

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN  
CATÓDICA CON ÁNODO DE SACRIFICIO PARA  
TANQUES DE GLP DE 10 000 GALONES”**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE**

**INGENIERO MECÁNICO**

**GERARDO FLORENTINO SALDARRIAGA VARGAS**

**PROMOCION 1990-II**

**LIMA – PERU**

**2012**

# **“DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS DE SACRIFICIO PARA TANQUE DE GLP DE 10000 GALONES”**

**OBJETIVO:** Diseñar un sistema de protección catódica con ánodos de sacrificio de un tanque enterrado para GLP de 10000 galones de capacidad ubicado en la zona norte de Lima.

## **PRÓLOGO**

- 1. Introducción**
- 2. Fundamentos teóricos de la protección contra la corrosión**
- 3. Diseño de sistema de protección anticorrosiva**
- 4. Costos**

## **CONCLUSIONES**

## **RECOMENDACIONES**

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **PLANOS**

## **ANEXOS**

***Con eterna gratitud a mis padres  
Y a mi familia por su permanente e  
incondicional apoyo.***

# ÍNDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Prólogo.....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>1    <b>Introducción.....</b></b>  | <b>3</b>  |
| 1.1 <b>Antecedentes.....</b>  | <b>3</b>  |
| 1.2 <b>Objetivos.....</b>   | <b>3</b>  |
| 1.3 <b>Justificación.....</b>   | <b>4</b>  |
| 1.4 <b>Limitaciones.....</b>  | <b>5</b>  |
| <b>2    <b>Fundamentos teóricos de la protección contra la corrosión.....</b></b> | <b>6</b>  |
| 2.1 <b>Condiciones ambientales y corrosión en el Perú.....</b>                    | <b>6</b>  |
| 2.1.1 <b>Efectos de la corrosión en estructuras metálicas.....</b>                | <b>7</b>  |
| 2.1.2 <b>Efectos sobre la seguridad de las instalaciones.....</b>                 | <b>8</b>  |
| 2.1.3 <b>Impacto económico de la corrosión.....</b>                               | <b>9</b>  |
| 2.1.4 <b>Métodos de protección.....</b>   | <b>11</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.1.4.1 Circuitos impresos.....                                    | 15        |
| 2.1.4.2 Ánodos de sacrificio.....                                  | 16        |
| 2.1.5 Protección con ánodos de sacrificio.....                     | 16        |
| 2.1.6 Características de los ánodos de sacrificio.....             | 20        |
| 2.1.6.1 Metales y aleaciones anódicas.....                         | 23        |
| 2.1.6.2 Componentes estándar.....                                  | 24        |
| 2.1.6.3 Peso de materiales anódicos.....                           | 24        |
| 2.1.6.4 Relleno anódico o backfill.....                            | 26        |
| 2.1.7 Criterios de diseño de protección con ánodos de sacrificio.. | 28        |
| <b>2.2 Descripción del tanque y sus instalaciones.....</b>         | <b>28</b> |
| 2.2.1 Características de la zona.....                              | 28        |
| 2.2.2 Características generales del tanque.....                    | 29        |
| 2.2.3 Geometría del tanque.....                                    | 30        |
| 2.2.4 Características de la instalación.....                       | 30        |
| 2.2.4.1 Capacidad de operación.....                                | 31        |
| 2.2.4.2 Material.....  | 31        |
| 2.2.4.3 Forma.....   | 31        |
| 2.2.4.4 Normas de diseño, fabricación y pruebas.....               | 33        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.2.4.5  | Instalación.....  | 33        |
| 2.2.5    | Definición de GLP.....                                    | 33        |
| 2.2.6    | Características del GLP.....                              | 34        |
| 2.3      | Importancia y actualidad del tema.....                    | 37        |
| <b>3</b> | <b>Diseño de sistema de protección anticorrosiva.....</b> | <b>39</b> |
| 3.1      | Condiciones de diseño.....                                | 39        |
| 3.1.1    | Parámetros de diseño.....                                 | 39        |
| 3.1.2    | Normas técnicas aplicables.....                           | 40        |
| 3.2.     | Selección del método.....                                 | 40        |
| 3.3      | Metodología de diseño.....                                | 41        |
| 3.3.1    | Dimensiones del área a proteger.....                      | 43        |
| 3.3.2    | Corriente de protección.....                              | 43        |
| 3.3.3    | Selección del material anódico.....                       | 45        |
| 3.3.4    | Masa de ánodo de sacrificio.....                          | 45        |
| 3.3.5    | Selección inicial del número y tamaño de ánodos.....      | 46        |
| 3.3.6    | Cálculo de la resistencia del ánodo.....                  | 47        |
| 3.3.7    | Resistencia del conductor eléctrico.....                  | 51        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.3.8    | Corriente drenada por el ánodo.....          | 53        |
| 3.3.9    | Tiempo de vida del lecho anódico.....        | 55        |
| 3.3.10   | Masa de ánodo de sacrificio.....             | 56        |
| 3.4      | Diseño del sistema.....                      | 57        |
| 3.5      | Instalación del sistema.....                 | 68        |
| 3.5.1    | Acondicionamiento del tanque de GLP.....     | 68        |
| 3.5.2    | Instalación de ánodos y relleno anódico..... | 69        |
| 3.6      | Resultados.....                              | 75        |
| <b>4</b> | <b>Costos.....</b>                           | <b>76</b> |
| 4.1      | Costos de Inversión.....                     | 76        |
| 4.2      | Costos de operación.....                     | 76        |
| 4.3      | Costo total.....                             | 77        |
| 4.4      | Ventajas económicas.....                     | 77        |
|          | CONCLUSIONES.....                            | 79        |
|          | RECOMENDACIONES.....                         | 80        |
|          | BIBLIOGRAFÍA.....                            | 81        |

|             |    |
|-------------|----|
| PLANOS..... | 81 |
| ANEXOS..... | 83 |

## **PRÓLOGO**

**El presente trabajo de diseño de un sistema de protección catódica con ánodos de sacrificio para un tanque de gas licuado de petróleo (GLP) de 10000 galones de capacidad ha sido dividido en 4 capítulos.**

**En el Capítulo 1 se presentan los antecedentes que motivan el desarrollo del presente Informe, así como el objetivo que es el diseño del sistema de protección anticorrosión de un tanque enterrado de 10 000 galones líquidos destinado al almacenamiento de GLP. Se incluyen la justificación y las limitaciones del sistema de protección desarrollado.**

**En el Capítulo 2 se presenta los fundamentos teóricos de la protección anticorrosión, considerando las condiciones ambientales y los efectos de la corrosión en el Perú. En los efectos se consideran de manera cualitativa los daños en las estructuras metálicas enterradas, los efectos sobre la seguridad de las instalaciones y el impacto económico de la corrosión. Se presentan los métodos de protección y se desarrollan los aspectos relevantes de la protección con ánodos de sacrificio, como son: sus características, dimensiones y criterios de diseño. Asimismo se indica la descripción del tanque y sus instalaciones.**

**El capítulo 3 contiene el desarrollo del diseño del sistema de protección anticorrosiva dándose las condiciones generales de diseño, la selección del método**

de protección y se presenta la metodología de diseño. Se efectúa el diseño del sistema y se presentan las condiciones requeridas para el acondicionamiento del tanque.

En el capítulo 4 se presentan los costos de adquisición e instalación del sistema diseñado, así como la incidencia de los costos de operación y mantenimiento. Se señalan las ventajas económicas de la instalación del sistema y los riesgos de no implantarlo.

# **CAPITULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 ANTECEDENTES**

La corrosión es una forma de degradación de un metal a su forma nativa como *mineral*, como óxidos, hidróxidos y sales, debida a su interacción con el medio que lo rodea. Si este medio es no iónico la corrosión es química, y si el medio es iónico la corrosión es electroquímica. De esta manera los sistemas tienden a alcanzar un estado de equilibrio estable.

Según la naturaleza del medio corrosivo existen los siguientes tipos:

Corrosión gaseosa o seca.

Corrosión atmosférica.

Corrosión líquida.

Corrosión subterránea.

### **1.2 OBJETIVOS**

El objetivo es diseñar un sistema de protección anticorrosión de un tanque de 10 000 galones de GLP, con el método de ánodos de sacrificio para garantizar una protección adecuada por un periodo no menor de quince años.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

#### **Técnica**

*El tanque está destinado para almacenar GLP líquido en un gasocentro, por lo que las condiciones de su instalación se rigen por el reglamento de establecimientos de gas licuado de petróleo para uso automotor – gasocentros- DECRETO SUPREMO N° 019-97.*

Este reglamento establece que los tanques deberán tener protección catódica y protección anticorrosiva. La protección catódica debe estar de acuerdo a las especificaciones de la National Association of Corrosion Engineers NACE (Asociación Nacional de Ingenieros en Corrosión) según la norma NACE Standar RP0285.

