



Buenas prácticas para diseño del Sistema de  
Protección Catódica por ánodos galvánicos en  
tanques para Plantas Envasadoras de GLP

# INDICE

1. Introducción
2. Objetivo
3. Alcance
4. Requerimiento normativo
5. Sistema de Protección Catódica
6. Protección catódica por ánodos galvánicos
7. Diseño del sistema de protección por ánodos galvánicos
8. Operación y mantenimiento
9. Caso práctico N° 1.
10. Caso práctico N° 2.

## 1. Introducción

La corrosión puede definirse como el deterioro del metal debido una reacción con su ambiente. Para que el proceso de corrosión se produzca, deben existir áreas con potenciales eléctricos diferentes en la superficie del metal. Estas áreas deben estar eléctricamente conectadas y en contacto con un electrolito. Por lo tanto, hay cuatro componentes en cada celda de corrosión electroquímica: un ánodo, un cátodo, un camino metálico que conecta el ánodo con el cátodo y un electrolito<sup>1</sup>.

El papel de cada componente en el proceso de corrosión es el siguiente:

- a) En el ánodo, el metal base (corroe) liberando electrones y formando iones metálicos positivos.
- b) En el cátodo, otras reacciones químicas que consumen los electrones liberados en el ánodo.
- c) La corriente positiva fluye a través de la ruta metálica que conecta el cátodo y el ánodo. Electrones generados por las reacciones químicas de corrosión en el ánodo se llevan a cabo a través del metal en el cátodo donde se consumen.
- d) Corriente positiva atraviesa el electrolito desde el ánodo al cátodo para completar el circuito eléctrico.

## 2. Objetivo

El presente documento contempla los requisitos técnicos para el diseño de sistemas de protección catódica para tanques en Plantas Envasadoras de GLP, no obstante, debe utilizarse considerándola sólo como una guía base. Para información oficial, deben consultarse la norma NFPA 58 en su edición actual, normas NACE u otras aplicables al Sistema de Protección Catódica.

## 3. Alcance

El presente documento cubre algunos requisitos técnicos para diseño de los sistemas de protección catódica por ánodos galvánicos, utilizados para el control de corrosión en tanques de almacenamiento enterrados o monticulados. El presente documento no abarca otros métodos de protección catódica.

El propietario de la planta es responsable del cumplimiento de todo lo indicado en la NFPA 58, las normas NACE u otras aplicables. En caso existieran discrepancias entre lo indicado en el presente documento y lo requerido por NFPA, NACE u otros estándares reconocidos de ingeniería, primará lo que se indique en las normas y estándares internacionales.

## 4. Requerimiento normativo

- ✓ Los tanques estacionarios enterrados y monticulados, deben contar con un sistema de protección catódica revestidos con un material recomendado para el servicio<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> *API RP 1632 - Protección catódica de tanques de almacenamiento enterrados y sistemas de tuberías, Reafirmado 2010. Sección 2.1 – Introducción.*

<sup>2</sup> *Numeral 5.2.1.11 de la norma NFPA 58, edición 2020. Los recipientes ASME instalados enterrados, parcialmente enterrados, o como instalaciones monticulados deben incorporar medidas de protección catódica y se deben revestir con material recomendado para el servicio que se está aplicando según las instrucciones del fabricante del revestimiento.*

- ✓ Los tanques estacionarios enterrados, deben encontrarse por lo menos a 15 cm por debajo del nivel del piso<sup>3</sup>.
- ✓ Los tanques estacionarios monticulados, debe tener un espesor mínimo de cubierta sobre el recipiente de 30 cm<sup>4</sup>, así como una cubierta protectora para protegerlo de la erosión.
- ✓ En los tanques enterrados y monticulados, el sistema de protección catódica debe incluir: material de recubrimiento, protección catódica por ánodos de sacrificio o corriente impresa y un medio para probar la protección catódica<sup>5</sup>.
- ✓ El revestimiento de los tanques estacionarios, deben encontrarse en óptimas condiciones<sup>6</sup>.
- ✓ Las tuberías soterradas, se deben encontrar por lo menos a 0.60m bajo el nivel del piso<sup>7</sup>.
- ✓ La tubería metálica enterrada, debe contar con un sistema de protección catódica<sup>8</sup>.
- ✓ En el caso de juntas de aislamiento eléctrico, deberán ser resistentes a la acción de GLP y con punto de fusión mayor a 816 °C.<sup>9</sup>

<sup>3</sup> **Numeral 6.8.6.1 de la norma NFPA 58, edición 2020. Instalación de Recipientes enterrados**

(A) Los recipientes instalados en áreas sin tránsito vehicular se deben ubicar por los menos a 6 pulg. (150 mm) por debajo del nivel del piso.

<sup>4</sup> **Numeral 6.8.6.3 de la norma NFPA 58, edición 2020. Instalación de Recipientes monticulados**

(A) El material de cubrimiento debe ser tierra, arena u otro, no combustible, no corrosivo y deberá tener un espesor mínimo de cubierta sobre el recipiente de 1 pie (0.3 m).

(B) Se debe adicionar una cubierta protectora encima de los materiales del montículo, sujetos a erosión.

<sup>5</sup> **Numeral 6.8.6.1 de la norma NFPA 58, edición 2020. Instalación de Recipientes enterrados**

(I) Se debe instalar un sistema de protección contra la corrosión en las instalaciones nuevas de recipientes de acero enterrados, a menos que exista una justificación técnica y sea aprobada por la autoridad competente. El sistema de protección contra la corrosión debe incluir lo siguiente:

(1) Un material de recubrimiento que cumpla con 5.2.1.11

(2) Un sistema de protección catódica que cuente con ánodo(s) de sacrificio o un ánodo de corriente impresa.

(3) Un medio para probar el comportamiento del sistema de protección catódica de acuerdo con 6.17.3.

**Numeral 6.8.6.3 de la norma NFPA 58, edición 2020. Instalación de Recipientes monticulados**

(F) Los recipientes atrincherados deben cumplir con los requisitos de protección contra la corrosión de 6.6.6.1 (I) y 6.6.6.1 (J).

<sup>6</sup> **Numeral 6.8.6.1 de la norma NFPA 58, edición 2020, Instalación de Recipientes enterrados.**

(J) Antes de enterrar el recipiente se debe realizar una inspección visual del revestimiento. Si hay áreas dañadas se deben reparar con revestimiento recomendado para servicio en tanques enterrados y compatible con el revestimiento existente.

<sup>7</sup> **Artículo 36° del Reglamento aprobado por DS 027-94-EM.**

Cuando se instalen tuberías soterradas, la profundidad mínima será de 0.60 m. bajo el nivel del piso y contarán con recubrimiento anticorrosivo. Estas tuberías deberán ser soldadas (no roscadas) y no se usarán bridas.

<sup>8</sup> **Numeral 6.11.3.15 de la norma NFPA 58, edición 2020.**

La tubería metálica enterrada se debe proteger de la corrosión según las condiciones del suelo de acuerdo:

C) La tubería de acero de diámetro nominal mayor que 1 pulg. (25 mm) instalada enterrada debe tener un sistema de protección catódica de acuerdo con 6.19.2(C) a menos que mediante una justificación técnica no sea exigida por la autoridad competente.

**Numeral 6.19.2.(C) de la norma NFPA 58, edición 2020.** Los materiales y equipos deben tener un sistema de protección catódica instalado y mantenido de acuerdo con 6.17.3.

<sup>9</sup> **Numeral 5.9.1.4 (A) y numeral 6.11.3.5 (E) y (F) de NFPA 58, edición 2020.**

“6.11.3.5 Se debe permitir que las uniones de tuberías metálicas sean roscadas, bridadas, soldadas, conectadas a presión o soldadas de soldadura fuerte, usando tubos y accesorios que cumplan con 5.11.3, 5.11.4 y 6.11.3.5 (A) a 6.11.3.5 (H).

(...)

(E) Las juntas utilizadas para retener el GLP en las conexiones bridadas de las tuberías deberán ser resistentes a la acción del GLP.

(F) Las juntas deben estar hechas de metal o material confinado en metal con un punto de fusión de más de 1500 °F (816 °C) o deben estar protegidas contra la exposición al fuego. (...).”

