aceite.

El tamaño del rectificador es medido en la capacidad que éste tenga para una salida de corriente y depende básicamente del requerimiento de corriente y el voltaje necesario para forzar a ésta corriente a lo largo de la tubería. En las secciones anteriores se ve detalladamente el proceso para determinar los requerimientos de corriente.

Una vez que se tengan los valores de corriente y voltaje necesarios, a pesar de que éstos son cálculos conservadores, se debe agregar de un 15 a un 25% extra de

capacidad del rectificador, esto permitirá mantener la estructura protegida una vez que el recubrimiento comience a deteriorarse y/o que los ánodos comiencen a desgastarse y presenten una resistencia mayor.

#### **4.5.1.1 Especificaciones de un rectificador de corriente**

Una vez decidido el tamaño de un rectificador, las especificaciones deben comprender como mínimo la siguiente información:

- Entrada de corriente alterna, número de fases y frecuencia, por ejemplo: 120V, monofásico, 60Hz.
- Salida máxima en amperes y volts.
- Enfriado por aire, inmerso en aceite o inmerso en aceite en una caseta antiexplosiones.
- Montable en un poste, en la pared o en el piso.
- Tipo de silicio utilizado en el elemento rectificador.
- Temperatura máxima de operación
- Equipo protector: Interruptor del circuito en CA, bobina del transformador aislada, supresor de picos, etc.
- Instrumentos: Voltímetro y amperímetro con su precisión
- Especificaciones de la caseta: Aluminio anodizado, galvanizado, o acero pintado.

Cuando los rectificadores disponibles en el mercado no cumplen con los requerimientos determinados, es necesario especificar los accesorios adicionales utilizados para aumentar el desempeño del rectificador. Éstos accesorios pueden ser un filtro de salida para aumentar la eficiencia del rectificador, terminales positivas adicionales, medidores de corriente adicionales, un diseño o acabado especial para la caseta, etc.



#### 4.5.1.2 Eficiencia del rectificador

A pesar de que los rectificadores que operan con entradas de voltaje trifásico son más eficientes que los de entrada monofásica, es difícil que en todas las ubicaciones donde se requiere la instalación de un rectificador la conexión trifásica se encuentre disponible. Para obtener una eficiencia alta por parte del rectificador, es necesario utilizar un elevado porcentaje del voltaje que éste puede proporcionar. La eficiencia de un rectificador se puede obtener con la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia, \%} = \frac{\text{Potencia.de.salida.de.CD}}{\text{Potencia.de.entrada.de.CA}} * 100$$

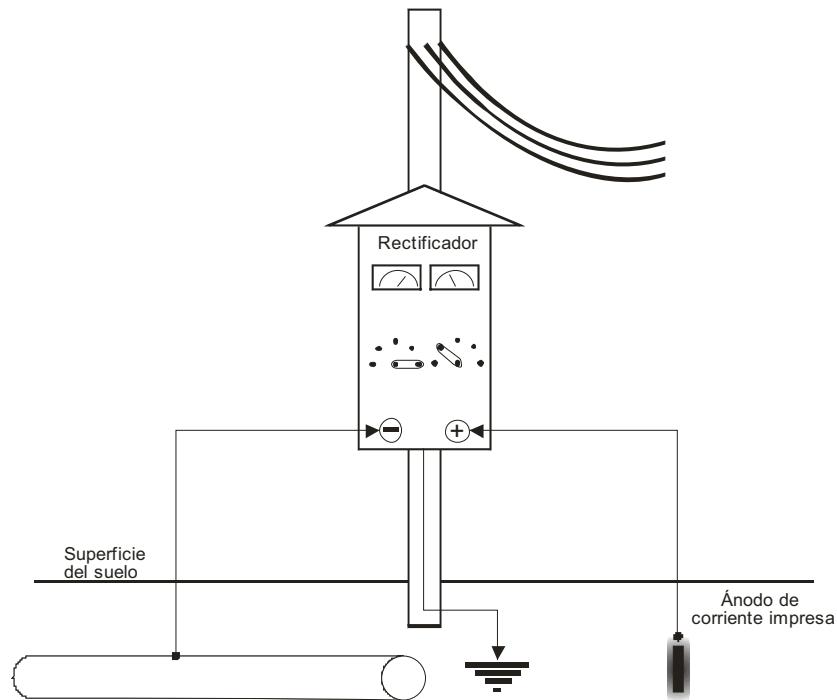
Donde la potencia de salida en corriente directa es la corriente de salida multiplicada por el voltaje de salida y la potencia de entrada en corriente alterna se puede medir con un vatímetro.

#### 4.5.1.3 Detalles de la instalación de un rectificador

A pesar de que existen varias formas de instalar un rectificador utilizadas por las compañías petroleras, no se ha definido una como estándar, la instalación de cada rectificador depende de las condiciones específicas del sitio y las preferencias del ingeniero de corrosión. A continuación se presenta un diagrama de instalación de modo genérico para que el ingeniero de corrosión conozca los elementos básicos de la instalación.

En la figura 12 se observa un esquema para la instalación de un rectificador en un poste, indicando las conexiones principales al sistema de tierra física, a la cama anódica y a la tubería.

El siguiente es sólo un diagrama ilustrativo que puede servir como base para el diseño de la instalación de un rectificador y no pretenden en ningún momento establecer un estándar. El ingeniero de corrosión es el responsable de determinar las especificaciones de cada instalación.

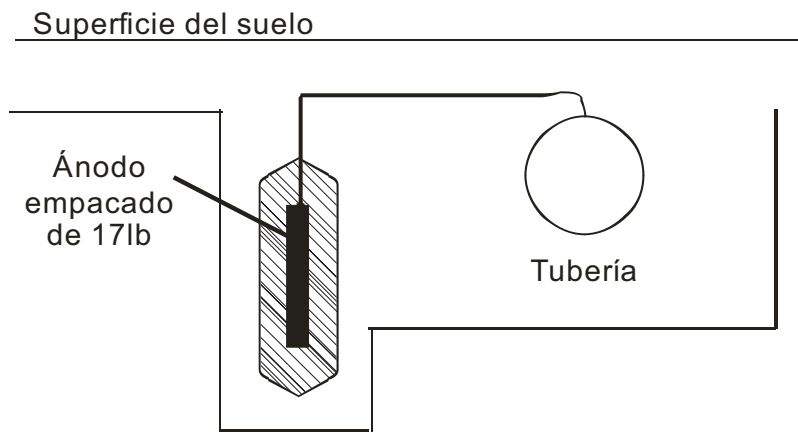


**Figura 12. Diagrama general para la instalación de un rectificador en un poste.**

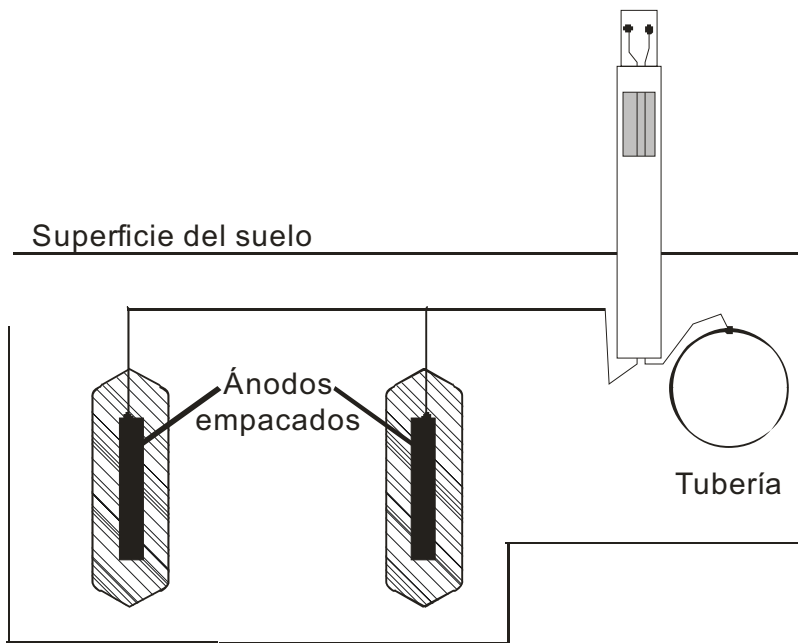
#### **4.5.2 Sistemas de ánodos galvánicos**

Las instalaciones de los sistemas de ánodos galvánicos son simples en comparación con las instalaciones comunes de corriente impresa. El diseño más simple de instalación es aquel en el que se utiliza un solo ánodo y se conecta a la tubería en un punto donde se debe corregir un problema de corrosión. Este diagrama se ilustra en la figura 13. Para estas aplicaciones se utilizan comúnmente los ánodos de Magnesio empacados de 17, 20 y 32 libras, aunque los ánodos de zinc se pueden utilizar en suelos de baja resistividad, como se había mencionado antes. Cuando se utilizan varios ánodos para un sistema de protección, éstos son conectados por un cable guía, que la mayoría de las veces está conectado a una estación de monitoreo, para poder medir la corriente producida por los ánodos y así calcular la vida de la cama anódica. Dicho arreglo se observa en la figura 14.