El tanque es un recipiente sometido a una presión interna con paredes de espesor suficiente para soportar la presión interior.

Si el tanque no tiene protección catódica, la corrosión va a reducir el espesor de sus paredes lo que resulta sumamente peligroso porque en los puntos donde se produce la corrosión el espesor de la pared se reduce y puede llegar a ser peligroso ya que este tipo de fallas en la estructura por corrosión podrían producir fugas de gas que puedan causar incendios, explosiones y liberación de productos tóxicos.

#### **Económica**

La corrosión destruye el metal de una estructura haciendo que ésta se vuelva peligrosa o simplemente inservible para los propósitos para los que fue diseñada. Para retardar o evitar llegar a esta situación, la estructura se pinta periódicamente lo que aumenta considerablemente el costo de mantenimiento.

Pero si se llegara a la situación de hacer del tanque una estructura inservible el impacto económico sería muy grande debido a la necesidad de invertir en nuevos equipos para reemplazar a los originales. A esto se le debe sumar los costos de la paralización de la planta.

Como se trata de tanques de almacenamiento de combustibles, su valor es del orden de miles de dólares, mientras que el costo de los ánodos de sacrificio adecuados es del orden de cientos de dólares.

Otro aspecto importante de la corrosión es que en algunos casos si bien no llega a poner en peligro la estructura, su presencia en la superficie metálica tiene un aspecto estético negativo que deprecia el valor de la estructura. Esto puede tener un impacto significativo en el caso de reventa de equipos.

#### **1.4 LIMITACIONES**

El proyecto considera solo el diseño del sistema de la protección catódica del tanque considerando sólo la superficie exterior. No se considera la corrosión interior debido a que en el interior no hay oxígeno porque el GLP está a una presión superior a la de la atmósfera lo que hace que el flujo de masa sea siempre del interior del tanque hacia el exterior.

Cualquier volumen de oxígeno que pudiera haber ingresado se elimina en la purga inicial en que se elimina el aire y en las sucesivas purgas que se realizan durante la operación del tanque.

No considera la corrosión por unión de elementos de metales diferentes y corrosión por esfuerzos derivados de las tensiones internas por deformaciones en frío.

## **CAPITULO 2**

# **FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN**

### **2.1 CONDICIONES AMBIENTALES Y CORROSIÓN EN EL PERÚ**

La corrosión de las estructuras depende de las condiciones ambientales donde se instalan y de la forma de instalación. Varía si están expuestas a la atmósfera, enterradas o sumergidas en agua de mar o dulce, de ríos, lagos u otros.

En el Perú las condiciones atmosféricas críticas se presentan en la costa en zonas cercanas al mar, son muy corrosivas para estructura metálicas expuestas a la atmósfera. Las estructuras sumergidas más afectadas son las expuestas al agua del mar. En el caso de las estructuras enterradas las condiciones dependen de las condiciones locales que son muy variadas. En el caso de este proyecto el medio en que se entierra la estructura es artificial, establecido por normas y reglamentos.

### **2.1.1 Efectos de la corrosión en estructuras metálicas**

No se puede eliminar la corrosión, por lo que en la práctica, lo que se pretende es controlar sus efectos.

**Estructuras metálicas bajo acción de la corrosión**

Entre las estructuras metálicas de propósitos generales se pueden considerar

Tanques y recipientes atmosféricos o sometidos a presión interior o exterior.

Estructuras metálicas formadas por columnas, vigas, viguetas y techos, con elementos de alma llena, armaduras o cerchas.

Estas estructuras pueden estar instaladas en contacto con la atmósfera, semi enterradas, enterradas o sumergidas en agua de mar o en aguas de ríos, lagunas u otros cursos de agua.

Se construyen con acero estructural, acero al carbono bajo normas ASTM y en casos particulares se construyen con aceros especiales denominados inoxidable de la serie AISI, pero estas aplicaciones están limitadas por su alto costo, que es aproximadamente cuatro veces mayor que las de acero al carbono.

Estas estructuras generalmente están protegidas por una capa de pintura anticorrosiva o epóxica, pero ésta no es suficiente protección en un medio corrosivo.

Al estar en un medio corrosivo una superficie metálica se degrada a mineral de forma paulatina y se forma una capa de óxido de hierro que tiene la forma de un polvo rojizo. Este polvo se desprende dejando expuesta una

nueva superficie metálica que se vuelve a corroer, continuando el proceso mientras la estructura metálica se mantenga en el medio corrosivo.

El efecto de la formación y caída de óxido en forma de polvo causa una reducción de la masa metálica de la estructura. Esta reducción de masa tiene como efecto la reducción del área de la sección recta del elemento sometido a la corrosión.

### **2.1.2 Efectos sobre la seguridad de las instalaciones**

Los efectos de la corrosión sobre la seguridad de las instalaciones dependen del tipo de estructura y de la forma como la reducción del área afecta a su geometría y la resistencia mecánica de sus elementos.

Para el caso de recipientes cerrados depende del medio corrosivo exterior y de las características del fluido contenido. Si el medio exterior es corrosivo, la corrosión será en la superficie exterior y si además el fluido interior también es corrosivo se producirá también corrosión interior. Como resultado se tiene una reducción del espesor de las paredes del recipiente.

El efecto de la reducción del espesor de las paredes del recipiente puede tener dos efectos según el valor de la presión interior.

Para tanques atmosféricos la corrosión localizada puede llegar a perforar la pared del recipiente y causar el derrame del líquido contenido.

Para tanques sometidos a presión interior la corrosión puede causar la reducción del espesor de la pared generando una situación en que puede causar el colapso del recipiente. Esta situación es muy peligrosa cuando se almacenan combustibles u otros fluidos inflamables debida a fugas o derrames que pueden causar incendios o explosiones.

La reducción de la sección recta tiene como efecto reducir el radio de giro lo que reduce el momento de inercia. En barras sometidas a compresión se puede producir una falla por rigidez.

En el caso de estructuras metálicas generalmente se utilizan perfiles estructurales I, U, C, barras circulares, cuadradas o exagonales y perfiles compuestos. En este caso la corrosión es exterior y tiene como efecto una reducción del área de la sección recta.

En términos económicos la corrosión, en el mejor de los casos hace que el valor residual real de una estructura metálica se reduzca a cero en el periodo de su vida útil, o en el peor de los casos puede provocar su colapso antes que concluya dicho periodo y se tenga que reemplazar totalmente, adelantando la inversión de reemplazo causando una gran pérdida económica.

### **2.1.3 Impacto económico de la corrosión**

#### **Destrucción de las estructuras**

La corrosión tiene como resultado la destrucción de un metal por reacción química o electroquímica por el medio ambiente.

Esta destrucción representa desde costos de operación muy elevados hasta costos por reparaciones o reposición de equipos debido a la destrucción de la estructura.

#### **Efectos en la inversión**

Otro efecto económico importante es en la inversión en equipos e instalaciones que se efectúa durante la etapa de diseño de los equipos debido a que la corrosión impone condiciones de diseño destinadas a contrarrestarla.

Un método de protección empleado normalmente en el diseño consiste en aumentar el espesor de la plancha un determinado número de milímetros para compensar la reducción del espesor de la plancha. Este sobredimensionamiento es un aumento de costos de inversión que no evita la corrosión y se limita a garantizar la utilidad de la instalación durante un determinado número de años, pero pasado ese tiempo la corrosión hará manifiesto su efecto negativo, por lo cual se suele tener en cuenta lo siguiente:

Se utilizan materiales con alto porcentaje de pureza.

Se utilizan aleaciones especiales como la de los aceros inoxidable.

Se someten a tratamientos térmicos para alivio de tensiones.

Se consideran efectos en el costo de operación y mantenimiento

Generalmente para proteger una estructura contra la corrosión se actúa sobre la estructura, o sobre el fluido con el que operan.

En el primer caso la superficie se cubre con capas anticorrosivas de pinturas, capas de óxido o recubrimientos metálicos, pero éstas no son una protección que evita la corrosión por lo que se deben realizar periódicamente con un doble costo, el de pintado y el del daño de la

corrosión que de todas maneras se produce. No son aplicables para velocidad de corrosión mayor de 1,3 mm/año.

En el segundo caso se utilizan *inhibidores* que se mezclan con el fluido, como los anticongelantes adicionados al agua de refrigeración de vehículos.

En estructuras, si el efecto de la corrosión se localiza en una zona determinada, el daño puede ser reparable, pero si este ocurre en áreas muy grandes las reparaciones pueden ser antieconómicas o peligrosas.

En el caso de tanques enterrados sometidos a presión interior la reducción del espesor de las paredes del recipiente puede convertir al tanque en una instalación peligrosa.