- ✓ Los sistemas de protección catódica instalados, deben ser controlados por pruebas y sus resultados deben ser documentados<sup>10</sup>:
  - Se deben obtener mediciones de potencial representativas después de que cada sistema de PC se active inicialmente para determinar si se han cumplido los criterios aplicables.
  - Mediciones del sistema de PC después de un año, hasta año y medio máximo, después de la medición inicial.
  - La efectividad del sistema de PC debe ser monitoreada por pruebas periódicas en intervalos que no superen los 3 años.
- ✓ Las pruebas deben producir un voltaje de -0.850 voltios o más, negativo, con referencia a la semi celda cobre-sulfato de cobre (CSE)<sup>11</sup>.

## 5. Sistema de Protección Catódica

Aunque diferentes metales tienen lecturas de voltaje diferentes, la lectura de voltaje del acero es, naturalmente, alrededor de -500 mV. Un voltaje de -500 mV en un tanque de GLP indicaría que el tanque no está protegido y es susceptible a la corrosión<sup>12</sup>.

La protección catódica se utiliza junto con otros métodos de control de corrosión, como revestimientos y aislación eléctrica.

Existen dos métodos para suministrar protección catódica a una estructura:

- ✓ Sistema de ánodos galvánico.
- ✓ Sistema de corriente impresa.

En el presente documento solo se tratará el Sistema de ánodos galvánicos.



<sup>10</sup> **Numeral 6.19.3.2 de la norma NFPA 58, edición 2020.** Los ánodos de sacrificio deben probarse de acuerdo con la siguiente programación:

(1) A la instalación del sistema de protección catódica, a menos que las condiciones climáticas lo impidan, en cuyo caso las pruebas deben realizarse dentro de los 180 días siguientes a la instalación del sistema.

(2) Para la verificación continua de la efectividad del sistema 12 a 18 meses después de la prueba inicial.

(3) Frente a ensayos de verificación exitosos y considerando los resultados previos de las pruebas, se deben realizar pruebas periódicas de seguimiento en intervalos que no superen los 36 meses.

(4) Los sistemas que fallen una prueba, se deben reparar tan pronto como sea práctico a menos que las condiciones climáticas lo impidan, en cuyo caso la reparación se debe realizar no más tarde de los 180 días. Las pruebas se deben reiniciar como lo exigen el 6.19.3.2(1) y 6.19.3.2(2), y los resultados deben cumplir con 6.19.3.2.

(5) Se debe mantener la documentación de los resultados de las dos pruebas más recientes.

<sup>11</sup> **Numeral 6.19.3.1 de la norma NFPA 58, edición 2020.** Los sistemas de protección catódica, instalados de acuerdo con este código, deben ser controlados por pruebas y sus resultados deben ser documentados, y las pruebas de confirmación descritas por uno de los siguientes: (1) Produciendo un voltaje de -0.850 voltios o más, negativo, con referencia a la semi celda cobre-sulfato de cobre (...)

<sup>12</sup> *Cathodic Protection Training Guide, 2015 - Propane Education & Research Council (PERC).*

<https://propane.com/resource-catalog/resources/cathodic-protection-training-guide>

## Revestimientos

Se debe aplicar un revestimiento dieléctrico de alta calidad a las superficies externas preparadas adecuadamente del tanque, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante del revestimiento, incluidas las conexiones anódicas, los accesorios y las orejetas de elevación.

Tres tipos de recubrimientos dieléctricos comúnmente usados son poliuretanos, epoxis y plásticos reforzados<sup>13</sup>.

Debe evitarse la sobreprotección que puede resultar en daños de revestimiento debido al ataque por hidrógeno en aceros susceptibles. Para evitar el desprendimiento y / o la formación de ampollas en el revestimiento, el potencial no debe ser más negativo que  $-1,20\text{ V}^{14}$ , respecto a un electrodo de referencia de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ .

## Aislamiento Eléctrico<sup>15</sup>

La estructura metálica que se desea proteger debe quedar eléctricamente aislada de cualquier otro tipo de estructura que no esté considerado en el proyecto de protección catódica. Los aislamientos eléctricos además de impedir fugas de corriente de protección separan eléctricamente al tanque en secciones o tramos, lo que facilita el mantenimiento y control de un sistema de protección catódica. Las válvulas deberán ser de acero o metal con punto de fusión mayor a  $816^\circ\text{C}^{16}$ .

Las empaquetaduras de las conexiones deberán ser de material resistente al fuego y al GLP, en su fase de vapor y líquido, y deben garantizar hermeticidad. Tendrá como punto de fusión mínimo de  $816^\circ\text{C}$  y será de metal u otro material adecuado confinado en metal.

## Resistividad del Medio

La resistividad es un factor primario en la cantidad de corriente requerida y en el diseño de protección catódica por ánodos galvánicos. Mientras más baja es la resistividad del suelo o el medio; más rápido es el proceso de corrosión. La tabla<sup>17</sup> muestra una comparación entre los valores de resistividad y el grado de corrosión de acero.

<i>Resistividad del suelo (ohm-cm)</i>	<i>Grado de corrosividad</i>
0 – 500	Muy corrosivo
500 – 1000	Corrosivo
1000 – 2000	Moderadamente corrosivo

<sup>13</sup> *Numeral 3.4 de la norma NACE RP 0285, External Corrosion Control of Underground Storage Tank Systems by Cathodic Protection* “Cualquier tipo de recubrimiento utilizado debe tener altas propiedades dieléctricas. El propósito de un recubrimiento dieléctrico es aislar eléctricamente el sistema del medio ambiente, al tiempo que reduce las demandas de corriente protectora en el sistema CP”.

<sup>14</sup> *Numeral 6.2 Protection potentials de la norma ISO 15589-1. 2ª edición 2015-03-01. Cathodic protection of pipeline systems.*

<sup>15</sup> *Numeral A.6.8.6.1 de la norma NFPA 58, edición 2020*

(...) Es importante que, donde se diseña un sistema de protección catódica, haya una clara comprensión de los límites de la superficie y de los materiales que se están protegiendo. Puede ser necesario el aislamiento eléctrico del recipiente de tuberías metálicas mediante un accesorio dieléctrico u otro componente diseñado con este propósito (...).

<sup>16</sup> *Numeral 5.7.1.2 de la norma NFPA 58, edición 2020.* “Las partes metálicas de los accesorios sometidas a presión deben tener un punto de fusión mínimo de  $816^\circ\text{C}$  (...)”

<sup>17</sup> *API RP-651. Cathodic Protection of Aboveground Petroleum Storage Tanks.*

Resistividad del suelo (ohm-cm)	Grado de corrosividad
2000 – 10000	Levemente corrosivo
Más de 10000	Progresivamente menos corrosivo

## 6. Protección catódica por ánodos galvánicos

La protección catódica galvánica (o de sacrificio) hace uso práctico de la corrosión de metales diversos. Es importante recordar que debe existir una diferencia de potencial, o potencial impulsor entre un ánodo galvánico y la estructura a proteger. El ánodo galvánico se conecta a la estructura directamente o a través de una estación de medición, para poder monitorearlo. En las siguientes figuras podemos ver un esquema típico protección catódica con ánodos galvánicos.

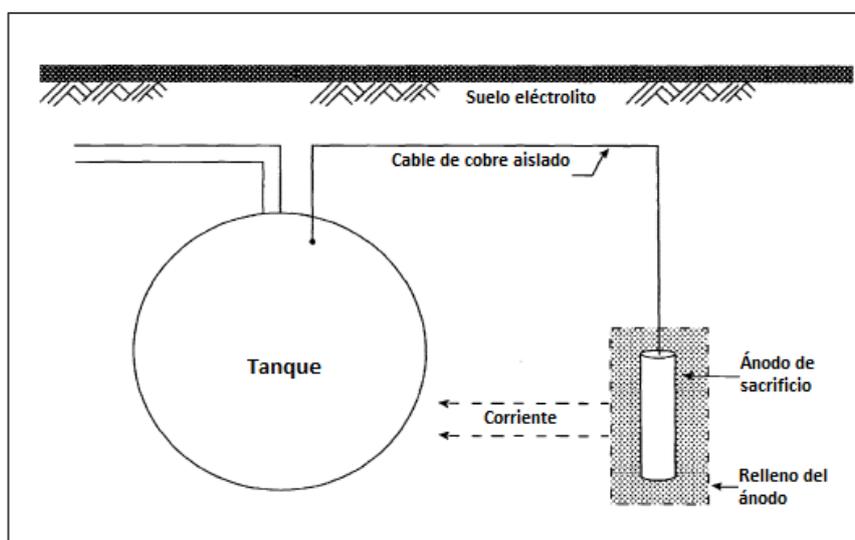


Figura 1: Protección catódica por ánodos de sacrificio en tanques<sup>18</sup>.