Si se utilizan varios ánodos para una cama anódica, éstos deben encontrarse en línea recta, para minimizar la resistividad de la cama anódica. Cuando los ánodos se colocan de manera paralela a la tubería, si los ánodos son de Magnesio, se deben de colocar a una distancia de al menos 15 pies y si éstos son de Zinc la distancia debe ser tan pequeña como 5 pies, o incluso menor, si se cuenta con un espacio limitado. En el caso de contar con un espacio amplio, los ánodos de Zinc se deben colocar a una distancia mayor a los 10 pies para permitir una óptima distribución de la corriente.

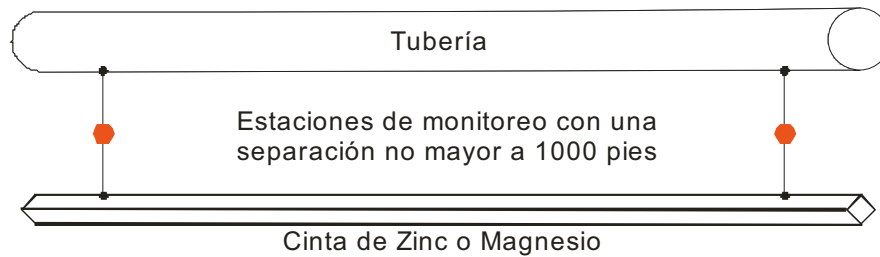


**Figura 13. Diagrama para la instalación de un único ánodo galvánico.**



**Figura 14. Diagrama para la instalación de varios ánodos con una estación de monitoreo.**

Para algunas aplicaciones, especialmente donde se tiene un alto requerimiento de corriente de manera constante, se utilizan ánodos de Magnesio o Zinc en forma de tira con una sección en forma de rombo. El diagrama general para estas instalaciones se puede observar en la figura 15.

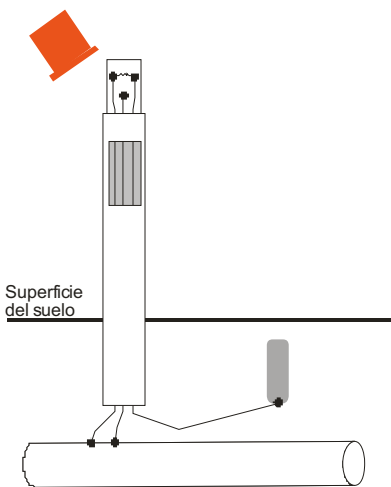


**Figura 15. Diagrama general para la instalación de una tira de Zinc o Magnesio.**

El núcleo de estos ánodos es de acero, y proveerá a lo largo de la cinta una conductividad eléctrica una vez que el Magnesio ó el Zinc se hayan consumido, debido a que las diferencias en la resistividad del suelo a lo largo de la tubería provocarán diferentes corrientes de protección, y consecuentemente diferentes velocidades de consumo del ánodo. Las conexiones entre la tubería y el núcleo del ánodo se deben realizar a ciertos intervalos, los cuales no deben de ser muy grandes (menor a 1000 pies) para evitar que la caída de voltaje sea considerable. Dichas conexiones se pueden realizar en conjunto con estaciones de monitoreo para estimar la vida remanente en el ánodo mediante la velocidad de consumo. Este tipo de ánodos, al igual que todos los demás necesita de un *backfill* apropiado para realizar la instalación.

Las estaciones de monitoreo para camas anódicas de varios ánodos pueden ser instaladas como se observa en la figura 16, La resistencia en la estación de monitoreo es de sólo  $0.01 \Omega$ , por lo cual no afecta la corriente, sin embargo, permite medirla con un voltímetro. La terminal adicional se utiliza para medir el potencial de la tubería con el suelo, y permite determinar si la protección catódica es suficiente en el punto donde se lleva a cabo la medición.

En la protección con ánodos galvánicos, todo el sistema de cableado suele estar protegido, esto quiere decir que si alguno de los cables tiene algún defecto en su recubrimiento, el cobre no será corroído como en el caso de los cables conectados en un sistema de corriente impresa. Sin embargo, este aspecto no se debe descuidar y la integridad de todos los componentes del sistema debe ser protegida en todo momento para evitar que la eficiencia de corriente disminuya. En este sentido, lo más importante, desde el punto de vista de conexiones es la conexión entre el cable conductor y la tubería de acero, ésta debe estar perfectamente aislada de la humedad y las corrientes eléctricas, ya que de lo contrario, puede generar severos problemas de corrosión en la tubería que seguramente no podrán ser atenuados por la corriente ofrecida por los ánodos.



**Figura 16. Esquema de una estación de monitoreo con una resistencia para medir corriente.**

#### **4.6 Guías de instalación**

Esta sección tiene como objetivo darle al ingeniero de corrosión instrucciones especiales para la instalación de tuberías recubiertas, estaciones de monitoreo, sistemas de corriente impresa así como prácticas de inspección.

#### **4.6.1 Tuberías con un recubrimiento**

Las consideraciones que se deben tomar cuando se trabaja con tuberías con recubrimiento comienzan, de ser posible, en la etapa de aplicación del recubrimiento, en esta etapa, el ingeniero de corrosión debe inspeccionar que todos y cada uno de los pasos para aplicar un recubrimiento se lleven a cabo de acuerdo a los estándares indicados en la tabla 5. El siguiente paso es supervisar el transporte de la tubería hasta la ubicación donde será instalada, así como la descarga del transporte, los cuales se deben de realizar con extremo cuidado para minimizar los daños al recubrimiento. En éste caso se debe contar con maquinaria que permita bajar las tuberías hasta el suelo, nunca se deben tirar directamente del camión, además nunca se deben de colocar directamente en el suelo, a menos que éste se encuentre libre de objetos que puedan dañar al recubrimiento. Para sujetar las tuberías, se deben utilizar arneses de tela, nunca cadenas ni cables o alambres. Los arneses deben ser lo suficientemente grandes para soportar el peso y movimiento de las tuberías sin dañar el recubrimiento.

Una vez en el suelo, la tubería debe ser inspeccionada para detectar vacancias en el recubrimiento, el personal que opera el detector de vacancias debe estar calificado para ello, así como también el personal que llevará a cabo la reparación de las vacancias para que el resultado final tenga las mismas propiedades eléctricas y mecánicas que el recubrimiento original.

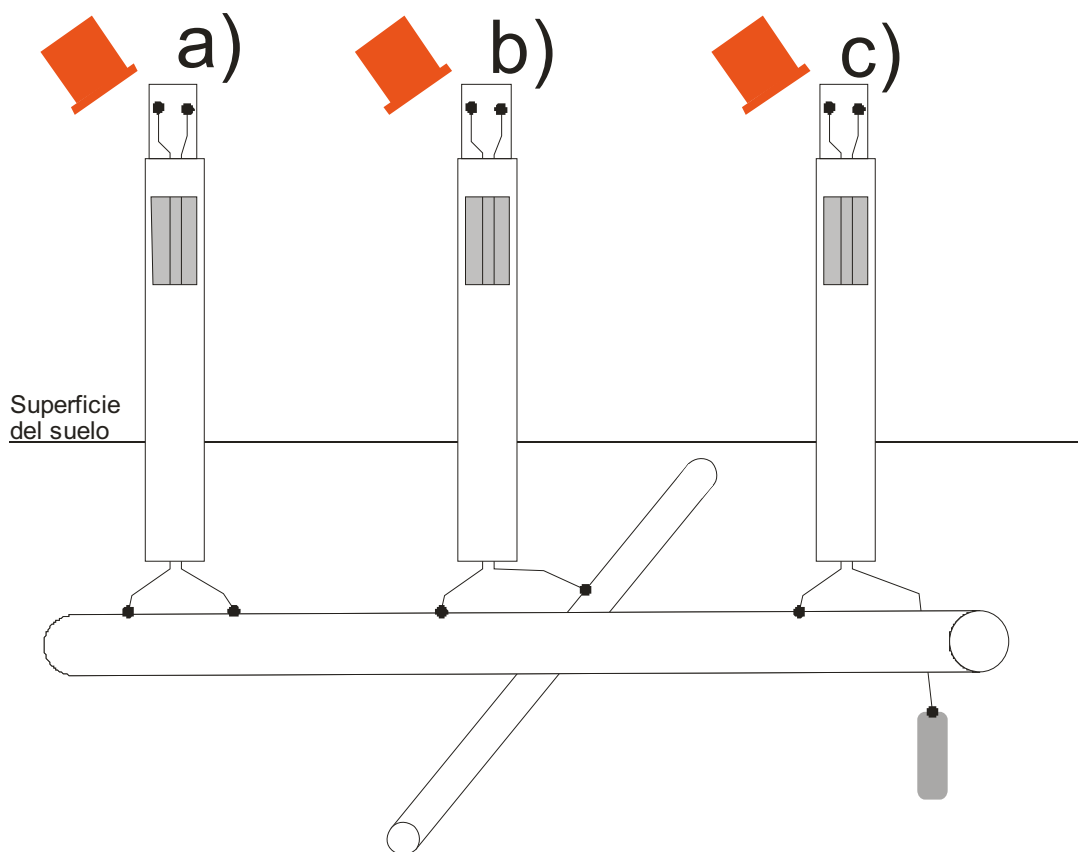
Cuando se utilizan buenas prácticas de instalación de tuberías con recubrimientos se obtienen excelentes resultados al disminuir los requerimientos de corriente. Es responsabilidad del ingeniero de corrosión inspeccionar todas las operaciones realizadas con las tuberías recubiertas.