#### **2.1.4 Métodos de protección**

Fenómeno de la corrosión

La *corrosión* es un fenómeno que depende de formación de una pila electroquímica que requiere la presencia de un electrólito en el que se produce la interacción de:

Un ánodo o zona metálica más electronegativa

Un electrolito, conductor

Un cátodo o zona metálica menos electronegativa

Estos tres elementos interactúan de la siguiente forma:

Se produce una reacción de oxidación, en la que se liberan electrones del ánodo, que causa la aparición de una corriente que circula a través del electrolito del ánodo (que se corroe) al cátodo que permanece

intacto, creando una capa fina de material en la superficie, que van formándose inicialmente como manchas hasta que llegan a aparecer imperfecciones en la superficie del metal.

### Corrosión en suelos

La corrosión por suelos, es un proceso de degradación del metal de estructuras enterradas que depende de factores como el contenido de humedad, composición química, pH del suelo, pero en la práctica suele utilizarse comúnmente el valor de la resistividad eléctrica del suelo como índice de su agresividad. La presencia de iones tales como cloruros, tendrán resistividades bajas, por la alta facilidad de transportación iónica.

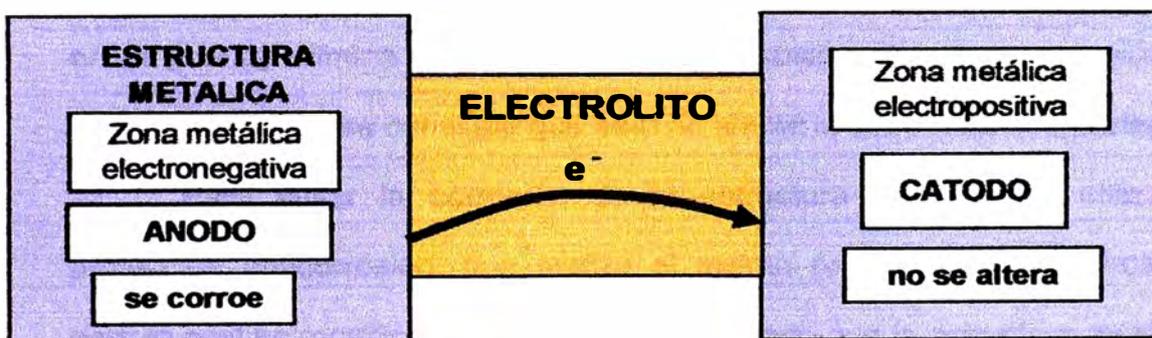


Fig. 2.1 Esquema de corrosión

### Protección anticorrosión

La protección anticorrosión consiste en evitar que la estructura metálicas sufra el efecto de la corrosión y para lograrlo se debería eliminar la pila electroquímica que se produce.

Para lograrlo se debe desarticular el circuito eléctrico que permite que se produzca la corrosión existiendo dos posibilidades, una es eliminar alguno de sus componentes y otra es introducir una resistencia eléctrica que

permita que quede como un circuito abierto, sin circulación de corriente que produzca la corrosión.

No se pueden eliminar los componentes de la pila electroquímica porque ésta se halla constituida por elementos que forman parte de la estructura y la instalación.

Una alternativa de solución no es eliminar uno de los componentes, porque no se puede, si no interrumpir el circuito eléctrico de la pila electroquímica para que quede en condición de circuito abierto. Esto se podría lograr introduciendo una resistencia infinita en el circuito la que puede ser una capa aislante de pintura que recubra la estructura metálica o una capa de galvanizado. Esta solución es poco práctica y muy costosa.

Se adopta la protección catódica, que es un método electroquímico en el que no elimina el fenómeno de la corrosión si no que se utiliza el mismo principio y se consigue que ésta no afecte la estructura que protege.

Para evitar la corrosión de la estructura metálica se utiliza la protección anticorrosión, que realiza el mismo proceso que la corrosión, para lo cual se modifica la pila galvánica haciendo que la estructura metálica actúe como cátodo, para lo cual se introduce un componente externo que produce la corriente que actúa sobre toda la superficie de la estructura que se desea proteger.

El nuevo circuito de la pila galvánica se muestra en la figura 2.2.

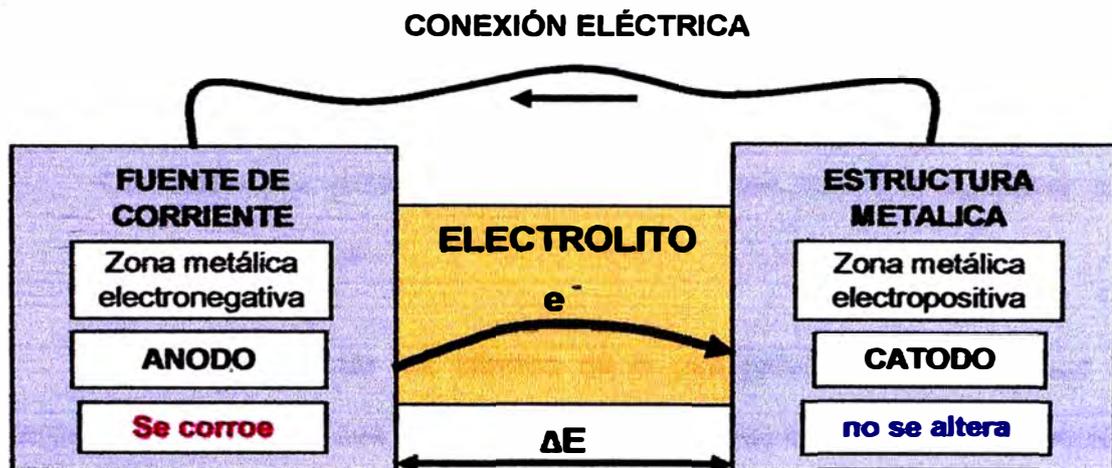


Fig. 2.2 Esquema de protección catódica

Para que la corriente sea forzada sobre la estructura, es necesario el potencial del ánodo aplicado sea mayor el del metal protegido para que exista una diferencia de potencial que permita la circulación de corriente eléctrica del ánodo al metal protegido.

#### Tipos de corrosión

- **Corrosión uniforme:** donde la corrosión química o electrolítica actúa uniformemente sobre toda la superficie del metal.
- **Corrosión gálvanica:** ocurre cuando metales diferentes se encuentran en contacto, ambos metales poseen potenciales eléctricos diferentes lo cual favorece la aparición de un metal como ánodo y otro como cátodo, a mayor diferencia de potencial el material más activo será el ánodo.
- **Corrosión intergranular:** es la que se encuentra localizada en los límites de grano, esto origina pérdidas en la resistencia que desintegran los bordes de los granos.

- **Corrosión por esfuerzo:** se refiere a las tensiones internas luego de una deformación en frío.
- **Corrosión por picaduras:** aquí se producen hoyos o agujeros por agentes químicos.

Para contrarrestar los efectos de la pila galvánica que produce la corrosión en sus diversas modalidades existen dos métodos de protección que se utilizan en la técnica de protección anticorrosión,

- **Método de circuitos impresos.**
- **Método de ánodos de sacrificio.**

#### 2.1.4.1 Circuitos impresos

En este caso se aplica una corriente negativa para rebajar el potencial del metal que se tiene que proteger. Esta corriente se aplica con una fuente de corriente, que en este caso está formada por una batería o un rectificador de corriente alterna a continua y un circuito electrónico impreso.

En este caso se tiene como ventaja que ésta corriente se puede regular variando los parámetros eléctricos y como desventaja que requiere mantenimiento permanente del sistema.

#### 2.1.4.2 Ánodos de sacrificio

En el caso del método del ánodo de sacrificio se coloca un metal *cuyo potencial es más electronegativo que el potencial de la superficie metálica que se quiere proteger* y se conecta eléctricamente con ella.

El resultado es que se forma una nueva pila galvánica en la que la zona catódica es la estructura que se quiere proteger y la zona anódica es el ánodo metálico colocado.

Se debe instalar un conductor eléctrico que conecte el ánodo con la estructura metálica que protege.

#### 2.1.5 Protección con ánodos de sacrificio

En este caso el sistema de protección tiene la forma del esquema mostrado en la Fig. 2.2 en el cual el material anódico que se introduce en el sistema tiene la forma de un cilindro insertado en un material de recubrimiento llamado backfill.