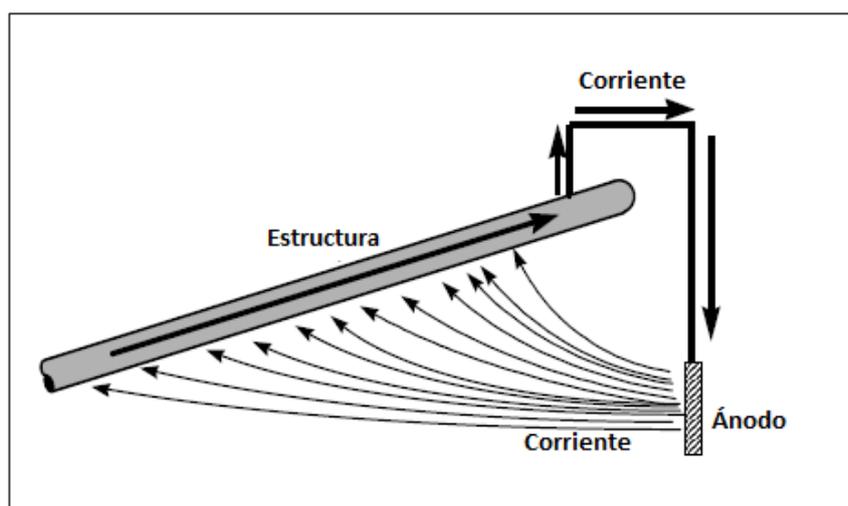


Figura 2: Protección catódica por ánodos galvánicos en tuberías<sup>19</sup>.

<sup>18</sup> API RP 1632 - Protección catódica de tanques de almacenamiento enterrados y sistemas de tuberías, Reafirmado 2010. Figura 6-Protección Catódica por ánodos de sacrificio.

<sup>19</sup> NACE Internacional. "Protección Catódica Nivel 1" - Manual de Enseñanza, página 3:8.

## Ánodos de magnesio<sup>20</sup>

Generalmente, el magnesio es el más indicado para este tipo de aplicación. Usualmente, los ánodos de magnesio están disponibles en dos tipos de aleación:

- De alto potencial, con un potencial de corrosión nominal de  $-1.75$  V con respecto a un electrodo de referencia de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ; suministra una mayor fuerza impulsora que el standard.
- De bajo potencial (Standard) con un potencial de corrosión nominal de  $-1.55$  V con respecto a un electrodo de referencia de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ; uso en suelos de baja resistividad y agua.

<i>Características del ánodo de Magnesio del alto potencia<sup>21</sup></i>	
Potencia nominal	$-1.75$ V
Eficiencia	50%
Capacidad	500 A-h/lb
Velocidad de consumo	17.5 lb/A-año

## Ánodos pre-empaquetados

El relleno químico dentro del paquete permite suministrar:

- ✓ Un medio homogéneo favorable para minimizar la autocorrosión del ánodo.
- ✓ Un medio de baja resistividad para minimizar la resistencia de contacto con la tierra.
- ✓ Un medio químico que minimice la polarización del ánodo.
- ✓ Un relleno que absorba y retenga la humedad necesaria para la conducción iónica.

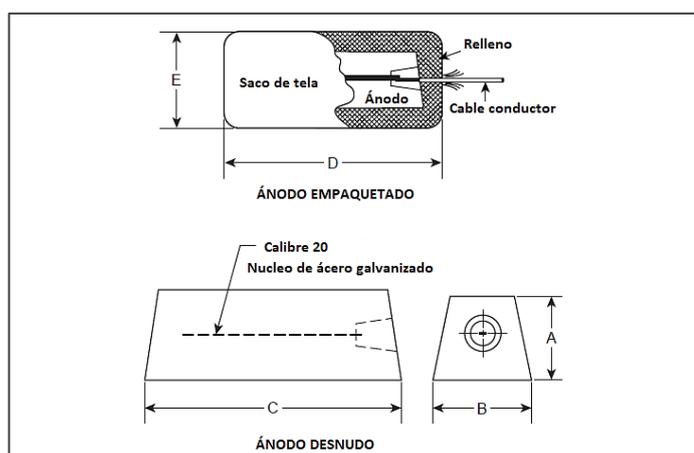


Figura 3: Esquema del ánodo pre-empaquetado<sup>22</sup>.

<sup>20</sup> Numeral 2.1 Ánodos y Protección Galvánica del Suplemento 3 – Protección Catódica - Handbook NFPA 58, edición 2017, "(...) los 3 comúnmente más usados en la industria de GLP incluyen Magnesio de Alto Potencial, Aleación de Magnesio Y Zinc. Sin embargo, el presente documento sólo trata del uso del ánodo de Magnesio".

<sup>21</sup> CP – 3 – NACE; Cathodic Protection Technologist, Tabla 2.10. página 2:57

<sup>22</sup> PEABODY'S CONTROL OF PIPELINE CORROSION, Tabla 9.2 - Tipos de ánodos de Magnesio, página 182.

## Conexión a las estructuras

Los ánodos galvánicos deben instalarse alrededor del tanque de manera que permita una distribución óptima de la corriente. Los ánodos deben colocarse cerca o debajo de la elevación de la parte inferior del tanque<sup>23</sup>.

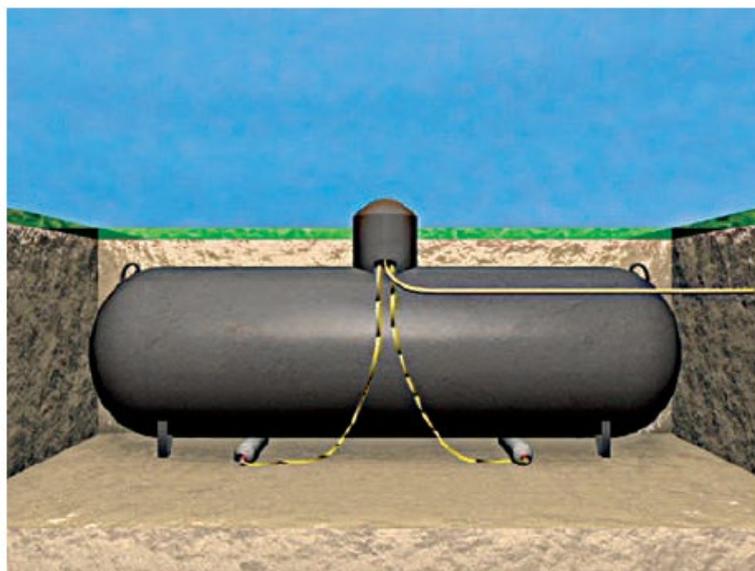


Figura 4: Ilustración de los ánodos y cables de conexión al tanque de acero.<sup>24</sup>

Los ánodos galvánicos deben tener una conexión directa con la estructura a través de un conductor metálico, según la norma NACE RP-0285 debe ser alambre de cobre aislado de al menos 4 mm<sup>2</sup> (#12 AWG)<sup>25</sup>. El cable utilizado para el ánodo, el electrodo de referencia y las conexiones de monitoreo requiere aislamiento con las siguientes cualidades<sup>26</sup>:

- ✓ baja absorción de humedad;
- ✓ resistencia a la abrasión; y
- ✓ resistencia a la rotura suficiente para su manipulación durante la instalación.

Los cables conductores del ánodo deben tener la conexión de interfaz cable / ánodo asegurada por soldadura o soldadura fuerte. El cableado conectado a la estructura debe conectarse mediante soldadura exotérmica, conectores de cable de presión de acero soldables o conectores mecánicos

<sup>23</sup> **Numeral 6.2.4 de la norma NACE SP 0285 - 2011**, External Corrosion Control of Underground Storage Tank Systems by Cathodic Protection – Instalación de ánodos galvánicos.

<sup>24</sup> **LP-Gas Code Handbook, edición 2017**. Exhibit S3.4. Página 604.

<sup>25</sup> **Numeral 6.2.3.6 de la norma NACE SP 0285 – 2011**, External Corrosion Control of Underground Storage Tank Systems by Cathodic Protection – “Los ánodos galvánicos se deben suministrar con un cable conductor adecuado conectado. El cable debe ser de al menos 4 mm<sup>2</sup> (# 12 American Wire Gauge [AWG]) cable sólido con cable termoplástico aislado (TW) o aislamiento equivalente resistente al aceite y al agua”.