#### **4.6.2 Instalación de estaciones de monitoreo**

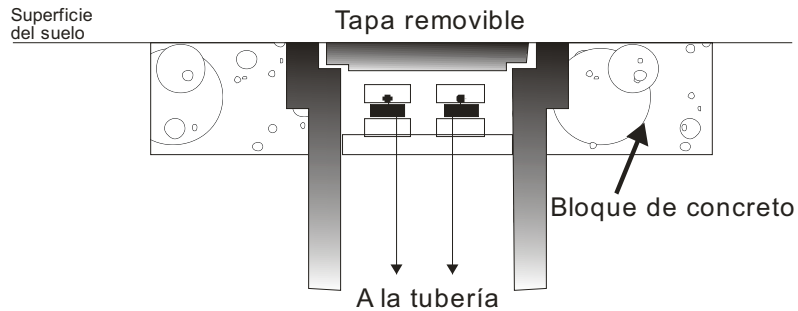
Las estaciones de monitoreo son el mejor medio para examinar el estado de una tubería enterrada, mediante su potencial eléctrico con respecto al suelo, así como para

medir corrientes aplicadas por los ánodos. Por esta razón, las estaciones de monitoreo deben resistir el paso de los años, tomando en cuenta que se encuentran a la intemperie.

En la figura 17 se ilustran los principales tipos de estaciones de monitoreo. La instalación de estas estaciones debe ser tan práctica para el ingeniero de corrosión como sea posible. Habrá locaciones a lo largo de la tubería en las que no será posible instalar estaciones de monitoreo como las que se muestran en la figura 17, por lo cual se puede utilizar una a nivel del suelo, como la que se observa en la figura 18. Las estaciones instaladas a nivel del suelo se deben ubicar perfectamente en los planos, con respecto a puntos de referencia y de ser posible, con las coordenadas de GPS para evitar que se “pierdan” a causa del pasto que las pueda llegar a cubrir.



**Figura 17. Principales tipos de estaciones de monitoreo montadas en poste. a) Estación para medir potencial o corriente de la tubería. b) Estación para medir potencial de la tubería protegida y tubería foránea. c) Estación para medir la corriente aplicada por los ánodos.**



**Figura 18. Diagrama para la instalación de una estación de monitoreo a nivel del suelo.**

Como se indicó en la tabla 6, los cables que se deben de utilizar para las conexiones en estaciones de monitoreo son AWG 12 ó 14 con un aislamiento de 600V, se utilizan éstos cables básicamente por sus propiedades mecánicas y no eléctricas. A pesar de que no existe un estándar de colores establecido para los cables, se debe utilizar la misma configuración de colores a lo largo de toda la tubería.

Antes de la instalación, el ingeniero de corrosión debe proponer el número y localización de las estaciones de monitoreo y estos datos deben estar incluidos en los planos de construcción. El espaciamiento de las estaciones de monitoreo debe encontrarse en el rango de los 800 a los 1600 metros. Sin embargo, deben instalarse estaciones adicionales en cada cruce con una tubería que no sea parte del sistema, en *casings* y en coples aislantes para verificar el estado de la protección.

#### **4.6.3 Instalación de un sistema de protección catódica**

Una vez que hemos realizado los cálculos necesarios en cuanto a la cama anódica y al rectificador, el diseño debe de ser terminado tomando en cuenta lo siguiente:

- Los ánodos deben ser transportados con sumo cuidado para evitar daño alguno.
- Las conexiones de los ánodos con los cables deben ser protegidas en todo momento, para bajar un ánodo a la cama anódica, **nunca** se debe bajar este mediante el cable, debido a que se puede dañar la conexión, provocando una fuga de corriente y la corrosión severa del cable.



- Se deben utilizar los cables indicados en la tabla 6 para las conexiones de la cama anódica, cuidando que todas las conexiones estén perfectamente aisladas. Se puede ocupar cinta aislante de excelente calidad y dar por lo menos cuatro vueltas cuidando que la cinta se adhiera adecuadamente al cable. El uso de resinas epóxicas es también recomendable para este tipo de aplicaciones.
- Al colocar el *backfill* de relleno en la cama anódica, debe tenerse en cuenta que no puede haber ningún objeto que pueda cortar alguno de los cables y también el *backfill* debe estar perfectamente apelmazado para mantener una baja resistividad.
- La ubicación del rectificador debe permitir un libre acceso para realizar inspecciones periódicas, así como tareas de mantenimiento.
- El rectificador debe ser inspeccionado por un agente de la compañía que proveerá del servicio eléctrico para confirmar que la operación bajo las condiciones de la red eléctrica es segura.
- De ser posible, se debe instalar un medidor de consumo de energía eléctrica independiente para el rectificador.

## 5. CASO ESPECÍFICO: EDIFICIO “D”. FACULTAD DE QUÍMICA

### 5.1 Consideraciones previas al diseño

#### 5.1.1 Localización

El campo de prácticas de protección catódica será diseñado tomando como base las dimensiones del jardín ubicado en la parte posterior de la nave de laboratorios de Ingeniería Química Metalúrgica de la Facultad de Química de la UNAM, con coordenadas geográficas 19°19'25.52" Norte, 99°10'42.18" Oeste, tal como se muestra en el recuadro amarillo de la figura 19.



Figura 19. Vista aérea de la localización del campo de prácticas de protección catódica

### **5.1.2 Componentes del sistema**

Dado que éste es un sistema de tuberías nuevo, se deben proponer los elementos del sistema los cuales incluyen: 5 tuberías de acero enterradas, una cubierta protectora de acero, 2 tanques de almacenamiento, estaciones de medición, una cama de ánodos galvánicos, una cama de ánodos de corriente impresa, un ánodo de Zinc en forma de tira, un rectificador de corriente y dos cajas de conexiones eléctricas.

#### **5.1.2.1 Tuberías de acero**

Las cinco tuberías de acero enterradas serán las siguientes:

- Una tubería de acero desnuda de diámetro de 2" en forma de "L" de 40 metros de largo más 6 metros de largo, respectivamente.
- Una tubería de acero de 4" de diámetro y 40m de largo recubierta con FBE, la cual se encontrará protegida físicamente en una sección por una cubierta de acero de 2 metros de largo.
- Tres secciones de 5 metros de tubería con diferentes recubrimientos, uno de cera, otro de *tape* y otro de FBE, los cuales estarán conectados a una tira de zinc.

#### **5.1.2.2 Tanques de almacenamiento**

Se protegerán dos tanques de almacenamiento de agua, uno enterrado, y el otro sobre la superficie del terreno.

#### **5.1.2.3 Estructuras foráneas**

En la ubicación donde se planea instalar el campo de prácticas de protección catódica se encuentra una tubería de acero utilizada para riego. Al no ser de una longitud muy extensa, se puede incluir en los cálculos de diseño para su protección, siendo esta la tubería de acero desnuda mencionada con anterioridad.

#### **5.1.2.4 Posibles fuentes de corrientes de interferencia**

La fuente de corrientes de interferencia más palpable es el sistema de tierras para pararrayos, sin embargo, prácticamente no es utilizado en las tormentas.