Este proceso se representa en el diagrama de Pourbaix mostrado en la Fig. 2.3

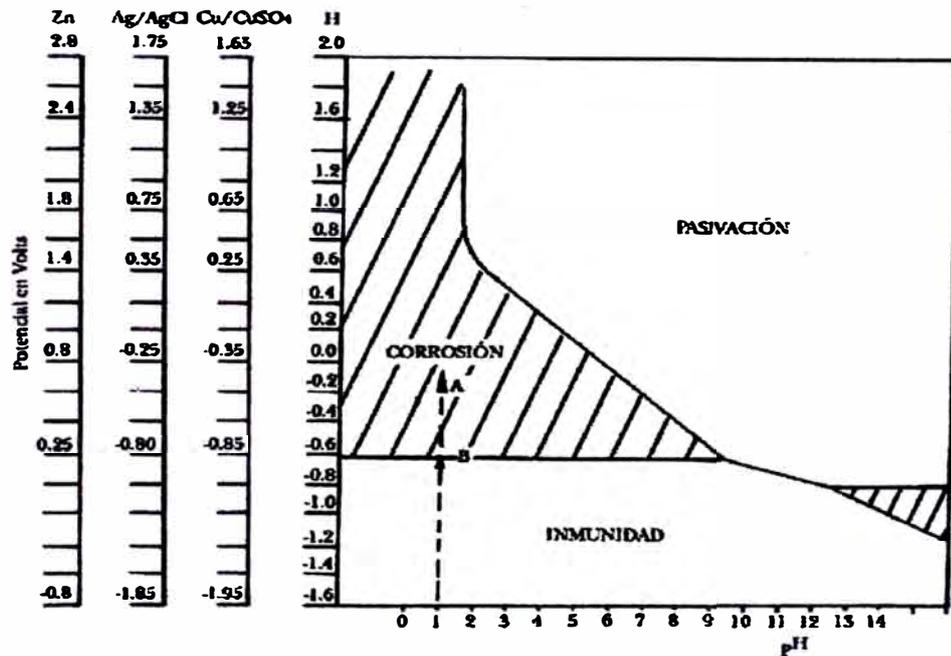


Fig.2.3 Diagrama de Pourbaix

En este caso se muestra el valor del pH del medio y el nivel de tensión referido a diversos ánodos de referencias, de elementos como el Hidrógeno y el Zinc, y aleaciones de cobre y plata.

Es muy frecuente contar con tablas de potencial electroquímico referidas al ánodo de Cu/CuSO<sub>4</sub>, como la que se muestra en la serie electroquímica de la tabla 2.1.

Para que un metal tenga una protección adecuada el material del ánodo de sacrificio debe tener un potencial mayor que el metal que se tiene que proteger de modo que se garantice una diferencia de potencial adecuada entre ambos.

Tabla 2.1 Serie Electroquímica referida al Cu/CuSO<sub>4</sub>

| Metal        | Tensión (V)   |
|--------------|---------------|
| Li+          | -3.045        |
| K+           | -2.925        |
| Rb+          | -2.924        |
| Na+          | -2.715        |
| <b>Mg++</b>  | <b>-1.866</b> |
| Ca++         | -2.870        |
| <b>Al+++</b> | <b>-1.670</b> |
| <b>Zn++</b>  | <b>-0.762</b> |
| Cr++         | -0.710        |
| <b>Fe++</b>  | <b>-0.441</b> |
| Cd++         | -0.397        |
| Ti+          | -0.336        |
| Co++         | -0.290        |
| Ni++         | -0.220        |
| Sn++         | -0.136        |
| Pb++         | -0.129        |
| <b>H+</b>    | <b>0</b>      |
| Bi+++        | 0.220         |
| Cu++         | 0.340         |
| Te++++       | 0.558         |
| Hg++         | 0.798         |
| Ag+          | 0.799         |
| Au+++        | 1.120         |
| Pt++         | 1.200         |

El potencial eléctrico del ánodo depende de algunas características del medio en el cual que encuentra la estructura a proteger tales como:

La temperatura del medio

Se recomienda un incremento de tensión de  $-2 \text{ m V/}^\circ \text{C}$  por cada grado de aumento de la temperatura medio.

Presencia de bacterias sulfato reductoras.

El potencial de los ánodos se mide con referencia al sulfato de cobre, por lo cual la presencia de bacterias de sulfato reductoras en el medio altera los valores de referencia.

Para compensar esta variación de los valores de referencia se recomienda un incremento de  $-0,1$  V, es decir de una reducción del potencial del ánodo de sacrificio que se debe seleccionar.

### Resistividad

La resistividad del medio es determinante cuando se selecciona no sólo el potencial, si no también el sistema de protección.

El sistema de ánodos de sacrificio se utiliza cuando los requerimientos de corriente son pequeños, las estructuras no son muy grandes y el medio electrolítico es de baja resistividad.

La relación entre la resistividad del terreno y las características corrosivas del medio en que se encuentra la estructura que se tiene que proteger se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Características corrosivas de terrenos en función de su resistividad.

| Resistividad<br>( <i>Ohm-cm</i> ) | Característica<br>del medio |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| Bajo 900                          | Muy corrosivo               |
| 900 a 2 300                       | Corrosivo                   |
| 2 300 a 5 000                     | Moderadamente corrosivo     |
| 5 000 a 10 000                    | Medio corrosivo             |
| Sobre 10 000                      | Menos corrosivo             |

### Relación entre el metal del ánodo y la resistividad del medio

Para proteger estructuras metálicas de acero, los metales para ánodos que se pueden utilizar son los nueve que se encuentran sobre el  $Fe^{++}$  (tabla 2.1), pero de ellos los que se utilizan con mayor frecuencia son solo tres:

- Zinc
- Aluminio
- Magnesio

La experiencia acumulada en el uso de ánodos de sacrificio determina metales de usos preferentes o recomendados que se pueden utilizar, según la resistividad del medio en que se encuentra la estructura que se debe proteger.

Los más utilizados son el aluminio, zinc y el magnesio tal como se muestran en la tabla 2.3

Tabla 2.3 Material del ánodo según la resistividad del medio.

| Resistividad del medio<br>(ohm-cm) | Material del ánodo |
|------------------------------------|--------------------|
| 800 a 3000                         | Magnesio           |
| 20 a 1000                          | Zinc               |
| 20 a 400                           | Aluminio           |

### 2.1.6 Características de los ánodos de sacrificio

Los ánodos de sacrificio tienen características técnicas que dependen del metal o de las aleaciones que lo componen.

La resistividad eléctrica de los ánodos depende exclusivamente del material del ánodo, tal como se muestra en la tabla 2.4.

Para el caso del zinc, magnesio y aluminio, se disponen de tablas con las características técnicas de ánodos de estos metales.

Tabla 2.4 Resistividad eléctrica de materiales del ánodo.

| Material del ánodo | Resistividad del ánodo<br>(ohm-cm) |
|--------------------|------------------------------------|
| Magnesio           | 0,00008                            |
| Zinc               | 0.0000057                          |
| Aluminio           | 0.0000026                          |

Otras características son:

#### Contenido de energía

El contenido de energía de un ánodo es la cantidad de amperios hora que puede suministrar un ánodo, que tiene determinada cantidad de masa durante un periodo de tiempo.

El contenido de energía depende del metal del ánodo, ya que cada uno de ellos tiene un contenido unitario de energía que se expresa en A.h/kg, por lo que el contenido de energía del ánodo depende del tipo de metal y de su cantidad de masa.

La cantidad de amperios hora que suministra un ánodo no es constante a lo largo de su periodo de vida si no que disminuye paulatinamente a lo largo del tiempo.

El metal que tiene mayor contenido de energía unitario es el aluminio, siendo su principal aplicación en la protección de estructuras en ambientes marinos. Para el caso de ambientes sólidos que rodean estructuras enterradas el que presenta mayores ventajas es el magnesio y el de menor contenido de energía es el zinc.

### Eficiencia

La eficiencia del ánodo según el metal y el relleno varía según el caso, siendo los valores más altos para el aluminio y el zinc, alcanzando valores hasta del 95 %, mientras que el magnesio tiene una eficiencia de sólo el 50%.

### Backfill

Es una mezcla estabilizadora cuyo propósito es uniformizar la salida de corriente en toda la superficie del ánodo, cuyo efecto práctico es lograr un desgaste uniforme de toda la superficie del ánodo.

Existen diversas mezclas de relleno que dependen tanto del ánodo como del tipo y forma del cuerpo metálico del ánodo. Una mezcla muy común es:

|                |      |
|----------------|------|
| Sulfato Calcio | 75 % |
| Bentonita      | 20 % |
| Sulfato sódico | 5 %  |

Con ánodos de magnesio y zinc se utilizan rellenos, backfill, los que son una mezcla de componentes en polvo que tienen la composición porcentual en peso que se presentan en la tabla 2.5.

Los ánodos de aluminio, que se utilizan generalmente en agua de mar, no emplean rellenos.