<sup>26</sup> Ver **Numeral 6.5.1 de la norma NACE SP 0285-2011**.

apropiados. El área de la conexión debe limpiarse raspando o cepillado antes de la conexión. El conector y el área de conexión deben estar completamente recubiertos después de la conexión<sup>27</sup>.

## 7. Diseño del sistema de protección por ánodos galvánicos<sup>28</sup>

### Cálculo del Requerimiento de Corriente de Protección

Existen diversos métodos<sup>29</sup> para determinar la Corriente de Protección; por ello, se deberá revisar los diversos métodos y elegir el más adecuado. Un método consiste en determinar inicialmente el valor de la densidad de corriente a partir de la información bibliográfica. Una Tabla de densidad de Corriente para protección catódica comúnmente utilizada se muestra a continuación:

Descripción	Rango (mA/ft <sup>2</sup> )
<b><u>Acero sin recubrimiento</u></b>	
Suelo estéril, neutro	0.4 – 1.5
Suelo neutro bien aireado	2.0 – 3.0
Suelo seco bien aireado	0.5 – 1.5
Suelo húmedo, condiciones moderadas/severas	2.5 – 6.0
<b><u>Estructuras enterradas con recubrimiento</u></b>	
<b><u>Resistividad del suelo</u></b>	
50 a 500 ohm-cm	0.2 a 0.1
500 a 1500 ohm-cm	0.1 a 0.05
1500 a 4000 ohm-cm	0.05 a 0.01

(1mA/m<sup>2</sup> = 10.76mA/ft<sup>2</sup>)

Tabla de densidad de corriente para protección catódica para el acero<sup>30</sup>.

En el caso de una estructura bien recubierta en que la superficie desnuda puede ser muy pequeña, se incluye el cálculo de la corriente requerida a través del revestimiento, a fin de no subestimar la corriente que realmente se requiere, debido a que la conductancia del recubrimiento dejará pasar algo de corriente a través del mismo hacia la estructura<sup>31</sup>.

En ese sentido, la ecuación para obtener la Corriente de Protección Total Requerida es la siguiente:

$$I_{cp} = I_{R1} + I_{R2}$$

✓  $I_{cp}$ : Corriente de Protección catódica total requerida (A)

<sup>27</sup> **Numeral 6.5.2 de la norma NACE SP 0285-2011.** "Los cables conductores del ánodo deben tener la conexión de interfaz cable / ánodo asegurada por soldadura o soldadura fuerte. Los ánodos de soldadura deben tener un núcleo de acero soldable para la conexión directa a la estructura. El cableado conectado a la estructura debe conectarse mediante soldadura exotérmica, conectores de alambre de presión de acero soldables o conectores mecánicos apropiados, y debe ser capaz de resistir una prueba de tracción de acuerdo con ASTM F458.18. (...)".

<sup>28</sup> **CP – 3 – NACE; Cathodic Protection Technologist** – Capítulo 4 Fundamentos de Diseño de CP, pag 4:1

<sup>29</sup> **CP – 3 – NACE; Cathodic Protection Technologist** – Sección 4.3 Métodos para Estimar el Requerimiento de Corriente.

<sup>30</sup> **CP – 4 – NACE; Cathodic Protection Specialist** Tabla 2.5 Valores típicos de corriente requerida para el acero, **CP – 3 – NACE; CP Specialist** Tabla 4.1 Requerimientos de Corriente Aproximados para la Protección Catódica del Acero.

<sup>31</sup> **CP – 3 – NACE; Cathodic Protection Technologist** – Sección 4.2.1 Densidad de Corriente.

Ecuaciones para obtener las corrientes parciales de protección:

$$I_{R1} = \frac{\% \text{Área desnuda} \times \rho_{\text{corriente1}} \times \text{Área}}{1000}$$

$$I_{R2} = \frac{\% \text{Efectivo} \times \rho_{\text{corriente2}} \times \text{Área}}{1000}$$

- ✓  $I_R$ : Corriente parcial requerida (A)
- ✓  $\% \text{Área desnuda}$ : porcentaje de la superficie sobre el cual el revestimiento no es efectivo.
- ✓  $\rho_{\text{corriente1}}$ : Densidad de corriente correspondiente al área desnuda. (mA/ft<sup>2</sup>)
- ✓  $\% \text{Efectivo}$ :  $1 - \% \text{Área desnuda}$
- ✓  $\rho_{\text{corriente2}}$ : Densidad de corriente correspondiente al área recubierta. (mA/ft<sup>2</sup>)
- ✓ Área de la superficie a proteger. (ft<sup>2</sup>)

Ver Nota al pie<sup>32</sup>

## Cálculo de las Resistencias de un Circuito de Protección Catódica

Luego de determinar los requerimientos de protección catódica mediante uno de los varios de los métodos existentes, y elegir los materiales anódicos y su configuración, debemos calcular la resistencia del circuito de protección catódica,  $R_{cp}$ , de la siguiente manera:

$$R_{cp} = R_a + R_s + R_c$$

- ✓  $R_{cp}$ : resistencia del circuito de protección catódica (ohm)
- ✓  $R_a$ : resistencia del ánodo(s) al terreno remoto (ohm)
- ✓  $R_s$ : resistencia de la estructura al terreno remoto (ohm)
- ✓  $R_c$ : resistencia del cable entre el ánodo y la estructura (ohm)
- ✓

## Resistencia del ánodo vertical tipo barra

En el caso de elegir utilizar ánodos pre-empaquetados (con relleno de baja resistividad), debido a que la resistencia desde el ánodo hasta el borde exterior del relleno es muy pequeña, se puede considerar solo la resistencia entre el paquete de relleno y el suelo, y las dimensiones en el cálculo de la resistencia serán la longitud nominal y el diámetro del paquete de relleno del ánodo.

La Ecuación de Dwigth modificada permite efectuar una estimación inicial, por ello, la Resistencia del ánodo vertical ( $R_a$ ) se determina de la siguiente manera:

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi L} \left[ \ln \left( \frac{8L}{d} \right) - 1 \right]$$

- ✓  $R_a$ : Resistencia del ánodo vertical.
- ✓  $\rho$ : Resistividad del suelo (ohm-cm)
- ✓  $L$ : Longitud del ánodo o relleno (cm)
- ✓  $d$ : diámetro del ánodo o relleno (cm)

<sup>32</sup> Usualmente, un equipo multidisciplinario acuerda el porcentaje de área desnuda en un tiempo de vida útil determinado, puede alcanzar hasta 20%, según 4.3.2.3 de la NACE RP-388. Esto depende de muchas variables como: 1. Tipo de revestimiento; 2. Propiedades aislantes (dadas por el fabricante); 3. Envejecimiento normal, ya que sus propiedades aislantes pueden variar con el tiempo; 4. Daños mecánicos por funcionamiento operacional; 5. Daños mecánicos durante los procesos de transporte (en gandolas) al lugar de almacenamiento o de instalación, movimiento con grúas en talleres; 6. Calidad del procedimiento de aplicación del revestimiento; 7. Características del medio electrolítico donde esté instalado; 8. Temperatura del electrolito contenido en el activo revestido.

### Factor de congestionamiento

Cuando la separación entre ánodos (S) es corta respecto de la longitud del ánodo (L), es decir  $S < 10L$ , se produce una interferencia mutua (congestionamiento) que hace que aumente la resistencia. La ecuación de Sunde que se muestra a continuación incluye un factor que contempla la resistencia adicional debido a la interferencia mutua y puede ser utilizado con posterioridad a la estimación según la Ecuación de Dwight para obtener un valor de la Resistencia para N ánodos verticales ( $R_a$ ) más exacto. La Resistencia puede determinarse de la siguiente manera:

$$R_{la} = \frac{\rho}{2\pi N L} \left[ \ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1 + \frac{2L}{s} \ln(0.656N) \right]$$

- ✓  $R_{la}$  : Resistencia de varios ánodos verticales.
- ✓  $\rho$  : Resistividad del suelo (ohm-cm)
- ✓  $L$  : Longitud del ánodo o relleno (cm)
- ✓  $d$  : diámetro del ánodo o relleno (cm)
- ✓  $s$  : separación entre ánodos (cm)
- ✓  $N$  : cantidad de ánodos.

### **Resistencia del ánodo horizontal**

Para las aplicaciones en suelos de alta resistividad, normalmente se usa ánodos de magnesio largos y cilíndricos, porque la mayor longitud disminuye la resistencia a tierra del ánodo. De hecho, la mínima resistencia se obtiene usando cintas o varillas muy largas de magnesio extruido<sup>33</sup>. La resistencia de un ánodo horizontal puede estimarse usando la fórmula de Dwight.