## 5.2 Ensayos previos al diseño

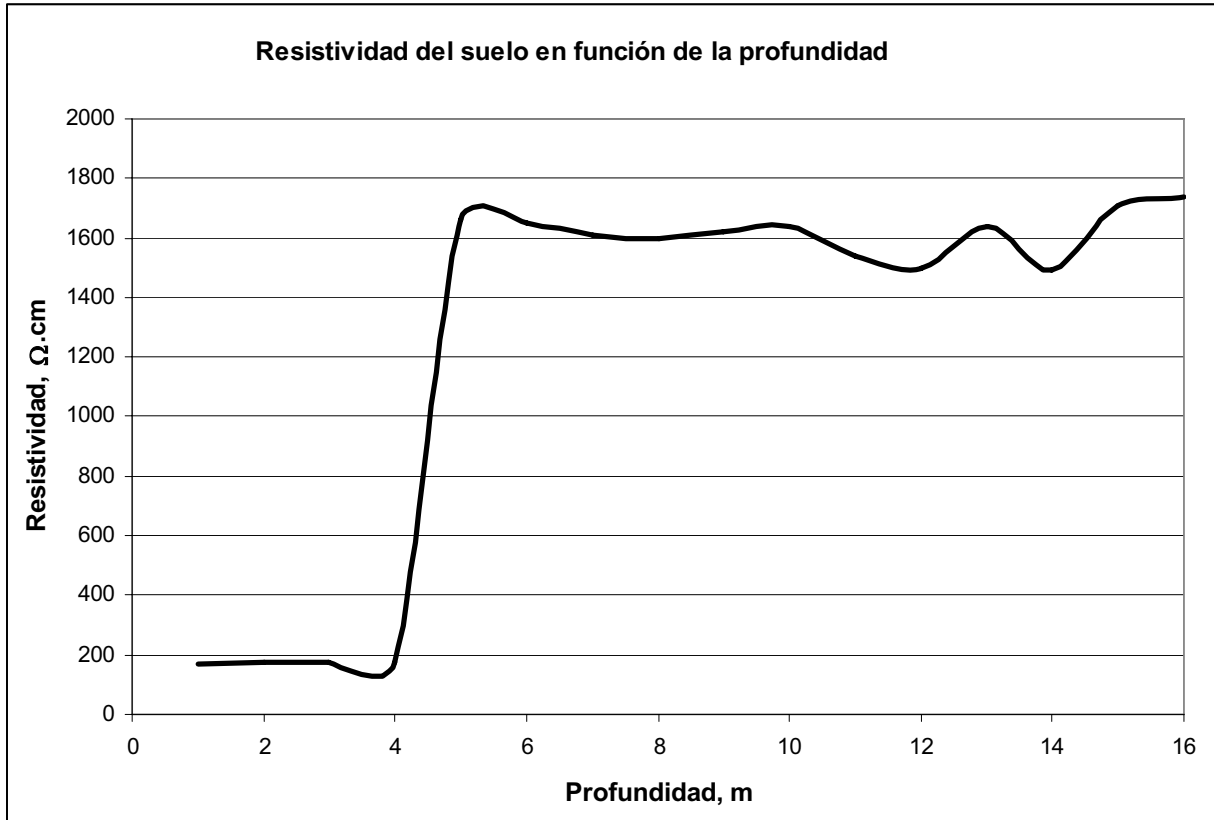
Para la etapa de diseño del campo de prácticas se elaboraron tres ensayos que arrojan información fundamental para el diseño. Se midió la resistividad del suelo, se midió la corriente necesaria para cubrir el criterio de protección de NACE de los -850mV, se realizaron análisis químicos para determinar la concentración de agentes altamente corrosivos y la capacidad del suelo de inducir corrosión por bacterias anaeróbicas.

### 5.2.1 Resistividad del suelo

Los valores de resistividad del suelo medidos por el laboratorio de corrosión son presentados en la tabla 14 y en la gráfica 1. El valor promedio de resistividad en el suelo es de 1256  $\Omega\cdot\text{cm}$ , sin embargo, el valor que será utilizado para los cálculos correspondientes al diseño es el de 175  $\Omega\cdot\text{cm}$  debido a que es la capa en la que se encontrarán los ánodos y las tuberías.

Profundidad, m	Resistividad, $\Omega\cdot\text{cm}$
1	170
2	177
3	176
4	177
5	1660
6	1650
7	1610
8	1600
9	1620
10	1640
11	1540
12	1500
13	1640
14	1490
15	1710
16	1740

**Tabla 14. Resistividad del suelo a diferentes profundidades**



**Gráfica 1. Resistividad del suelo en función de la profundidad**

Como se puede observar en la gráfica 1, se distinguen claramente dos estratos en el subsuelo, el primero que comprende de la superficie hasta los cuatro metros de profundidad, donde se encontrarán enterradas las tuberías. Esta primera capa tiene un valor promedio de resistividad de  $175\Omega\cdot\text{cm}$ , lo cual nos indica que es un suelo muy corrosivo, de acuerdo a la tabla 3.

La segunda capa del subsuelo presenta una mayor resistividad, esta capa está comprendida a partir de los cinco metros de profundidad y tiene como valor de resistividad promedio  $1617\Omega\cdot\text{cm}$ , lo cual nos indica que es un suelo moderadamente corrosivo, de acuerdo a la tabla 3.

El valor promedio anual de temperatura se puede considerar de  $25^{\circ}\text{C}$ .

### **5.2.2 Determinación de la corriente de protección**

Se determinó la corriente necesaria para proteger a las tuberías de acero con un sistema provisional de corriente impresa y se obtuvieron los siguientes resultados: Para polarizar una tubería hasta cubrir el criterio de los  $-850\text{mV}$  en "OFF" con un desplazamiento de potencial de  $530\text{mV}$  se empleó una corriente de  $35.79\text{A}$  y un voltaje total de  $27\text{V}$ .

### **5.2.3 Análisis químicos del suelo**

En el análisis químico realizado a las muestras de suelo no se encontraron concentraciones peligrosas de cloruros o sulfatos. Tampoco se pudo evidenciar la presencia de bacterias que pudieran ser causantes de corrosión anaerobia.

### **5.3 Consideraciones para el diseño**

Debido a que el edificio adyacente al jardín donde se localizará el campo de prácticas de protección catódica es una nave de laboratorios de ingeniería metalúrgica, se cuenta con conexiones monofásicas de  $110\text{V AC}$  y trifásicas de  $220\text{V AC}$ , por lo cual, el tipo de alimentación para el rectificador no será una limitante en la selección del mismo.

En cuanto a la resistividad, se puede considerar homogénea a lo largo del campo de prácticas, ya que su extensión no rebasa los 50 metros.

Para el sistema de ánodos galvánicos se elaborarán cálculos un sistema de ánodos de Magnesio de 5ft de largo y para ánodos de Zinc de 5ft de largo. Para el sistema de corriente impresa se utilizarán ánodos de grafito.

No se cuenta con planes de construcción a futuro para el área designada para el campo de prácticas de protección catódica y el lugar es razonablemente accesible para propósitos de instalación y mantenimiento, por lo cual se puede proceder a elaborar un plan completo de construcción.

### 5.3.1 Diseño de las camas anódicas

#### 5.3.1.1 Cama de ánodos de grafito

Se usará un arreglo de ánodos verticales como el que se muestra en la figura 8, con los ánodos colocados en una línea recta de forma paralela entre las dos tuberías de mayor extensión, la desnuda y la recubierta con FBE, a una distancia de 10ft de cada una, para minimizar la resistencia de la cama anódica con el suelo. Para el relleno se utilizará una perforación de 7ft de profundidad y 8in de diámetro con un *backfill* carbonáceo de resistividad de  $50 \Omega \cdot \text{cm}$  y los ánodos empleados serán de grafito de 3in de diámetro y 5ft de largo. Es necesario conocer la resistencia interna del ánodo. Ésta es la diferencia entre la resistencia del ánodo con el *backfill* menos la resistencia del *backfill* con el suelo. Para obtener este valor es necesario calcular la resistencia del ánodo con el *backfill* de la siguiente manera:

$$R = \frac{0.00521 * 50}{5} \left( 2.3 \log \frac{8 * 5}{0.25} - 1 \right) = 0.212 \Omega$$

Ahora se calcula la resistencia del *backfill* con el suelo como se muestra a continuación:

$$R = \frac{0.00521 * 50}{7} \left( 2.3 \log \frac{8 * 7}{0.66} - 1 \right) = 0.127 \Omega$$

Por último se obtiene la diferencia de estos dos valores y este resultado es la resistencia interna del ánodo:

$$0.212 \Omega - 0.127 \Omega = 0.085 \Omega$$

La caída de voltaje entre la cama anódica y la tubería es de 2V y la resistencia de las tuberías al suelo es de  $0.530\text{V}/35.79\text{A}=0.015\Omega$ .

Para las conexiones se utilizará cable AWG 4. El largo del cable entre los ánodos y las tuberías es de 40ft, y se considera de 44ft para darle un factor de seguridad. Con la información en la tabla 6 se sabe que la resistencia de este cable es de  $0.011\Omega$ .

El voltaje máximo aplicado por los ánodos será de  $27V - 2V = 25V$ , y siendo la corriente de  $35.79A$ , la resistencia máxima en el sistema debe ser  $0.698\Omega$ .