Tabla 2.5 Características de los ánodos de sacrificio y relleno

| METAL    | Contenido de energía<br>( A·h/kg ) | Eficiencia<br>( % ) | Rendimiento<br>( A·h/kg ) | Potencial de trabajo<br>( V ) | Relleno  |               |
|----------|------------------------------------|---------------------|---------------------------|-------------------------------|--|---------------|
|          |                                    |                     |                           |                               | Material   | ( % )         |
| Zinc     | 820                                | 95                  | 778                       | -1.10                         | Yeso<br>Bentonita                                    | 50<br>50      |
| Magnesio | 2204                               | 50                  | 1102                      | - 1.45<br>a<br>- 1.70         | Yeso<br>Bentonita<br>SO <sub>4</sub> Na <sub>2</sub> | 75<br>20<br>5 |
| Aluminio | 2965                               | 95                  | 2817                      | -1.10                         |  |               |

Si el terreno es de baja resistividad o la corriente requerida es muy pequeña, no es necesario utilizar ningún relleno estabilizador.

#### 2.1.6.1 Metales y aleaciones anódicas

Para seleccionar un material anódico se requiere una diferencia de tensión y un flujo de corriente en la dirección adecuada. Los potenciales electroquímicos de los metales se obtienen de las series electroquímicas, Tabla 2.1 donde se presentan ordenados según sus valores de tensión con respecto a un mismo valor de referencia.

Para proteger a una estructura, el metal del ánodo de sacrificio debe estar en una posición superior de la referida tabla.

Para proteger estructuras de acero al carbono, los ánodos que se utilizan con mayor frecuencia son: Magnesio, Zinc, Aluminio, pero en la práctica estos metales no se utilizan puros si no aleados con otros metales como se muestra en la tabla 2.8.

### 2.1.6.2 Componentes estándar

Los ánodos tienen tres componentes básicos, el ánodo metálico, la cobertura o backfill y el cable de conexión, los que están estandarizados por los fabricantes.

### 2.1.6.3 Peso de materiales anódicos

Los ánodos están formados por el metal y el material de relleno, de los cuales sólo el metal actúa como material activo en la protección catódica. Los metales vienen en forma de barras de diversas secciones rectas y longitudes, pero el parámetro que determina el tamaño del ánodo es su masa.

Las masas de los ánodos comerciales dependen de los fabricantes, las más usadas se dan en la tabla 2.6. Las denominaciones de las aleaciones comerciales se da en la tabla 2.7 y las aleaciones normalizadas en la tabla 2.8.

Tabla 2.6 Pesos de ánodos de magnesio

| <b>ANODOS COMERCIALES</b> |             |
|---------------------------|-------------|
| <b>PESO</b>               |             |
| <b>(lb)</b>               | <b>(kg)</b> |
| 9                         | 4.09        |
| 12                        | 5.45        |
| 17                        | 7.73        |
| 32                        | 14.55       |
| 48                        | 21.82       |
| 60                        | 27.27       |

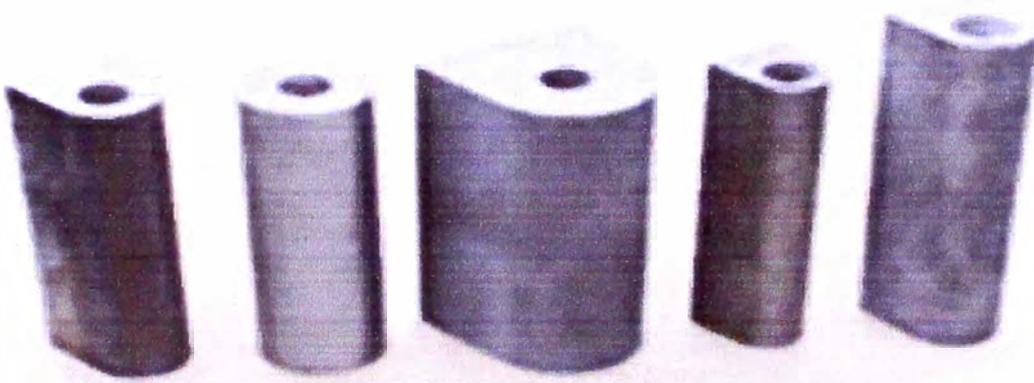
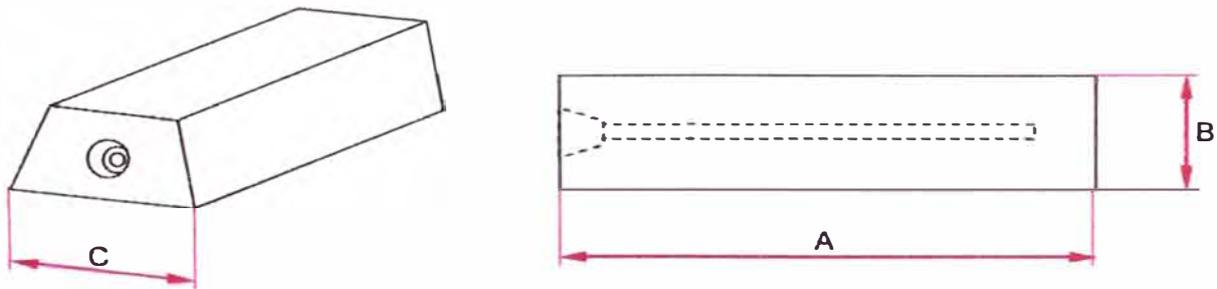


Fig. 2.4 Ánodos de sacrificio de diversas secciones rectas.



| A    |       | B    |       | C    |       | PESO |       |
|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| pulg | (mm)  | pulg | (mm)  | pulg | (mm)  | lb   | (kg)  |
| 4,5  | (114) | 3    | (76)  | 3    | (76)  | 3    | (1,4) |
| 7,5  | (191) | 3    | (76)  | 3    | (76)  | 5    | (2,3) |
| 27   | (686) | 2    | (51)  | 2    | (51)  | 9    | (4,1) |
| 16   | (415) | 4    | (100) | 5    | (105) | 15   | (7)   |

Fig. 2.5 Dimensiones de ánodos de sacrificio

Tabla 2.7 Denominación de aleaciones comerciales de ánodos de magnesio

| Denominación   | Al      | Cu    | Fe    | Ni    | Mn        | Zn   |
|----------------|---------|-------|-------|-------|-----------|------|
| Galvomag       | 0,1 máx | 0,02  | 0,03  | 0,001 | 0,5 - 1,3 | -    |
| Magnesio cell  | 0,01    | 0,01  | 0,027 | 0,001 | 0,1       | 0,01 |
| Downmetal Fs-1 | 2,6     | 0,003 | 0,005 | 0,001 | 0,4       | 1,1  |
| Downmetal H    | 6,0     | 0,01  | 0,009 | 0,001 | 0,26      | 2,5  |
| Downmetal H-1  | 6,5     | 0,01  | 0,001 | 0,001 | 0,24      | 3,4  |
| Downmetal J-1  | 6,5     | 0,005 | 0,001 | 0,001 | 0,23      | 0,78 |

Tabla 2.8 Aleaciones normalizadas de ánodos de sacrificio.

| METAL       |          | Mil-A21412    | Comercial     | Comercial    |
|-------------|----------|---------------|---------------|--------------|
| Cu          |          | 0,1 máx       | 0,02 máx      | 0,02 máx     |
| Al          |          | 5 - 7         | 5,3 - 6,7     | 0,01         |
| Si          |          | 0,3 máx       | 0,10 máx      | -            |
| Fe          |          | 0,003 máx     | 0,003 máx     | 0,003 máx    |
| Mn          |          | 0,015 mín     | 0,15 mín      | 0,5 - 1,3    |
| Ni          |          | 0,003 máx     | 0,002 máx     | 0,001        |
| Zn          |          | 2-4           | 2,5 - 3       | -            |
| Otros       |          | 0,3 máx (c/u) | 0,3 máx (c/u) | 0,01 máx (2) |
| Rendimiento | (%)      | 50            | 50            | 50           |
| Potencial   | (V)      | - 1,5         | - 1,5         | - 1,7        |
| Capacidad   | (A-h/kg) | 1100          | 1230          | 1230         |

#### 2.1.6.4 Relleno anódico o backfill

Los ánodos en sistemas enterrados utilizan algunos rellenos entre el ánodo metálico y el electrolito cuando el ánodo se instala enterrado. Este relleno no se utiliza cuando el ánodo se instala en un electrolito líquido como el agua de mar.