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi L} \left[ \ln\left(\frac{4L}{d}\right) + \ln\left(\frac{L}{h}\right) - 2 + \frac{2h}{L} \right]$$

- ✓  $R_a$  : Resistencia del ánodo horizontal.
- ✓  $\rho$  : Resistividad del suelo (ohm-cm)
- ✓  $L$  : Longitud del ánodo o relleno (cm)
- ✓  $d$  : diámetro del ánodo o relleno (cm)
- ✓  $h$  : profundidad al centro del ánodo (cm)

### Factor de congestionamiento

Respecto a la interferencia mutua (congestionamiento debido a que la corriente que proviene de cada ánodo compite por el mismo paso)<sup>34</sup>, para varios ánodos horizontales conectados a un cable colector en común, puede usarse la siguiente ecuación, que incluye un factor F de “congestionamiento”.

$$R_{aN} = \frac{R_a}{N} \times F$$

- ✓  $R_{aN}$  : Resistencia de N ánodos horizontales (ohm)
- ✓  $R_a$  : Resistencia de un ánodo horizontal (ohm)
- ✓  $N$  : cantidad de ánodos
- ✓  $F$  : factor de congestionamiento

<sup>33</sup> CP-3 – NACE; Cathodic Protection Technologist 2.4.1.2 Ánodos de Magnesio.

<sup>34</sup> CP-3 – NACE; Cathodic Protection Technologist 4.4.4 Resistencia de Varios Ánodos Horizontales Conectados a un Cable Colector Común.

$$F = 1 + \frac{\rho}{\pi S R_a} (\ln(0.656N))$$

- ✓  $F$  : Factor de congestionamiento.
- ✓  $\rho$  : Resistividad del suelo (ohm-cm)
- ✓  $R_a$  : Resistividad de un ánodo horizontal (ohm)
- ✓  $S$  : espaciamiento entre ánodos (cm)
- ✓  $N$  : cantidad de ánodos

### Cálculo de la Resistencia de la estructura al Terreno Remoto<sup>35</sup>

Para una estructura recubierta, la mayor parte de la resistencia al terreno remoto se dará a través del recubrimiento. De acuerdo con esto, si se asume una resistencia específica del recubrimiento ( $r'_c$ ), la resistencia de la estructura al terreno remoto ( $R_s$ ) puede calcularse a partir de la siguiente Ecuación:

$$R_s = \frac{r'_c}{A_s}$$

- ✓  $r'_c$ : Resistencia específica del recubrimiento (ohm-m<sup>2</sup>)
- ✓  $A_s$ : Superficie de la estructura (m<sup>2</sup>)

### Cálculo de las Resistencia del Cable

Considerando la información de proveedores y tablas, la Resistencia del Cable eléctrico ( $R_c$ ) puede determinarse de la siguiente manera:

$$R_c = r'_{cable} \times L_{cable}$$

- ✓  $r'_{cable}$ : Resistencia lineal del conductor (ohm/m)
- ✓  $L_{cable}$  : Longitud del cable (m)

### Cálculo de la Corriente de salida del ánodo

La salida de corriente ( $I_A$ ) de un sistema de ánodo galvánico es función de su potencial impulsor y la resistencia del circuito, como se muestra a continuación:

$$I_A = \frac{E_C - E_A}{R_{la} + R_c}$$

- ✓  $E_C$  : Potencial polarizado del cátodo (objeto de protección).
- ✓  $E_A$  : Potencial de diseño del circuito cerrado del ánodo.
- ✓  $E_C - E_A$  : potencial impulsor.
- ✓  $R_{la} + R_c$  : Resistencia del circuito.

En un diseño de protección catódica, el potencial impulsor de diseño es la diferencia entre el potencial polarizado del ánodo y el criterio de protección catódica seleccionado. Por ejemplo, si el criterio elegido es de  $-850$  mV cse y el potencial polarizado para un ánodo de magnesio de alto potencial es de  $-1700$  mV cse (con  $50$  mV asignados a la polarización, partiendo de un potencial de  $-1750$  mVcse), entonces el potencial impulsor ( $E_{cp}$ ) será:

$$E_{cp} = (-850 \text{ mV} - (-1700 \text{ mV})) = 850 \text{ mV}$$

<sup>35</sup> El terreno remoto es el punto en el terreno en el que, a mayor distancia respecto del ánodo, ya no se producen más cambios en el gradiente potencial. Las fórmulas utilizadas se basan en la resistencia al terreno remoto. Como los tanques y los ánodos no están en terreno remoto unos respecto de otros, los cálculos constituyen sólo una aproximación

## Cálculo de la Vida Útil del ánodo

La vida útil de un ánodo galvánico se puede estimar si se conoce su peso y salida de corriente.

$$L = \frac{W_t \cdot C_a \cdot U}{I_A}$$

- ✓  $L$  : Vida útil requerida (años)
- ✓  $W_t$  : Masa del ánodo elegido (lb).
- ✓  $C_a$  : Capacidad práctica del ánodo (A-año/lb). [ $C_a = C_t \cdot E$ ]
- ✓  $U$  : Factor de utilización.
- ✓  $I_A$  : salida de corriente del ánodo (A)

$C_a$  : La capacidad electroquímica es la inversa de la velocidad de consumo.

$C_t$  : Capacidad electroquímica teórica de drenaje de corriente del material anódico.

$E$  : Eficiencia electroquímica o factor de consumo, 0.5 para el ánodo de Magnesio.

La velocidad de consumo práctica para el Magnesio 17.5 lb/A-año.

La Capacidad electroquímica para el ánodo de Mg es 500 A-h/lb o 0.057 A-año/lb. (1 año = 8760 h)

## Cálculo de la Cantidad de Ánodos

Podemos estimar la cantidad de ánodos de dos maneras, en base a la capacidad electroquímica (inversa de la velocidad de consumo) y en base a la salida de corriente del ánodo (s). Cabe precisar la cantidad de ánodos a instalar debe exceder ambos resultados.

- a. Puede determinarse el peso mínimo de material anódico en base a la capacidad electroquímica, corriente de protección total requerida y vida útil anticipada para el sistema.

$$W_{\min \text{ requerido de Mg}} = \frac{I_{cp} \cdot L}{C_a \cdot U}$$

- ✓  $I_{cp}$ : Corriente de protección catódica total requerida (A).
- ✓  $L$  : Vida útil requerida (años)
- ✓  $C_a$  : Capacidad práctica del ánodo (A-año/lb).
- ✓  $U$  : Factor de utilización.
- ✓  $W_{\min \text{ requerido}}$ : peso del ánodo (lb)

$L$  : Cada empresa en función de la vida útil de las instalaciones a proteger determina el valor de  $L$ .

$U$  : El Factor de utilización está relacionado con la cantidad de ánodo que se puede consumir antes de volverse inefectivo, su valor esta entre 0.5 a 0.9, dependiendo del tipo de sistema y de las condiciones de funcionamiento.

Una vez determinado el mínimo peso de material anódico, se obtiene la mínima cantidad de ánodos para el sistema.

$$\# \text{Ánodos} = \frac{W_{\min \text{ requerido de Mg}}}{W_{\text{ánodo de magnesio}}}$$

- ✓  $W_{\text{ánodo}}$ : peso de cada ánodo proporcionado por el proveedor.

- b. A fin de garantizar que el drenaje de corriente desde los ánodos sea el requerido para proteger los tanques a la densidad de corriente determinada, se puede estimar de la siguiente manera:

$$\# \text{Ánodos}_{\min \text{imo}} = \frac{I_{cp}}{I_A}$$

- ✓  $I_{cp}$ : Corriente de protección catódica total requerida (A).
- ✓  $I_A$  : salida de corriente del ánodo (A)

## 8. Operación y mantenimiento del Sistema de Protección Catódica.

El criterio más común para asegurar una protección adecuada del ánodo de sacrificio para tanques de almacenamiento enterrados es la medida de un potencial negativo de al menos 850 mV entre la estructura y el suelo circundante<sup>36</sup>, cuando se utiliza un electrodo de referencia de Cu/CuSO<sub>4</sub>.

En caso la medición de potenciales polarizados se encuentre por debajo del criterio<sup>37</sup>, es preciso determinar la causa exacta. Los problemas de funcionamiento pueden deberse a factores fundamentales del sistema protección catódica, como lo son:

✓ Cambios en la polarización.