Con esto se tiene que la resistencia máxima permisible en la cama anódica es de:

$$0.698\Omega - 0.011\Omega - 0.015\Omega = 0.672\Omega$$

Supongamos ahora que la resistencia de la cama anódica es de  $0.600\Omega$ , los cuales al ser convertidos a un suelo de resistividad de  $1000 \Omega \cdot cm$  nos dan:

$$0.600\Omega \left( \frac{1000\Omega \cdot cm}{175\Omega \cdot cm} \right) = 3.42\Omega$$

Al observar la gráfica en la figura 9 sabemos que este valor corresponde a un ánodo, el cual presentará una resistencia de  $2.5\Omega$  en un suelo de  $1000 \Omega \cdot cm$ . Al convertir este valor a un suelo de  $175 \Omega \cdot cm$  obtenemos:

$$2.5\Omega \left( \frac{175\Omega \cdot cm}{1000\Omega \cdot cm} \right) = 0.438\Omega$$

Lo cual al sumarle la resistencia interna del ánodo que es de  $0.085\Omega$  todavía se encuentra perfectamente dentro del límite de los  $0.698\Omega$ . El paso siguiente es calcular la vida útil del ánodo:

$$Vida(años) = \frac{Factor.de.utilización * Número.de.ánodos * Masa.del.ánodo}{Velocidad.de.consumo * Corriente.requerida}$$

$$Vida(años) = \frac{0.60 * 1 * 27lb}{0.05 \frac{lb}{A * año} * 35.79A} = 9.05 \approx 9 años$$

La vida útil del ánodo de grafito para las condiciones expresadas con anterioridad es de 9 años, lo cual es un valor aceptable, tomando en cuenta que es sólo un ánodo, sin embargo, se utilizarán dos ánodos para aumentar la vida del sistema a 18 años.



### 5.3.1.2 Cama de ánodos galvánicos

En el caso de los ánodos de sacrificio también se usará un arreglo de ánodos verticales con un *backfill* preempacado como el que se muestra en la figura 10, con los ánodos colocados en una línea recta entre las tuberías desnuda y la recubierta con FBE, a una distancia de 10ft de cada una, de manera similar al ánodo de grafito. Los cálculos se realizarán con un *backfill* de resistividad de  $300 \Omega \cdot \text{cm}$ , para tener un resultado conservador y los ánodos empleados tendrán un largo de 5ft y una masa de 60lb. En primera instancia se elaborará el cálculo para los ánodos de Magnesio. La resistencia interna del ánodo se tomará como  $0.60\Omega$  como se propone en la figura 11.

La resistencia de las tuberías al suelo es de  $0.015\Omega$  y se requieren de 0.80A para desplazar el potencial de la tubería 0.75V en un sistema de ánodos galvánicos con 15ft de espaciamiento entre ellos.

Para las conexiones se utilizará cable AWG 10. El largo del cable entre los ánodos y las tuberías es de 20ft, y se considera de 22ft para tener un factor de seguridad de 10%.

Con la información proporcionada en la tabla 6 se conoce que la resistencia de este cable es de  $0.023\Omega$ .

$$E_{disponible} = E_{teórico} - E_{protección} - E_{polarización} = 1.55V - 0.75V - 0.1V = 0.70V$$

El voltaje máximo aplicado por los ánodos será de 0.7V, siendo la corriente de 0.80A, la resistencia máxima en el sistema debe ser  $0.875\Omega$ .

Con esto se tiene que la resistencia máxima permisible en la cama anódica es de:

$$R_{Cama\ anódica} = R_{total} - R_{cables} - R_{tubería} = 0.875\Omega - 0.023\Omega - 0.015\Omega = 0.837\Omega$$

Ahora se propone que la resistencia de la cama anódica sea de  $0.8\Omega$ , el cual al ser convertidos a un suelo de resistividad de  $1000 \Omega \cdot \text{cm}$  nos da:

$$0.8\Omega \left( \frac{1000\Omega \cdot \text{cm}}{175\Omega \cdot \text{cm}} \right) = 4.57\Omega$$

En la gráfica de la figura 11 sabemos que este valor corresponde a un ánodo, el cual presentará una resistencia de  $2.8\Omega$  en un suelo de  $1000\ \Omega\cdot\text{cm}$ . Al convertir este valor a un suelo de  $175\ \Omega\cdot\text{cm}$  obtenemos:

$$2.8\Omega\left(\frac{175\Omega\cdot\text{cm}}{1000\Omega\cdot\text{cm}}\right) = 0.49\Omega$$

Lo cual al sumarle la resistencia interna del ánodo que es de  $0.6\Omega$  nos da el valor de  $1.090\Omega$ , lo cual sobrepasa el límite de los  $0.837\Omega$ . Al elaborar el cálculo con dos ánodos tenemos que la resistencia es de  $1.5\Omega$  en un suelo de  $1000\ \Omega\cdot\text{cm}$ , al convertir este valor a un suelo de  $175\ \Omega\cdot\text{cm}$  tenemos:

$$1.5\Omega\left(\frac{175\Omega\cdot\text{cm}}{1000\Omega\cdot\text{cm}}\right) = 0.263\Omega$$

Al sumarle la resistencia interna del ánodo de  $0.3\Omega$  ( $0.6\Omega/2$ ) y la resistencia del cable entre los dos ánodos de  $0.017\Omega$  ( $15\times 0.00104\Omega$ ) obtenemos una resistencia de la cama anódica de  $0.58\Omega$ , lo cual se encuentra dentro de la tolerancia del sistema. El paso siguiente es calcular la vida útil del ánodo:

$$Vida(\text{años}) = \frac{0.116 * \text{Factor.de.utilización} * \text{Masa.del.ánodo} * \text{Eficiencia}}{\text{Corriente.requerida}}$$

$$Vida(\text{años}) = \frac{0.116 * 0.85 * 40 * 0.50}{0.80} = 2.47 \text{ años}$$

La vida útil de los dos ánodos es de aproximadamente dos años y medio, lo cual es un valor demasiado bajo, en este caso se pueden instalar más ánodos. Algo que debe ser tomado en cuenta es que el nivel de polarización de la tubería se estabilizará con el tiempo, y puede ser posible que la corriente necesaria disminuya, lo cual alargará la vida del ánodo.

A continuación se elaborará el cálculo para los ánodos de Zinc. La resistencia interna del ánodo se tomará como  $0.60\Omega$  como se propone en la figura 11.

La resistencia de las tuberías al suelo es de  $0.015\Omega$  y se requieren de  $0.65A$  para desplazar el potencial de la tubería  $0.55V$  en un sistema de ánodos galvánicos de Zinc con  $15ft$  de espaciamiento entre ellos.

Para las conexiones se utilizará cable AWG 10. El largo del cable entre los ánodos y las tuberías es de  $20ft$ , y se considera de  $22ft$  para tener un factor de seguridad de  $10\%$ .

Con la información proporcionada en la tabla 6 se conoce que la resistencia de este cable es de  $0.023\Omega$ .

$$E_{disponible} = E_{teórico} - E_{protección} - E_{polarización} = 1.10V - 0.55V - 0.1V = 0.45V$$

El voltaje máximo aplicado por los ánodos será de  $0.45V$ , siendo la corriente de  $0.65A$ , la resistencia máxima en el sistema debe ser  $0.69\Omega$ .

Con esto se tiene que la resistencia máxima permisible en la cama anódica es de:

$$R_{Cama\ anódica} = R_{total} - R_{cables} - R_{tubería} = 0.69\Omega - 0.023\Omega - 0.015\Omega = 0.652\Omega$$

Ahora se propone que la resistencia de la cama anódica sea de  $0.63\Omega$ , el cual al ser convertidos a un suelo de resistividad de  $1000\ \Omega \cdot cm$  nos da:

$$0.63\Omega \left( \frac{1000\Omega \cdot cm}{175\Omega \cdot cm} \right) = 3.6\Omega$$

En la gráfica de la figura 11 sabemos que este valor corresponde a un ánodo, el cual presentará una resistencia de  $2.8\Omega$  en un suelo de  $1000\ \Omega \cdot cm$ . Al convertir este valor a un suelo de  $175\ \Omega \cdot cm$  obtenemos:

$$2.8\Omega \left( \frac{175\Omega \cdot cm}{1000\Omega \cdot cm} \right) = 0.49\Omega$$

Lo cual al sumarle la resistencia interna del ánodo que es de  $0.6\Omega$  nos da el valor de  $1.090\Omega$ , lo cual sobrepasa el límite de los  $0.652\Omega$ , por lo cual se procede a elaborar el

cálculo con dos ánodos y tenemos que la resistencia es de  $1.5\Omega$  en un suelo de  $1000\Omega \cdot \text{cm}$ , al convertir este valor a un suelo de  $175\Omega \cdot \text{cm}$  tenemos:

$$1.5\Omega \left( \frac{175\Omega \cdot \text{cm}}{1000\Omega \cdot \text{cm}} \right) = 0.263\Omega$$

Al sumarle la resistencia interna del ánodo de  $0.3\Omega$  ( $0.6\Omega/2$ ) y la resistencia del cable entre los dos ánodos de  $0.017\Omega$  ( $15 \times 0.00104\Omega$ ) obtenemos una resistencia de la cama anódica de  $0.58\Omega$ , lo cual se encuentra dentro de la tolerancia del sistema. El paso siguiente es calcular la vida útil del ánodo:

$$\text{Vida(años)} = \frac{0.0424 * \text{Factor.de.utilización} * \text{Masa.del.ánodo} * \text{Eficiencia}}{\text{Corriente.requerida}}$$

$$\text{Vida(años)} = \frac{0.0424 * 0.85 * 120 * 0.90}{0.65} = 5.99 \text{ años} \approx 6 \text{ años}$$

La vida útil para dos ánodos de Zinc es de 6 años, lo cual es un valor relativamente bajo, sin embargo, al ser comparado con la vida que ofrecen los ánodos de Magnesio es un valor aceptable. En caso de que se busque una expectativa de vida más larga se pueden instalar más ánodos. En el campo de prácticas se propone instalar 6 ánodos, con lo cual la vida de éstos se extiende a 18 años.