Como el propósito es mejorar la conexión eléctrica entre el medio y el ánodo se utiliza bentonita, yeso o  $\text{Na}_2 \text{SO}_4$

La composición de la mezcla de rellenos de ánodos de Zinc y Magnesio se muestra en la tabla 2.5, y sus componentes se muestran en la figura 2.6 y

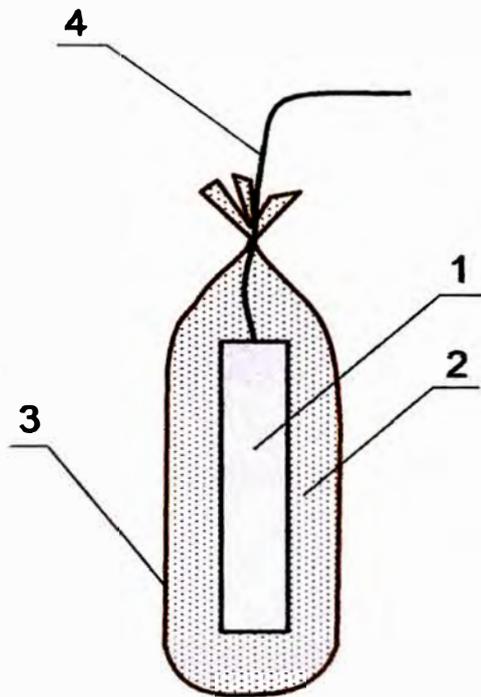


Fig. 2.6. Componentes y dimensiones de ánodo de sacrificio de magnesio 1) Cuerpo metálico. 2) Estabilizador o Backfill. 3) Envoltura de algodón 4) conductor eléctrico



Fig. 2.7. Ánodos de magnesio

### **2.1.7 Criterios de diseño de protección con ánodos de sacrificio**

En sistemas de protección catódica, para elementos de acero se debe tener en cuenta un voltaje de  $-0.85V$  relativos al  $Cu/CuSO_4$  (sat)

## **2.2 DESCRIPCIÓN DEL TANQUE Y SUS INSTALACIONES**

### **2.2.1 Características de la zona**

El tanque se ubica en la zona de costa, a una distancia de 6 km de la línea de orilla de mar, en un terreno desértico alejado de líneas de

transmisión de potencia de alta, media y baja tensión, así como alejado de plantas de generación eléctrica.

### **2.2.2 Características generales del tanque**

Como el tanque almacena GLP en estado líquido se pueden considerar como características generales del tanque:

- Es un recipiente destinado para el almacenamiento de productos inflamables o combustibles derivados del petróleo.
- Es un recipiente sometido a presión interior.

El tanque es un recipiente sometido a presión interior que almacena GLP en estado líquido a temperatura ambiente que tiene las siguientes características generales:

|                                  |                    |
|----------------------------------|--------------------|
| Fluido almacenado                | GLP                |
| Fase                             | Líquida            |
| Temperatura de almacenamiento    | 20 °C              |
| Presión de operación en verano   | 100 psi            |
| Presión de operación en invierno | 80 psi             |
| Volumen total                    | 10 000 Galones USA |
| Volumen neto                     | 6378 Galones USA   |
| Instalación                      | Enterrada          |
| Posición del eje                 | Horizontal         |
| Material                         | ASTM A 36          |

### 2.2.3 Geometría del tanque

El tanque es un recipiente formado por un cuerpo cilíndrico central con dos tapas semiesféricas que se ubica en sus extremos que se instala en posición horizontal. Fig. 2.8. El tanque tiene las siguientes dimensiones:

|                             |                      |
|-----------------------------|----------------------|
| Diámetro                    | 2,67 m               |
| Longitud total              | 7,65 m               |
| Espesor cuerpo cilíndrico   | 15 mm                |
| Espesor tapas esféricas     | 15 mm                |
| Área de superficie exterior | 63,92 m <sup>2</sup> |

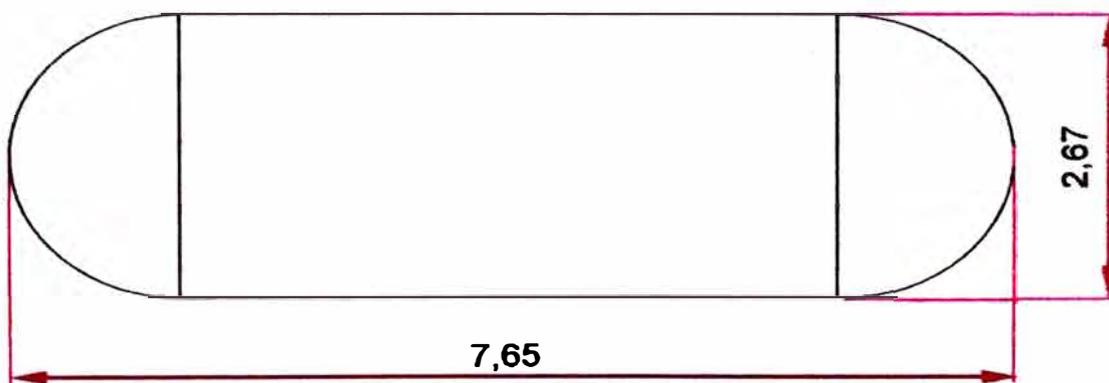


Fig. 2.8 Dimensiones principales del tanque

### 2.2.4 Características de la instalación

El tanque se instala cumpliendo las disposiciones del Ministerio de Energía y Minas establecidas en el Decreto Supremo N° 019-97-EM, Reglamento de Establecimiento de venta de Gas Licuado de Petróleo (GLP) para uso Automotor – gasocentro y el Decreto Supremo N° 052-93-EM

Reglamento de Seguridad para el almacenamiento de Hidrocarburos que se relacionan con la geometría, disposición equipo e instalaciones de gasocentros.

#### 2.2.4.1 Capacidad de operación

La capacidad de los tanques se determina considerando diferentes conceptos. Uno es el volumen líquido del tanque que es el volumen interior total que puede ser ocupado por un líquido.

Para gasocentros este volumen está comprendido en el rango de 5 y 40 metros cúbicos por lo que el tanque de 10 000 galones líquidos que equivalen a 37,9 m<sup>3</sup> está en el rango considerado.

- Volumen líquido: 10 000 galones (37,9 m<sup>3</sup>)
- Volumen máximo de llenado, 80 % del volumen líquido, 8 000 galones.
- Volumen residual, que es el volumen de GLP líquido que queda en el tanque a 0,15 m sobre el fondo: 1 622 galones.
- Volumen neto operativo: 6 378 galones

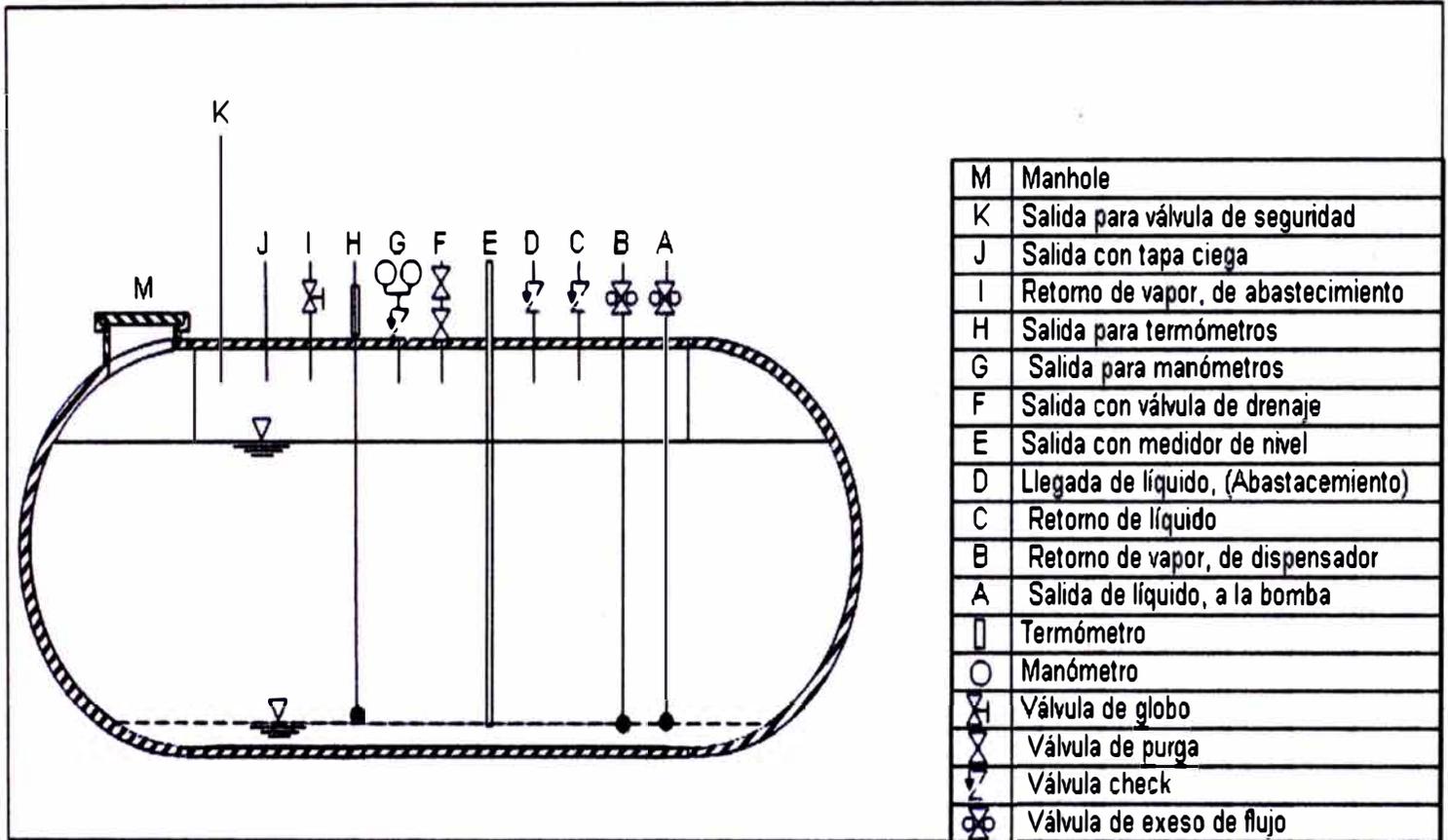
#### 2.2.4.2 Material

Se construye con acero al carbono con planchas soldadas cuyo espesor depende de las dimensiones y la presión de GLP.