El principal síntoma es el aumento de la corriente de protección catódica debido a aumento de la superficie (deterioro del revestimiento, falla en la aislación eléctrica), aumento de la temperatura, entre otros.

✓ Cambios de la resistencia.

Cualquier aumento resultará en una disminución de la corriente y un potencial polarizado del ánodo más negativo. El aumento de la resistencia puede ocurrir por aumento resistividad del suelo (disminuye el contenido de humedad o temperatura), consumo del ánodo, cables rotos o corroídos o a empalmes corroídos, entre otros.

### Sugerencias

- ✓ Hidratar los ánodos con agua potable antes de instalarlos para activar el relleno (backfill).
- ✓ Implementar un sistema de tuberías de PVC u otro material no metálico, para la aplicación periódica de líquido que garantice la conservación de la humedad necesaria para disponer de una buena continuidad, y verificar constantemente su estado.
- ✓ Realizar las mediciones de potenciales de puesta en marcha durante la instalación de los ánodos.
- ✓ Revisar periódicamente el estado de los empalmes y cables eléctricos.

## 9. Caso práctico N° 1

Si bien el sistema de protección por ánodos galvánicos se puede aplicar para tanques y tuberías, en el caso que se presenta a continuación se realizarán los cálculos solo del sistema de protección catódica del tanque. Se considerará que el tanque está aislado en las interconexiones con las tuberías, y la instalación de los ánodos será de manera vertical y en paralelo.

<sup>36</sup> API RP 1632 - Protección catódica de tanques de almacenamiento enterrados y sistemas de tuberías, Reafirmado 2010. **Numeral 3.6.1.** "Existen varios criterios para determinar si se ha logrado una protección catódica adecuada en las estructuras enterradas (ver 4.4.1). (...). Durante la prueba, los ánodos de sacrificio permanecen unidos a la estructura, y todas las mediciones deben considerar todas las caídas de voltaje que no sean las que atraviesan el límite de la estructura / electrolito para una interpretación válida de los datos"

<sup>37</sup> CP - 3 - NACE; Cathodic Protection Technologist - Sección 5.8 Resolución de Problemas de los Sistemas de Protección Catódica

**Datos del tanque – Cabezas semiesféricas.**

Capacidad del tanque a proteger	30000 galones
Radio exterior	1.77 m
Longitud cilíndrica	9.43 m
Área superficial (considerando las bases del tanque) <sup>38</sup>	172.97 m <sup>2</sup>
A: Área superficial de la estructura total	1860.84 pie <sup>2</sup>

**Datos para el diseño del sistema de protección catódica.**

$\rho$ : Resistividad - Arena seca de río	4000 ohm-cm
L: Vida útil esperada	20 años
Revestimiento de protección en el tanque	90% efectivo (10% al desnudo)

**Para la densidad de corriente, de la información de las tablas presentadas, se considerará:**

Densidad de corriente, para el acero desnudo	1.2 mA/pie <sup>2</sup>
Densidad de corriente, para la superficie revestida	0.1 mA/pie <sup>2</sup>

**Para el ánodo de Mg de alto potencial, de la información de las tablas presentadas, se considerará:**

Ca: Capacidad práctica	0.057 A-año/lb
U: Factor de utilización	0.85
Pa: Potencial del ánodo	90% efectivo (10% de área desnuda)

**1. Cálculo de la Corriente de Protección Total Requerida ( $I_{cp}$ )**

$$I_{cp} = I_{R1} + I_{R2}$$

$$I_{cp} = \frac{\% \text{Área desnuda} \times \rho_{\text{corriente1}} \times \text{Área}}{1000} + \frac{\% \text{Efectivo} \times \rho_{\text{corriente2}} \times \text{Área}}{1000}$$

$$I_{cp} = \frac{10\% \times 1.2 \times 1860.84}{1000} + \frac{90\% \times 0.1 \times 1860.84}{1000}$$

$$I_{cp} = 0.390 \text{ A}$$

**2. Cálculo de la masa del material anódico.**

$$W_{\text{min requerido de Mg}} = \frac{I_{cp} \cdot L}{Ca \cdot U}$$

$$W_{\text{min requerido de Mg}} = \frac{0.390 \times 20}{0.057 \times 0.85}$$

$$W_{\text{min requerido de Mg}} = 161.31 \text{ lb}$$

<sup>38</sup> Se agregó 20% de área adicional, por base y otros elementos metálicos.

### 3. Cálculo de la cantidad de ánodos.

Elegimos primero el ánodo con el que se planea trabajar, en este caso será un ánodo de 17 libras<sup>39</sup>.

Peso de cada ánodo	17 lb
L: longitud	86.4 cm
D: diámetro	19.1 cm

$$\# \text{Ánodos} = \frac{W_{\text{min requerido de Mg}}}{W_{\text{ánodo de magnesio}}}$$

$$\# \text{Ánodos} = \frac{161.31 \text{ lb}}{17 \text{ lb}}$$

$$\# \text{Ánodos} = 9.49$$

### 4. Cálculo de las resistencias

Cálculo de la resistencia para el ánodo vertical

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi L} \left[ \ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1 \right]$$

$$R_a = \frac{4000}{2\pi \times 86.4} \left[ \ln\left(\frac{86.4}{19.1}\right) - 1 \right]$$

$$R_a = 19.07 \text{ ohm}$$

Cálculo de la resistencia de la estructura al terreno remoto

Asumimos que la resistencia de la estructura es despreciable.

Cálculo de la resistencia del cable.

Se estima utilizar para todo el sistema 50 m de cable #10 AWG con  $r'_{\text{cable}} = 3.33 \text{ ohm}/1000\text{m}$ .

$$R_c = r'_{\text{cable}} \times L_{\text{cable}}$$

$$R_c = (3.33 / 1000) \times 50$$

$$R_c = 0.166 \text{ ohm}$$

Como  $R_c$  es la resistencia del cable de todo el sistema, con un total de 50 m, para un ánodo consideremos una longitud estimada de 5 m, por lo que  $R_c' = 0.016 \text{ ohm}$ .

### 5. Cálculo de la Corriente de Salida inicial del Ánodo.

$$I_A = \frac{E_C - E_A}{R_a + R_c}$$

<sup>39</sup> Datos obtenidos de la ficha técnica del proveedor

$$I_A = \frac{0.85}{19.07 + 0.016}$$

$$I_A = 0.044 \text{ A}$$

6. Cálculo de la cantidad de ánodos, en base a la corriente de salida del ánodo.

$$\# \text{Ánodos}_{\text{mínimo}} = \frac{I_{cp}}{I_A}$$

$$\# \text{Ánodos}_{\text{mínimo}} = \frac{0.390}{0.044}$$

$$\# \text{Ánodos}_{\text{mínimo}} = 8.78$$

Comparando los resultados del numeral 3 y numeral 6, escogemos el valor más conservador y ajustamos el valor, decidiendo instalar 10 ánodos, en forma simétrica y rodeando al tanque. La longitud del lecho anódico que rodeará al tanque es de aproximadamente 40 m, por lo que el espaciamiento entre ánodos es 4.00 m. Asimismo, se considera una separación entre el ánodo y el tanque de 50 cm.

7. Cálculo de las resistencias del lecho anódico.

$$R_{la} = \frac{\rho}{2\pi N L} \left[ \ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1 + \frac{2L}{s} \ln(0.656N) \right]$$

$$R_{la} = \frac{4000}{2\pi \times 10 \times 86.4} \left[ \ln\left(\frac{8 \times 86.4}{19.1}\right) - 1 + \frac{2 \times 86.4}{400} \ln(0.656 \times 10) \right]$$

$$R_{la} = 2.506 \text{ ohm}$$

8. Cálculo de la corriente de salida de los ánodos.

$$I_A = \frac{E_C - E_A}{R_{la} + R_c}$$

$$I_A = \frac{-0.850 - (-1750)}{2.506 + 0.166}$$

$$I_A = 0.318$$

Para que este valor sea aceptable se debe cumplir la siguiente condición: La corriente de salida de los ánodos debe ser mayor a la corriente de protección catódica total requerida; caso contrario se debe incrementar la cantidad de ánodos (N) y en función a ello determinar el nuevo valor de espaciamiento entre ánodos. Con estos nuevos valores se deberá repetir los pasos 7 y 8.