### 5.3.1.3 Tira de Zinc

La tira de Zinc debe ser lo suficientemente larga para proteger las tres tuberías enterradas con diferentes recubrimientos. Ya que estas tuberías miden 5m cada una y el espacio entre ellas será de 0.5m, el largo de la tira de Zinc deberá ser de 16 metros. Para éste ánodo, la corriente requerida es de 0.2A, debido a que sólo protegerá tuberías recubiertas. Para esta aplicación se utilizará la cinta del tipo “Súper”, la cual tiene una densidad de 2.4lb por cada pie lineal, por lo cual, si la longitud necesaria es de 52.49ft, se tendrá como masa de la tira de Zinc 125.98lb. A continuación se calcula la vida útil de la tira de Zinc.

$$Vida(años) = \frac{0.0424 * Factor.de.utilización * Masa.del.ánodo * Eficiencia}{Corriente.requerida}$$

$$Vida(años) = \frac{0.0424 * 0.85 * 125.98 * 0.90}{0.20} = 20.43 años \approx 20 años$$

Este valor es bastante aceptable, ya que concuerda con la vida calculada para las dos camas anódicas previamente propuestas y el reemplazo de los ánodos se puede llevar a cabo cada 18 años.

## **5.4 Detalles de la instalación**

### **5.4.1 Sistema de protección con corriente impresa**

#### **5.4.1.1 Rectificador de corriente**

En el caso del rectificador de corriente, se utilizará un modelo a la intemperie enfriado por convección forzada, debido a que el ambiente de Ciudad Universitaria no es un ambiente industrial ni altamente corrosivo. Los edificios que se encuentran alrededor del sitio propuesto para el campo de prácticas cuentan con protección contra descargas eléctricas, sin embargo, este aspecto no se puede pasar por alto y el rectificador debe tener una conexión a tierra física. El sistema eléctrico de alimentación será trifásico de 220V y 60Hz, con una capacidad del rectificador de salida de corriente directa de 35V y 45A. El rectificador será montado en un poste como se observa en la figura 12, como sistema de seguridad tendrá un interruptor del circuito de corriente alterna y su temperatura máxima de operación es de 70°C.

El rectificador será instalado cerca de la pared Este del campo de protección catódica, así se tendrá un fácil acceso y poder ser inspeccionado por el personal de la compañía proveedora del servicio eléctrico, para verificar que la operación será segura.

#### **5.4.1.2 Cama de ánodos de grafito**

Para realizar las conexiones de la cama anódica, es necesario cerciorarse de que la totalidad del cable esté perfectamente aislado. En los sitios donde se realicen conexiones se deben sellar estas perfectamente con resina epóxica para evitar fugas de corriente. Al introducir los ánodos a la cama anódica, se deben bajar con extremo cuidado y nunca tomarlos por el cable, ya que esto puede debilitar la conexión entre el cable y el ánodo. Asimismo, se recomienda que el *backfill* sea lo más fino posible, para no dañar el recubrimiento de los cables.

#### **5.4.2 Sistema de protección con ánodos de Zinc**

Una vez que los ánodos de Zinc han sido enterrados de una manera similar a los de grafito, éstos son conectados por un cable guía, el cual será conectado a las tuberías a proteger y también a la caja de conexiones, donde se pueden conectar resistencias pequeñas, para poder medir la corriente de protección y así actualizar el cálculo de la vida estimada de los ánodos.

#### **5.4.3 Instalación de las tuberías**

Debido a que casi la totalidad de las tuberías empleadas son recubiertas, se deben tomar todas las precauciones descritas en la sección 4.6.1, especialmente porque en este tipo de terrenos, cuando hay excavaciones se extrae demasiada piedra volcánica del suelo, lo cual puede fácilmente dañar un recubrimiento.

#### **5.4.4 Estaciones de monitoreo**

Las estaciones de monitoreo serán accesibles en todo momento y para realizar las conexiones correspondientes se utilizarán cables AWG 12.

Se colocarán 16 estaciones de monitoreo de PVC en todo el sistema, las cuales serán distribuidas de la siguiente manera siendo éstas del tipo *a*, *b* ó *c*, mencionados en la figura 17:

- 4 estaciones de monitoreo en las tres tuberías recubiertas protegidas con la tira de Zinc (2 tipo *b* en el centro y dos tipo *c* en los extremos).
- 1 estación de monitoreo en el tanque enterrado (tipo *c*).
- 2 estaciones de monitoreo en la protección de acero (una tipo *b* en cada extremo).
- 1 estación en el cruce de la tubería desnuda y la tubería con FBE (tipo *b*).
- 4 estaciones de monitoreo para la tubería desnuda (tipo *a*).
- 4 estaciones de medición para la tubería recubierta con FBE (tipo *a*).

#### **5.4.5 Cajas de conexiones**

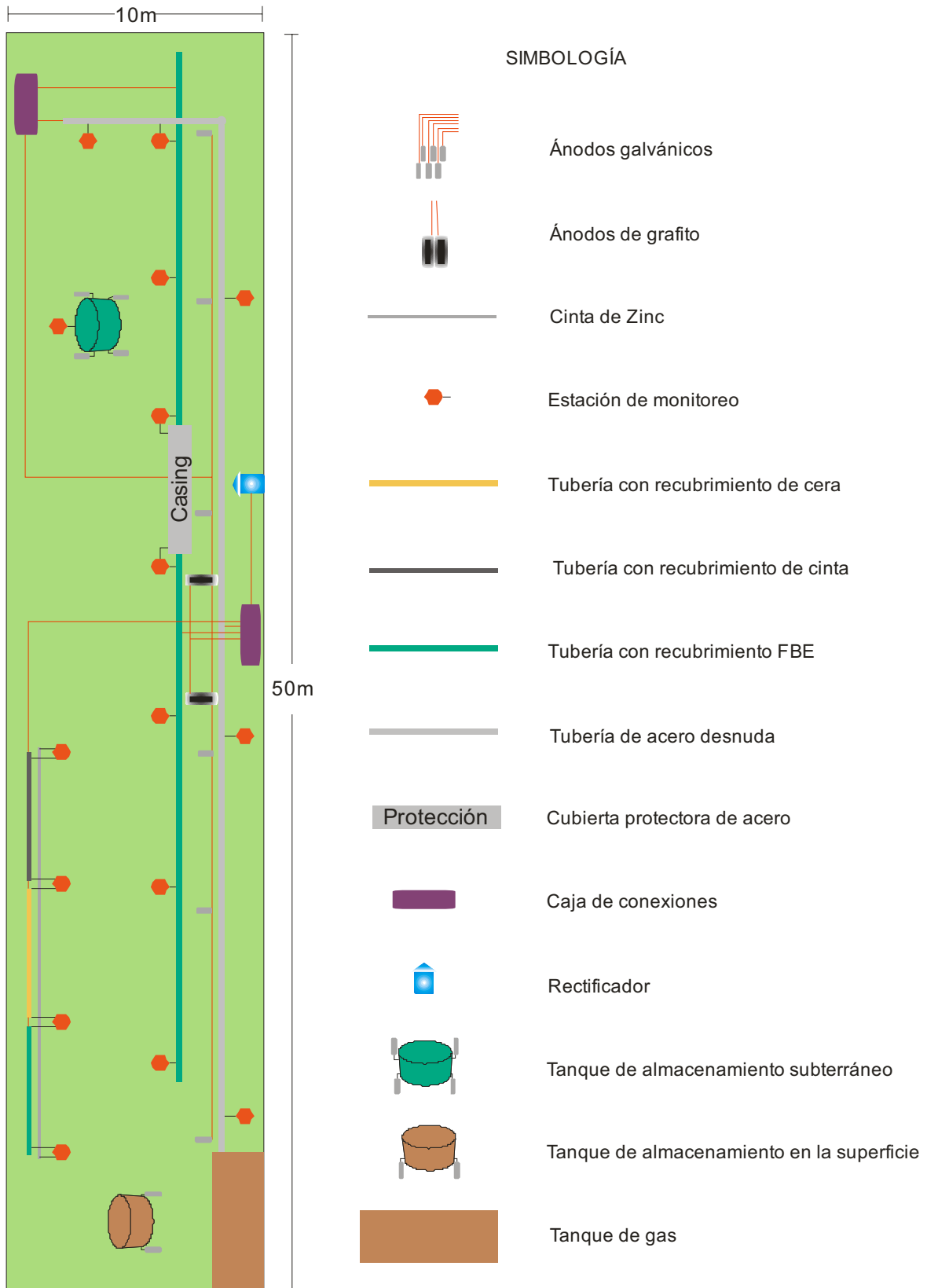
Se utilizarán dos cajas de conexión, la primera será utilizada para el sistema de ánodos galvánicos, los cuales se podrán conectar por medio de la caja a la tubería de acero recubierto con FBE, a la tubería de acero desnudo o a ambas.