#### 2.2.4.3 Forma

Es un tanque cilíndrico con tapas hemisféricas ubicado en posición horizontal. En su parte superior tiene un agujero para inspección, manhole.

Fig. 2.9. Esquema de montaje de tanque de GLP



#### **2.2.4.4 Normas de diseño, fabricación y pruebas.**

El tanque está diseñado, construido y probado de acuerdo al código ASME para recipientes a presión, sección VIII, División 1.

#### **2.2.4.5 Instalación**

Se instala enterrado en un pozo de concreto de sección horizontal rectangular y fondo plano. La distancia mínima entre las paredes y el tanque establecidas por el Reglamento es de 0,30 m pero en este caso se deja una distancia de 0,60 m de las paredes laterales y del fondo para tener espacio suficiente para ubicar los ánodos. Las paredes del pozo tienen la altura necesaria para que el borde superior del tanque quede a una profundidad de 0,60 m debajo del nivel del terreno.

Dentro del pozo el tanque va enterrado en arena cumpliendo las siguientes recomendaciones:

En la parte superior del tanque se ubican las salidas para los dispositivos de operación y control del flujo y el agujero para inspección del tanque con tapa embridada, manhole, por lo que el tanque no se entierra totalmente si no que se deja descubierta esta parte, dejado una altura de 0,10 m sobre la capa de arena, Las salidas de los dispositivos y el manhole van cubiertos por una cubierta metálica de protección movable.

#### **2.2.5 Definición de GLP**

El gas licuado de petróleo (GLP) es una mezcla de propano y butano que se encuentra en estado gaseoso a presión atmosférica y temperatura

de 20° C. Para que se encuentre en estado líquido a temperaturas hasta de 30° C debe estar a una presión de 8 atmósferas.

### 2.2.6 Características del GLP

El propano y butano están presentes en el petróleo crudo y el gas natural, por lo que se obtienen durante el refinado de petróleo, sobre todo como subproducto de la destilación fraccionada catalítica

El estado del GLP depende de su presión y temperatura como se muestra en la tabla 2.9.

Tabla 2.9 Propiedades del GLP

| <b>Estado : Gaseoso</b> |                     |                  |
|-------------------------|---------------------|------------------|
| Componente              | Presión (atmósfera) | Temperatura (°C) |
| Butano                  | 1                   | Menor a - 0,5    |
| Propano                 | 1                   | Menor a - 42,2   |
| <b>Estado : Líquido</b> |                     |                  |
| Componente              | Presión (atmósfera) | Temperatura (°C) |
| Butano                  | Mayor a 8           | 20               |
| Propano                 | Mayor a 8           | 20               |

Cuando un litro de componente en estado líquido, reduce su presión a presión a la atmosférica se transforma en gas, ocupando 272,6 litros de gas para el propano y 237,8 litros de gas para el butano.