En el caso en evaluación, se verifica que la corriente de salida de los ánodos ( $I_A = 0.318$ ), es menor a la corriente de protección catódica total requerida ( $I_{CP} = 0.390$ ), por lo que, a fin de garantizar la

salida de corriente necesaria, se puede elegir ánodos de dimensiones diferentes, ánodos extruidos, otra configuración de instalación, aumentar el número de ánodos, entre otros. En este caso elegiremos aumentar el número de ánodos ( $N$ ) y se recalculará el espaciamiento entre ánodos, para después repetir los pasos 7 y 8.

### 9. Repetimos los pasos 7 y 8.

Asumimos un valor de cantidad de ánodos, superior al anteriormente determinado y probamos mediante ensayo y error. Para continuar con el presente ejemplo, se asume que se instalarán 16 ánodos de 17 lb. Para esta cantidad de ánodos, el espaciamiento entre ánodos es de 250 cm.

#### Cálculo de las resistencias del lecho anódico.

$$R_{la} = \frac{\rho}{2\pi N L} \left[ \ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1 + \frac{2L}{s} \ln(0.656N) \right]$$

$$R_{la} = \frac{4000}{2\pi \times 16 \times 86.4} \left[ \ln\left(\frac{8 \times 86.4}{19.1}\right) - 1 + \frac{2 \times 86.4}{250} \ln(0.656 \times 16) \right]$$

$$R_{la} = 1.940 \text{ ohm}$$

#### Cálculo de la corriente de salida de los ánodos.

$$I_A = \frac{E_C - E_A}{R_{cp}}$$

$$I_A = \frac{0.85}{1.940 + 0.166}$$

$$I_A = 0.403$$

Se verifica que la corriente de salida ( $I_A = 0.403$ ) es mayor a la corriente de protección total requerida ( $I_{cp} = 0.390$ ), con lo cual el cálculo es aceptado. El peso total de 16 ánodos de magnesio de 17 lb cada uno es de 272 lb. Esto excede el peso mínimo de 161.31 lb requerido para alcanzar una vida útil de 20 años. Por lo que los ánodos podrán durar más que los 20 años requeridos.

Es recomendable instalar algún tipo de electrodo de referencia permanente bajo el fondo del tanque, y uno o dos cerca de la superficie. Estos últimos pueden usarse para verificar el funcionamiento del sistema de protección catódica a lo largo del tiempo, y también para determinar con precisión la corriente requerida para la protección catódica una vez instalados los tanques. También es recomendable conectar los grupos de ánodos a través de un resistor (shunt) capaz de medir la corriente y prever la inserción en este circuito de una resistencia de control capaz de limitar el flujo de corriente, en caso de que se produjera un drenaje excesivo de corriente innecesaria para la protección una vez instalado el sistema<sup>40</sup>.

<sup>40</sup> CP 4– Cathodic Protection Specialist. Sección 6, Página 6:6

### 10. Opción alternativa.

A fin de obtener una menor cantidad de ánodos, puede elegirse ánodos de dimensiones diferentes, según disponibilidad de los fabricantes. En esta ocasión elegiremos ánodos de Magnesio de alto potencial de 20 lb, con las siguientes dimensiones:

Masa	20 lb <sup>41</sup>
L: longitud	167.6 cm
D: diámetro	12.7 cm

Repetiremos los pasos 3, 4, 5, 6, 7 y 8.

#### 3. Cálculo de la cantidad de ánodos

En base a velocidad de consumo, vida útil y masa del ánodo, #Ánodos = 8.07

4. Cálculo de las resistencias:  $R_a = 13.900 \text{ ohm}$  y  $R_c = 0.166 \text{ ohm}$

5. Cálculo de la Corriente de Salida del Ánodo:  $I_A = 0.061 \text{ A}$

#### 6. Cálculo de la cantidad de ánodos

En base a la corriente de salida del ánodo. #Ánodos<sub>mínimo</sub> = 6.40

Comparando los resultados obtenidos en los numerales 3 y 6 de esta sección e iterando, elegimos instalar 12 ánodos en forma simétrica rodeando al tanque. El espaciamiento entre ánodos será 333 cm.

7. Cálculo de las resistencias del lecho anódico:  $R_{Ia} = 1.815 \text{ ohm}$

8. Cálculo de la corriente de salida de los ánodos:  $I_A = 0.428 \text{ A}$

Se verifica que la corriente de salida es mayor a la corriente de protección requerida ( $I_{cp} = 0.390 \text{ A}$ ).

### 11. Cálculo de la vida útil del ánodo.

$I_A$ , es la corriente de salida para un ánodo.

$$L = \frac{W_t \cdot C_a \cdot U}{I_A}$$

$$L = \frac{20 \times 0.057 \times 0.85}{\left(\frac{0.428}{12}\right)}$$

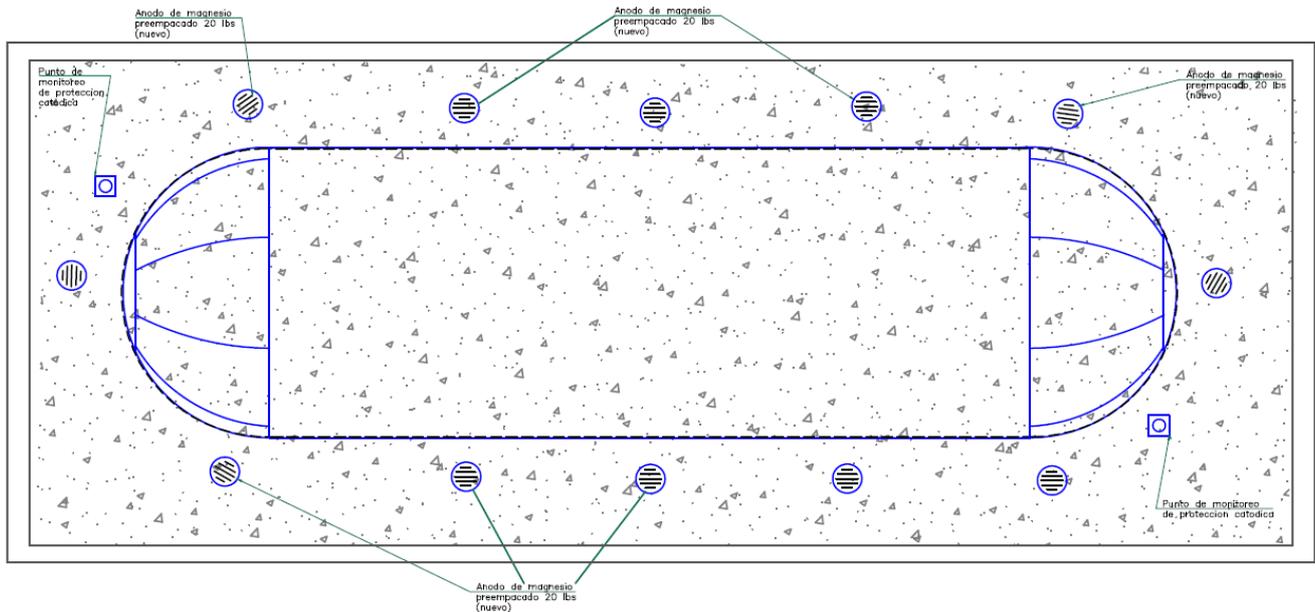
$$L = 27.10 \text{ años}$$

Se verifica que la corriente de salida ( $I_A = 0.428$ ) es mayor a la corriente de protección total requerida ( $I_{cp} = 0.390$ ), con lo cual el cálculo es aceptado. Por lo tanto, un sistema de 12 ánodos de 20 lb debería

<sup>41</sup> Datos obtenidos de la ficha técnica del fabricante

proteger la estructura durante 27.1 años. La corriente de salida debe ser de 0.428 A y la estructura debe polarizarse por lo menos a  $-0.850$  voltios.

Se sugiere realizar una prueba de demanda de corriente, para determinar de manera concreta, la cantidad de corriente que se necesita para proteger catódicamente el tanque de GLP. Esta prueba que es más concluyente determinara la cantidad de ánodos a instalar.



Esquema referencial de la instalación de 12 ánodos galvánicos de Magnesio de alto potencial, de 20 lb.

## 10. Caso práctico N° 2

En este caso se realizará la evaluación del sistema de protección catódica en un suelo de alta resistividad. Las dimensiones del tanque, porcentaje de recubrimiento efectivo y valores de densidad de corriente serán las mismas que en el caso anterior a fin de simplificar algunos cálculos, se considerará que el tanque está aislado en las interconexiones con las tuberías. Se prevé la instalación de ánodos extruidos, tipo varilla, colocados de manera horizontal y en paralelo.