La segunda caja de conexión servirá para conectar la cama de ánodos de corriente impresa a la tubería desnuda, a la tubería recubierta con FBE, al juego de tres tuberías con diferentes recubrimientos o a cualquier combinación entre éstas.

Dichas cajas serán montadas en la pared y permitirán interrumpir la corriente cuando sea necesario en cualquiera de los dos sistemas de protección o pueden conectarse interruptores de corriente para realizar un mapeo a intervalo cerrado.

#### **5.5 Diagrama de diseño**

En la figura 20 se ve ilustrado el plano de instalación de las tuberías, los ánodos y los tanques, así como las cajas de conexión y el rectificador. En la misma imagen se puede observar donde irán ubicadas las estaciones de monitoreo.



**Figura 20. Propuesta de diseño para el campo de protección catódica**



## **6. MEDICIONES Y PRUEBAS REALIZABLES EN EL LABORATORIO DE LA FQ**

En el campo de prácticas de protección catódica propuesto para la Facultad de Química de la UNAM se pueden realizar diversas mediciones relacionadas con el control de la corrosión, desde las más elementales, como la medición de potenciales entre la estructura y el suelo, hasta algunas más complejas como la detección y evaluación de corrientes de interferencia. A continuación se detallan las evaluaciones propuestas hacia los alumnos y el personal del laboratorio de corrosión. Cabe mencionar, como es de esperarse, que prácticas adicionales a las descritas aquí, pueden realizarse, siempre y cuando las condiciones lo permitan.

### **6.1 Resistividad de suelos**

Como es bien sabido, la resistividad juega un papel muy importante en el grado de corrosividad de un suelo, a partir de éste valor, se puede decir que tan propenso es una estructura a corroerse cuando se encuentra rodeada por este suelo. Sin embargo, los valores de resistividad bajos, además de ser característicos de suelos altamente corrosivos, permiten una buena conducción de las corrientes de protección cuando se aplica protección catódica al sistema, siendo absolutamente indispensable conocer el valor de resistividad del suelo al elaborar el diseño de un sistema de protección catódica.

La resistividad de un suelo es determinada de acuerdo a la norma ASTM G57, tal y como se indicó en la sección 1.5.1, con el método de Wenner, también conocido como el de los cuatro electrodos.

### **6.2 Medición de potencial tubería/suelo**

Una vez que el sistema de tuberías está instalado, el ingeniero de corrosión debe saber de alguna manera cuál es el estado de la tubería. Evidentemente, es impráctico realizar excavaciones cada vez que el ingeniero desee inspeccionar la tubería, es por eso, que aplicando los conocimientos termodinámicos, se puede utilizar la medición de potenciales entre la tubería y el suelo para estimar el estado de actividad de la corrosión o

si uno o más criterios de protección están siendo alcanzados. La medición de potenciales debe llevarse a cabo como se indica en la sección 1.5.2, con un electrodo de referencia de Cu-CuSO<sub>4</sub>. En esta determinación, al igual que en todas las que se requiere el uso de un electrodo de referencia, éste puede ser construido por los alumnos del laboratorio de corrosión para comprender de una mejor manera la forma en la que éstos electrodos funcionan y se puede verificar que las mediciones sean confiables al comparar el electrodo “casero” con un electrodo comercial.

### **6.3 Determinación de la corriente de protección**

Para determinar la corriente necesaria para proteger a las tuberías por medio de un sistema de corriente impresa, se debe utilizar el rectificador de corriente, las estaciones de monitoreo, varios electrodos de referencia y varios multímetros. En caso de no contar con más de un multímetro, se puede utilizar uno solo y rolarlo por las estaciones de monitoreo. En cada salto de voltaje y corriente aplicados al sistema se debe registrar la corriente aplicada, el voltaje, y el potencial de polarización de cada una de las estaciones de monitoreo en ON y en OFF. Sólo cuando la totalidad de las estaciones de monitoreo hayan cumplido con el criterio de protección de -0.850V con respecto a un electrodo de Cu-CuSO<sub>4</sub>, se puede registrar la corriente y el voltaje de protección requerido en el sistema. Dicho valor puede disminuir debido a que la polarización de las tuberías puede llevar inclusive días en llevarse a cabo en su totalidad.

### **6.4 Determinación de la resistencia de un recubrimiento**

Para determinar la resistencia de un recubrimiento se deben utilizar los datos registrados en el paso anterior. Los más importantes son el desplazamiento de potencial de la tubería y la corriente total aplicada. Para obtener la resistencia del recubrimiento se utiliza la ley de Ohm.

$$\text{Resistencia, } \Omega = \frac{\text{Desplazamiento.de.potencial, V}}{\text{Corriente.aplicada, A}}$$

## **6.5 Evaluación de los criterios de protección catódica**

Una vez conectado el sistema de ánodos galvánicos o encendido el rectificador de corriente, se debe corroborar que la estructura se encuentre protegida de acuerdo a los criterios de protección establecidos por NACE. Para realizar esto, es necesario utilizar las estaciones de monitoreo correspondientes para tener un punto de conexión con el metal y realizar las mediciones pertinentes. Se considera que la estructura está protegida cuando se alcanza uno o varios de los criterios mencionados en la sección 1.6.1.1.

## **6.6 Medición de potenciales ON/OFF**

Debido a que en cualquier momento se puede presentar alguna falla en el sistema de protección catódica ocasionada por algún factor externo como puede ser un apagón eléctrico, una fuga de corriente en el cableado de los ánodos de corriente impresa, el consumo total del ánodo u que un cable sea cortado por accidente, es importante que cuando la corriente sea interrumpida (corriente en OFF), la polarización de la tubería sea tal que se conserve protegida por algún tiempo aún cuando la fuente de corriente se encuentre “desconectada”. Este tipo de situaciones se simulan al desconectar la cama de ánodos galvánicos, o al interrumpir la corriente del rectificador.

El potencial en ON es, evidentemente, el valor que se puede leer en la pantalla del voltímetro cuando la protección se encuentra conectada y funcionando. El potencial en OFF es el primer valor que se puede observar en la pantalla del voltímetro inmediatamente después de que la corriente es interrumpida.

## **6.7 Mapeo a intervalo cerrado**

En la sección 1.5.3 es descrito a detalle el mapeo a intervalo cerrado, esta técnica no es más que una medición sistemática de potenciales ON y OFF a un intervalo de distancia determinado sobre una misma tubería. Los resultados obtenidos del mapeo a intervalo cerrado son de gran utilidad al localizar puntos donde se pueden presentar

problemas de interferencia, daños en el recubrimiento, corrosión de la estructura y es útil también en la determinación del cumplimiento de los criterios de protección catódica.

### **6.8 Simulación y detección de interferencias**

Para poder simular una corriente de interferencia debemos monitorear un de las dos tuberías, tómesese en este ejemplo la tubería desnuda, y al mismo tiempo aplicar una corriente de protección a la tubería recubierta con FBE. La corriente de interferencia estará cambiando el potencial de la tubería desnuda, especialmente en el cruce con la tubería recubierta con FBE, debido a que en este cruce se presenta la descarga de corriente por parte de la tubería desnuda, causando su corrosión. Como se mencionó con anterioridad, el mapeo a intervalo cerrado es de gran utilidad para localizar sitios donde exista corrosión provocada por corrientes de interferencia, por lo cual se debe llevar a cabo este procedimiento a lo largo de la tubería enterrada para poder ubicar el sitio donde la corrosión tiene una mayor intensidad.

### **6.9 Aplicación de una corriente impresa de protección catódica**

Después de que el alumno determinó la corriente de protección necesaria en el sistema, se encuentra listo para aplicar dicha corriente en el rectificador. Una vez aplicada la corriente, es necesario que se verifique que los criterios de protección catódica sean cubiertos por la corriente aplicada, y al paso de un par de días se puede revisar que tanto ha cambiado el gradote polarización de las tuberías, para disminuir la corriente de salida del rectificador y así reducir costos de operación.

### **6.10 Medición de corriente en un sistema de ánodos galvánicos**

Para medir la corriente que un sistema de ánodos galvánicos está aplicando a una o varias tuberías es necesario utilizar una resistencia muy pequeña (del orden de  $0.01\Omega$ ) conectada en serie entre la cama de ánodos galvánicos y la tubería. Una vez conectada la resistencia en serie, se conecta un voltímetro en paralelo para medir la caída de potencial.

Utilizando la ley de Ohm se obtiene la corriente de descarga de los ánodos.

### **6.11 Cálculo de la vida útil de un sistema de ánodos galvánicos**

En base al valor obtenido en la sección anterior se puede calcular la vida útil de un sistema de ánodos galvánicos, al utilizar las leyes de Faraday. Es necesario para este cálculo, además del valor de corriente de descarga, la masa total de los ánodos y el peso molecular promedio de la aleación.

### **6.12 Empleo de cupones para el monitoreo de la corrosión**

En la actualidad es común el empleo de cupones (probetas) que nos ayuden a determinar el impacto real de las condiciones ambientales en la estructura a proteger. En el caso de la protección catódica de tuberías enterradas, un cupón es una representación, se puede decir un modelo físico, de un defecto en la tubería. Dicho defecto es monitoreado para medir el cambio en las propiedades del recubrimiento, la velocidad de corrosión mediante la pérdida de masa del material, el cambio en el potencial con respecto al suelo, entre otros parámetros que auxilian al ingeniero de corrosión al momento de predecir y prevenir futuros daños a la estructura.

### **6.13 Adquisición y almacenamiento digital de datos**

Si durante algún mapeo a intervalo cerrado se encuentra algún punto caliente en la instalación, se puede instalar un electrodo de referencia fijo en las inmediaciones para registrar el potencial de la tubería a un intervalo determinado de tiempo. El electrodo estará conectado a un adquisidor de datos montado en una caja subterránea con una conexión de puerto serial o USB ubicada en la estación de monitoreo más cercana. El ingeniero de corrosión puede exportar la información almacenada a un hoja de cálculo con sólo conectar una computadora portátil a la estación de monitoreo.

### **6.14 Monitoreo remoto de la velocidad de corrosión**

En caso de ser posible, y de que las condiciones así lo requieran, el adquisidor de datos puede enviar la información de forma inalámbrica a una computadora ubicada en el laboratorio de corrosión que mantenga un registro actualizado del potencial de la tubería.

### **6.15 Experimentación con nuevas aleaciones para ánodos galvánicos**

El laboratorio de corrosión y el laboratorio de fundición de la Facultad de Química han trabajado de manera conjunta en el desarrollo de nuevas aleaciones para la fabricación de ánodos galvánicos. El campo de protección catódica presenta una excelente oportunidad para realizar pruebas *in vivo* con estas nuevas aleaciones, permitiendo conocer con certeza el nivel de polarización que ofrecen, si son capaces de mantener una superficie activa, el potencial de disolución del ánodo y su eficiencia.

### **6.16 Validación de modelos matemáticos para sistemas de protección catódica**

En el departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Química se han realizado modelos matemáticos para calcular perfiles de concentración de Zinc y distribución de potenciales eléctricos en el suelo en función del tiempo para sistemas de protección catódica por ánodos galvánicos. Una vez que estos modelos han sido terminados, un paso importante es la validación con mediciones en sistemas reales. El campo de prácticas de protección catódica es la oportunidad ideal para que los estudiantes de ingeniería de procesos metalúrgicos realicen el proceso de validación.

## **7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **7.1 Resistividad del suelo**

Los valores de resistividad del suelo que se encontraron eran de esperarse, debido a que es sabido que en Ciudad Universitaria el subsuelo está formado por roca volcánica, la cual tiene una resistividad mayor que la capa inicial de suelo, la cual resultó ser un ambiente corrosivo. La totalidad de las tuberías se encontrarán localizadas a una profundidad aproximada de 2 metros, por lo cual la baja resistividad en esa capa será favorable para que fluyan las corrientes de protección.

### **7.2 Cantidad de ánodos y tiempo aproximado de vida**

El hecho de utilizar dos ánodos de grafito es razonable, ya que se seleccionaron ánodos de grandes dimensiones, y es un sistema que puede otorgar protección por más de dieciocho años, dependiendo de las condiciones del recubrimiento de las tuberías, si éste se ve deteriorado, la demanda de corriente aumentará y la expectativa de vida del ánodo disminuirá, siendo el mismo caso para los ánodos galvánicos.

La cantidad de ánodos de Zinc es sensata, basándose en las dimensiones del sistema a proteger y el tiempo de vida propuesto.

Asimismo, la expectativa de vida para la cinta de Zinc, a pesar de ser un valor un poco mayor a los 18 años, es aceptable para otorgar protección a las tres secciones pequeñas de tubería con un recubrimiento, y con las estaciones de monitoreo instaladas en cada una de las conexiones se puede medir la corriente de protección de la cinta, con lo cual se puede estimar de nuevo la expectativa de vida con la corriente real de operación. De nuevo en éste caso, la expectativa de vida puede estar en función de diversos factores externos como pueden ser la temperatura, la cual podría afectar el potencial de disolución del ánodo, la resistividad del suelo, y las condiciones del recubrimiento, entre otros.

### **7.3 Calidad del campo**

Las características del campo de prácticas de protección catódica propuesto son de utilidad en diversos ensayos utilizados en la industria de la corrosión, tales como el mapeo a intervalo cerrado (CIS), evaluación directa de la corrosión externa (ECDA), monitoreo de potenciales, *in situ* y remoto, identificación de corrientes de interferencia, almacenamiento de registros de potenciales en “zonas calientes”, identificación de los componentes de un sistema, ya sea ánodo, tubería, *casing*, tubería desnuda o cinta de Zinc.

Los accesorios adicionales propuestos para el monitoreo remoto de la corrosión de la estructura le dan al alumno de ingeniería de corrosión una visión de los avances de la tecnología moderna, y cómo su correcta aplicación puede ser útil para aumentar la eficiencia de los sistemas.

### **7.4 Patrocinadores propuestos para reducir costos**

El costo involucrado en un proyecto de tales magnitudes puede ser muy elevado, por lo cual se recomienda contar con patrocinadores que puedan auxiliar en la construcción del mismo. Los patrocinadores deben tener una estrecha relación con la industria de la corrosión y la tecnología, por lo cual se proponen los siguientes:

- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)
- Petróleos Mexicanos (PEMEX)
- Instituto Mexicano del Petróleo (IMP).

### **7.5 Ventajas para los estudiantes, la facultad y el laboratorio de corrosión**

En un laboratorio de tales características, es posible llevar a cabo las prácticas de protección catódica y medición de potenciales que los alumnos realizan actualmente, y a futuro, se pueden comenzar a impartir prácticas de corrientes de interferencia, determinación de la corriente de protección, así como impartir cursos a entidades externas que deseen asesoría y capacitación en el área de protección catódica. En cuanto



a lo anterior, debido a que el campo cumple con los requisitos establecidos por NACE para impartir cursos de certificación en protección catódica, el personal de la facultad puede prepararse para ofrecer estos cursos, abriendo la posibilidad de recuperar la inversión realizada en el proyecto.

Otra oportunidad que se presenta para el laboratorio de corrosión es la experimentación con nuevas aleaciones que se han propuesto y desarrollado en el mismo laboratorio para utilizarse como ánodos de sacrificio.

## 8. CONCLUSIONES

- La construcción de un campo de prácticas de protección catódica en el edificio D de la Facultad de Química de la UNAM es viable desde el punto de vista de diseño.
- De llevarse a cabo su construcción, será de gran utilidad en la preparación de los estudiantes enfocados en el área de ingeniería de corrosión, así como para los profesores, e investigadores que desee utilizarlo para realizar prácticas de protección catódica.
- El diseño de este campo de protección catódica cumple con estándares internacionales, por lo que se podrían impartir cursos de certificación NACE en protección catódica y corrientes de interferencia.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

1. N. Pérez. *Electrochemistry and corrosion science*. Kluwer academic publishers. 2004.
2. American Society of Metals. *ASM Handbook Vol. 13. Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection*. ASM Internacional, 2003
3. M. Pourbaix. *Atlas of the electrochemical equilibria*. National Association of Corrosion Engineers, 1974
4. W. von Baekmann, W. Schwenk, W. Prinz. *Handbook of Cathodic Corrosion Protection. Theory and practice of electrochemical processes*. Gulf Professional Publishing, 1997
5. A.J. Bard, L.R. Faulkner. *Electrochemical Methods: Fundamentals and application, 2<sup>nd</sup> edition*. John Wiley and Sons, 2001
6. ASTM Standard Test Method. *Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method*. American Society for Testing and Materials, 2001
7. P. R. Roberge, L. S. Van Delinder. *Corrosion basics*. NACE International, 2006
8. J. A. Beavers, G. H. Koch, W. E. Berry. *Corrosion of Metals in Marine Environments*. Metals and Ceramics Information Center, a Department of Defense Information Analysis Center. Columbus, Ohio, 1986
9. NACE International. *Standard recommended practice RP0169-2002: Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems*. National Association of Corrosion Engineers, 2002
10. P. R. Roberge. *Handbook of corrosion engineering*. McGraw Hill, 2000.
11. A. W. Peabody. *Control of Pipeline Corrosion*. NACE International, The Corrosion Society, 2001

12. G. H. Koch, M. P. H. Brongers, N. G. Thompson, Y. P. Virmani, J. H. Payer. *Corrosion Cost and preventive strategies in the United States*. Office of infrastructure, research and development, Federal Highway Administration, 2001
13. Up Front, *Materials Performance*, 31:3 (1992)