### Datos del tanque – Cabezales semiesféricos.

Capacidad del tanque a proteger	30000 galones
Altura del monticulado en el que se encuentra el tanque	5.30 m
Radio exterior	1.77 m
Longitud cilíndrica	9.43 m
Área superficial (considerando las bases del tanque) <sup>42</sup>	172.97 m <sup>2</sup>
A: Área superficial de la estructura total	1860.84 pie <sup>2</sup>

### Datos para el diseño del sistema de protección catódica.

$\rho$ : Resistividad - Arena seca de río	40'000 ohm-cm
L: Vida útil esperada	20 años
Revestimiento de protección en el tanque	90% efectivo (10% al desnudo)

### Para la densidad de corriente, de la información de las tablas presentadas, se considerará:

Densidad de corriente, para el acero desnudo	1.2 mA/pie <sup>2</sup>
Densidad de corriente, para la superficie revestida	0.1 mA/pie <sup>2</sup>

### Para el ánodo de Mg de alto potencial, de la información de las tablas presentadas, se considerará:

Ca: Capacidad práctica	0.057 A-año/lb
U: Factor de utilización	0.85
Pa: Potencial del ánodo	90% efectivo (10% de área desnuda)

#### 1. Cálculo de la Corriente de Protección Total Requerida ( $I_{cp}$ )

Como las dimensiones de la estructura a proteger son las mismas que en el caso anterior, la corriente de protección requerida es:

$$I_{cp} = 0.390 \text{ A}$$

#### 2. Cálculo de la masa del material anódico.

En base a la capacidad electroquímica, vida útil y masa del ánodo.

$$W_{\min \text{ requerido de Mg}} = \frac{I_{cp} \cdot L}{Ca \cdot U}$$

$$W_{\min \text{ requerido de Mg}} = \frac{0.390 \times 20}{0.057 \times 0.85}$$

$$W_{\min \text{ requerido de Mg}} = 161.31 \text{ lb}$$

<sup>42</sup> Se agregó 20% de área adicional, por base y otros elementos metálicos.

### 3. Cálculo de la cantidad de ánodos.

Elegimos el ánodo con el que se planea trabajar, en este caso será un ánodo de Magnesio extruido tipo varilla<sup>43</sup>, instalado en posición horizontal, de 11.5 m cada uno.

Peso del ánodo	4.921 lb/m
Peso del ánodo (11.5 m)	56.594 lb
L: longitud	1150 cm
D: diámetro	3.964 cm

La cantidad de ánodos en base a velocidad de consumo, vida útil y masa del ánodo será:

$$\# \text{Ánodos} = \frac{W_{\text{min requerido de Mg}}}{W_{\text{ánodo de magnesio}}}$$

$$\# \text{Ánodos} = \frac{161.31 \text{ lb}}{56.59 \text{ lb}}$$

$$\# \text{Ánodos} = 2.85$$

### 4. Cálculo de las resistencias

#### Cálculo de la resistencia para el ánodo horizontal

Iniciamos el cálculo considerando la instalación de un ánodo horizontal a 31 cm de profundidad.

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi L} \left[ \ln\left(\frac{4L}{d}\right) + \ln\left(\frac{L}{h}\right) - 2 + \frac{2h}{L} \right]$$

$$R_a = \frac{40000}{2\pi \times 1150} \left[ \ln\left(\frac{4 \times 1150}{3.964}\right) + \ln\left(\frac{1150}{31}\right) - 2 + \frac{2 \times 31}{1150} \right]$$

$$R_a = 39.070 \text{ ohm}$$

#### Cálculo de la resistencia de la estructura al terreno remoto

Asumimos que la resistencia de la estructura es despreciable.

#### Cálculo de la resistencia del cable.

Se estima utilizar para todo el sistema 50 m de cable #10 AWG con  $r'_{\text{cable}} = 3.33 \text{ ohm}/1000\text{m}$ .

$$R_c = r'_{\text{cable}} \times L_{\text{cable}}$$

$$R_c = (3.33 / 1000) \times 50$$

$$R_c = 0.166 \text{ ohm}$$

Como  $R_c$  es la resistencia del cable de todo el sistema, con un total de 50 m, para la instalación de un ánodo consideremos una longitud estimada de 5 m, por lo que  $R_c' = 0.016 \text{ ohm}$ .

<sup>43</sup> Datos obtenidos del proveedor

### 5. Cálculo de la Corriente de Salida inicial del Ánodo.

$$I_A = \frac{E_C - E_A}{R_a + R_c}$$

$$I_A = \frac{0.850}{39.070 + 0.016}$$

$$I_A = 0.021 \text{ A}$$

### 6. Cálculo de la cantidad de ánodos, en base a la corriente de salida del ánodo.

$$\# \text{Ánodos}_{\text{mínimo}} = \frac{I_{cp}}{I_A}$$

$$\# \text{Ánodos}_{\text{mínimo}} = \frac{0.390}{0.021}$$

$$\# \text{Ánodos}_{\text{mínimo}} = 17.97$$

Comparando los resultados del numeral 3 y numeral 6, escogemos el valor más conservador y ajustamos el valor, decidiendo inicialmente instalar 18 ánodos, paralelos, distribuidos en ambos lados del tanque. El espaciamiento vertical elegido entre los ánodos horizontales será de 55 cm, considerando la altura del monticulado en el que se encuentra el tanque estacionario.

### 7. Cálculo de las resistencias del lecho anódico.

A continuación, se requiere la estimación de la resistencia de lecho anódico, para lo cual se calculará la resistencia individual de cada ánodo, enterrado horizontalmente a diferentes profundidades con la siguiente fórmula:

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi L} \left[ \ln\left(\frac{4L}{d}\right) + \ln\left(\frac{L}{h}\right) - 2 + \frac{2h}{L} \right]$$

# capa del ánodo	Profundidad (h, cm)	Resistencia (R <sub>a</sub> ,ohm)
1	31	39.0705
2	85.00	39.0661
3	140.00	39.0642
4	195.00	39.0631
5	250.00	39.0624
6	305.00	39.0619
7	360.00	39.0615
8	415.00	39.0613
9	470.00	39.0612

De los resultados obtenidos, un ánodo tipo varilla tendría una resistencia aproximada de 39.06 ohm. La Resistencia del lecho anódico se puede determinar de manera simplificada (despreciando los efectos de interferencia mutua), dividiéndolo entre la cantidad de ánodos totales.

$$R_a = \frac{39.06}{18} \approx 2.170 \text{ ohm}$$

**8. Cálculo de la corriente de salida de los ánodos.**

$$I_A = \frac{E_C - E_A}{R_{cp}}$$
$$I_A = \frac{0.850}{2.170 + 0.166}$$
$$I_A = 0.363$$

En el caso en evaluación, se verifica que la corriente de salida de los ánodos ( $I_A = 0.363$ ), es menor a la corriente de protección catódica total requerida ( $I_{CP} = 0.390$ ), por lo que, a fin de garantizar la salida de corriente necesaria, en este caso, elegiremos aumentar el número de ánodos ( $N$ ) considerando para ello 20 ánodos, luego se recalculará el espaciamiento vertical entre ánodos, para finalmente repetir los pasos 7 y 8.

**9. Repetimos los pasos 7 y 8.**

El espaciamiento vertical elegido entre los ánodos horizontales paralelos será de 50 cm, considerando la altura del monticulado en el que se encuentra el tanque estacionario.

7. Cálculo de las resistencias del lecho anódico:  $R_a = 1.95 \text{ ohm}$

8. Cálculo de la corriente de salida de los ánodos:  $I_A = 0.401 \text{ A}$

Se verifica que la corriente de salida ( $I_A = 0.401$ ) es mayor a la corriente de protección total requerida ( $I_{CP} = 0.390$ ), con lo cual el cálculo es aceptado. El peso total de 20 ánodos de magnesio extruido tipo varilla de 11.5 m de longitud cada uno es de 1131 lb. Este valor es mayor al requerido para alcanzar una vida útil de 20 años, en consecuencia este valor es aceptado e incluso, los ánodos podrán durar más que los 20 años requeridos.

Se sugiere realizar una prueba de demanda de corriente, para determinar de manera concreta, la cantidad de corriente que se necesita para proteger catódicamente el tanque de GLP. Esta prueba que es más concluyente determinara la cantidad de ánodos a instalar.