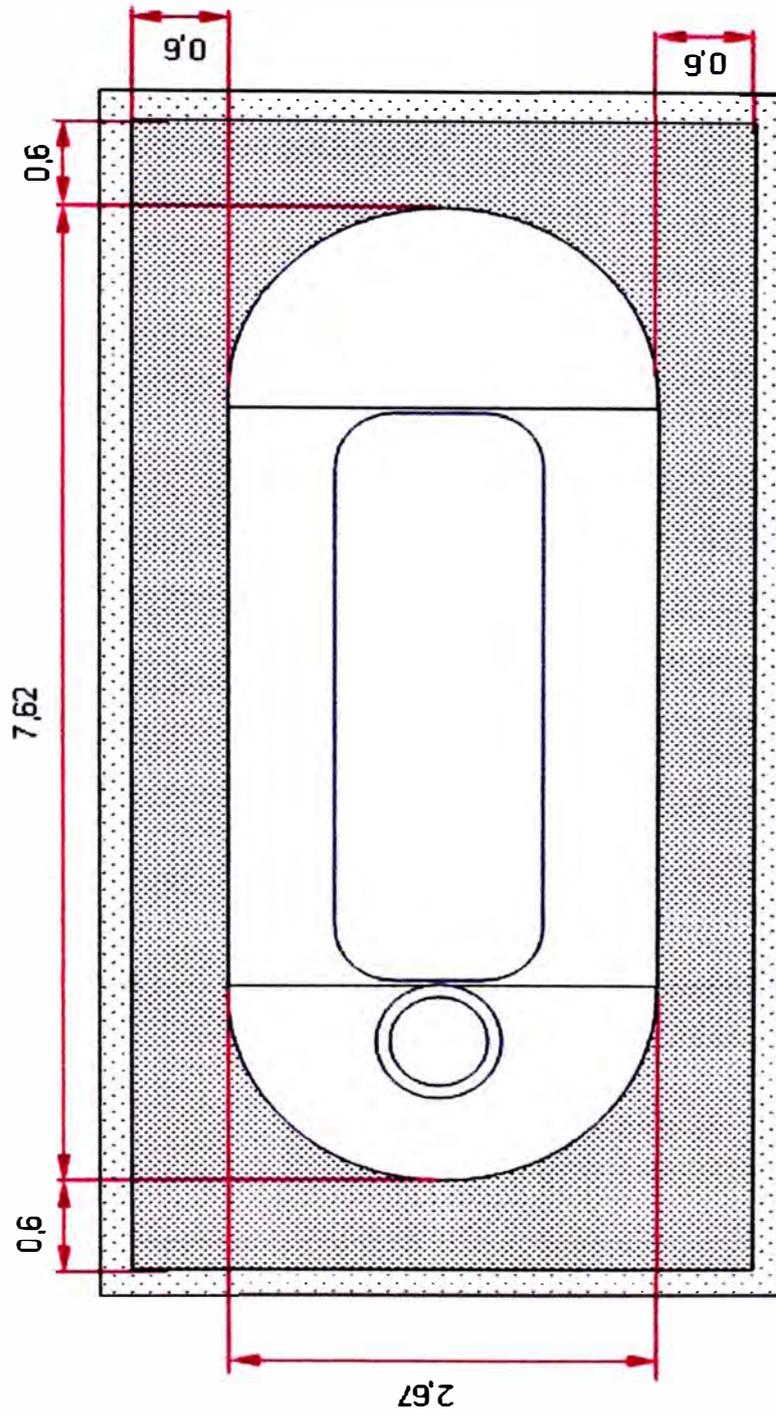


Figura 2.10 Vista superior del tanque

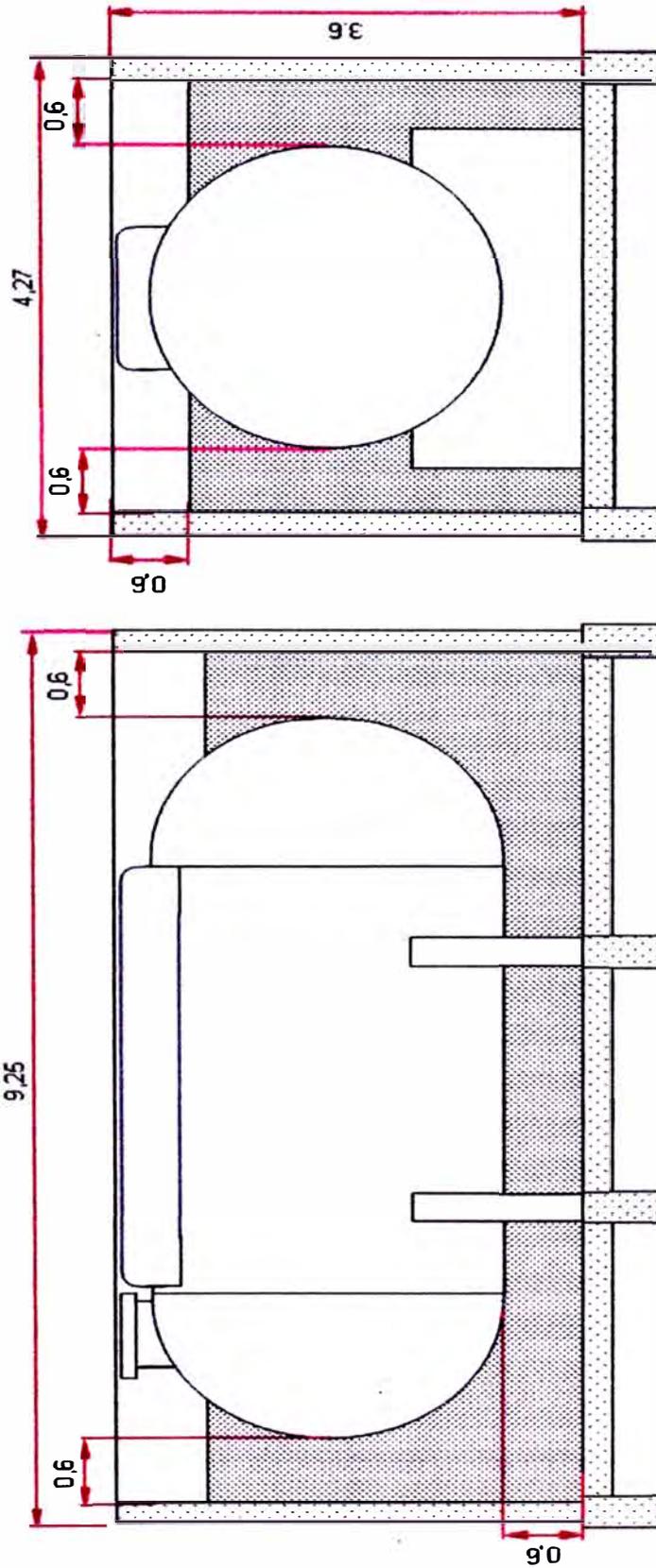


Fig. 2.11. Dimensiones de la instalación

Cuando el GLP líquido en el interior de un tanque cerrado aumenta su temperatura, el líquido se expande y aumenta su presión de vapor, por lo que se puede llenar como máximo el 85 % de su volumen total. Las normas técnicas nacionales establecen un llenado máximo del 80 %.

Con respecto al aire, la densidad y peso específico del GLP son mayores por lo que una nube de GLP tenderá a permanecer a nivel del suelo.

Con respecto al agua, el GLP líquido es menos denso y viscoso, por que puede pasar a través de poros por donde ésta no pasa. Caso similar ocurre con el gasoil o kerosene.

Con referencia a la seguridad de las personas se tiene que la exposición máxima permisible es de una concentración promedio de 1000 partes de GLP por cada 1'000,000 de partes de aire (1.000 ppm) durante 8 horas continuas, un turno de trabajo.

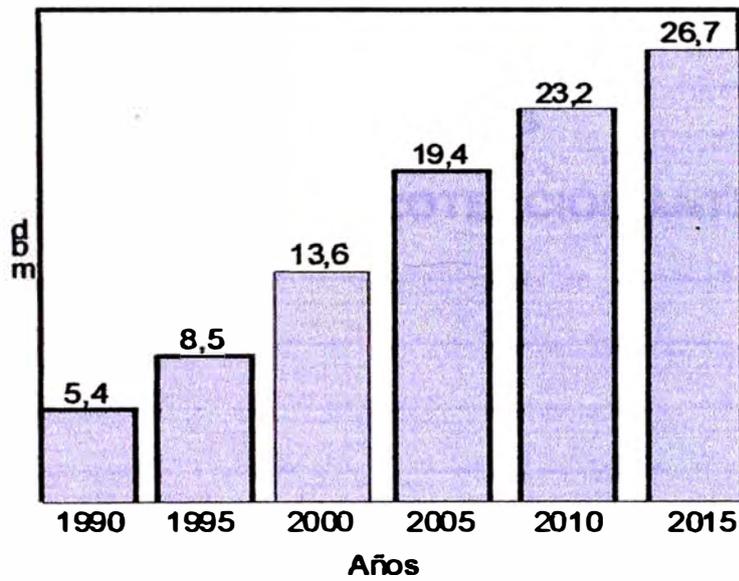
### **2.3 IMPORTANCIA Y ACTUALIDAD DEL TEMA**

La demanda mundial de GLP se encuentra en crecimiento durante los últimos 27 años impulsada por el sector industrial y la industria petroquímica, (1) pero en este periodo de tiempo el Perú ha sido importador de GLP.

En el 2001, el 46% de la demanda era cubierta con importaciones, teniendo una gran expansión reemplazando al kerosene y la leña en hornos y máquinas industriales y cocinas en el sector doméstico.

Sólo Lima representa el 46% del consumo nacional de GLP , mientras que el sector automotor tuvo una expansión importante hasta el ingreso del gas natural

vehicular (GNV). Sin embargo, el suministro de GNV no cubrirá todo el territorio nacional, por lo que el GLP tiene un gran espacio para el crecimiento en el sector automotor. En la Fig. 2.12 se presenta la demanda proyectada de GLP (1)



**Fig. 2.12. Demanda histórica de GLP y sus proyecciones 2005 – 2015 considerando los efectos por sustitución con el gas natural**

## **CAPÍTULO 3**

### **DISEÑO DE SISTEMA DE PROTECCIÓN ANTICORROSIVA**

#### **3.1 CONDICIONES DE DISEÑO**

##### **3.1.1 Parámetros de diseño**

Los parámetros que se tienen en cuenta en el diseño de los sistemas de protección catódica dependen de los materiales de la estructura y del medio que los rodea, éstos son:

- **Metal de la estructura**
- **Área total que se debe proteger**
- **Resistividad del terreno**
- **Geometría del área a proteger**
- **Características del terreno**

### **3.1.2 Normas técnicas aplicables**

Existen numerosas normas de recipientes destinado para el almacenamiento de productos inflamables o combustibles derivados del petróleo. En el caso de normas empresariales se tienen como referencia las normas técnicas Petróleos Mexicanos:

Comité Normalización de Petróleos Mexicanos y organismos subsidiarios que en la norma NRF – 110 – PEMEX – 2003 establece los requisitos de ánodos de magnesio de alto potencial, la resistividad del terreno y la Norma NRF – 117 – Protección catódica de tanques de almacenamiento.

### **3.2. SELECCIÓN DEL MÉTODO**

El método se selecciona teniendo en cuenta principalmente la densidad de *corriente de protección requerida*.

En la gráfica de Beckmann y Schwenk, que se muestra en la Fig. 3.2, se representan los métodos de protección por ánodos de sacrificio y por corriente impresa, recomendados en función de la resistividad del medio en que se ubica la estructura que se tiene que proteger, y la corriente de protección requerida.

En el gráfico se observa que el método de ánodos de sacrificio se puede utilizar independientemente de la resistividad del suelo, siendo limitada su utilización por la corriente demandada o requerida para proteger la estructura.

En términos prácticos se puede utilizar el método ánodos de sacrificio cuando:

- Las resistividades del terreno son menores de 1,5 k $\Omega$ cm y las corrientes de protección son menores de 3 A.
- Las resistividades del terreno son menores de 10 k $\Omega$ cm y las corriente de protección son menores de 0,5 A.

Para otras combinaciones de resistividad del suelo y demanda de corriente de protección se puede recurrir a la gráfica de Beckmann y Schwenk para optar entre el método de ánodos de sacrificio y el de corriente impresa.

### **3.3 METODOLOGIA DE DISEÑO**

Este diseño se puede realizar teniendo como base diversos procedimientos recomendados por diferentes normas técnicas. Según la Norma Técnica DNV RP B401 se consideran tres pasos:

- Cálculo de la corriente necesaria para la protección del material.
- Cálculo de la masa total del ánodo de sacrificio para proteger la estructura.
- Cálculo del número de ánodos a instalar.

La corriente que suministra cada ánodo depende de sus características como el metal anódico y sus dimensiones, de las características físicas y geométricas de la instalación, así como del número de ánodos y de su distribución.

El cálculo es iterativo, Se calcula una corriente requerida inicial para proteger la estructura. Luego se calcula la corriente que suministra la cama anódica formada por un tipo y número de ánodos estándar. Si esta corriente es menor que la corriente de protección requerida se varía el número de ánodos o se aumenta el peso del ánodo hasta que sea mayor igual que ésta. Fig. 3.1.

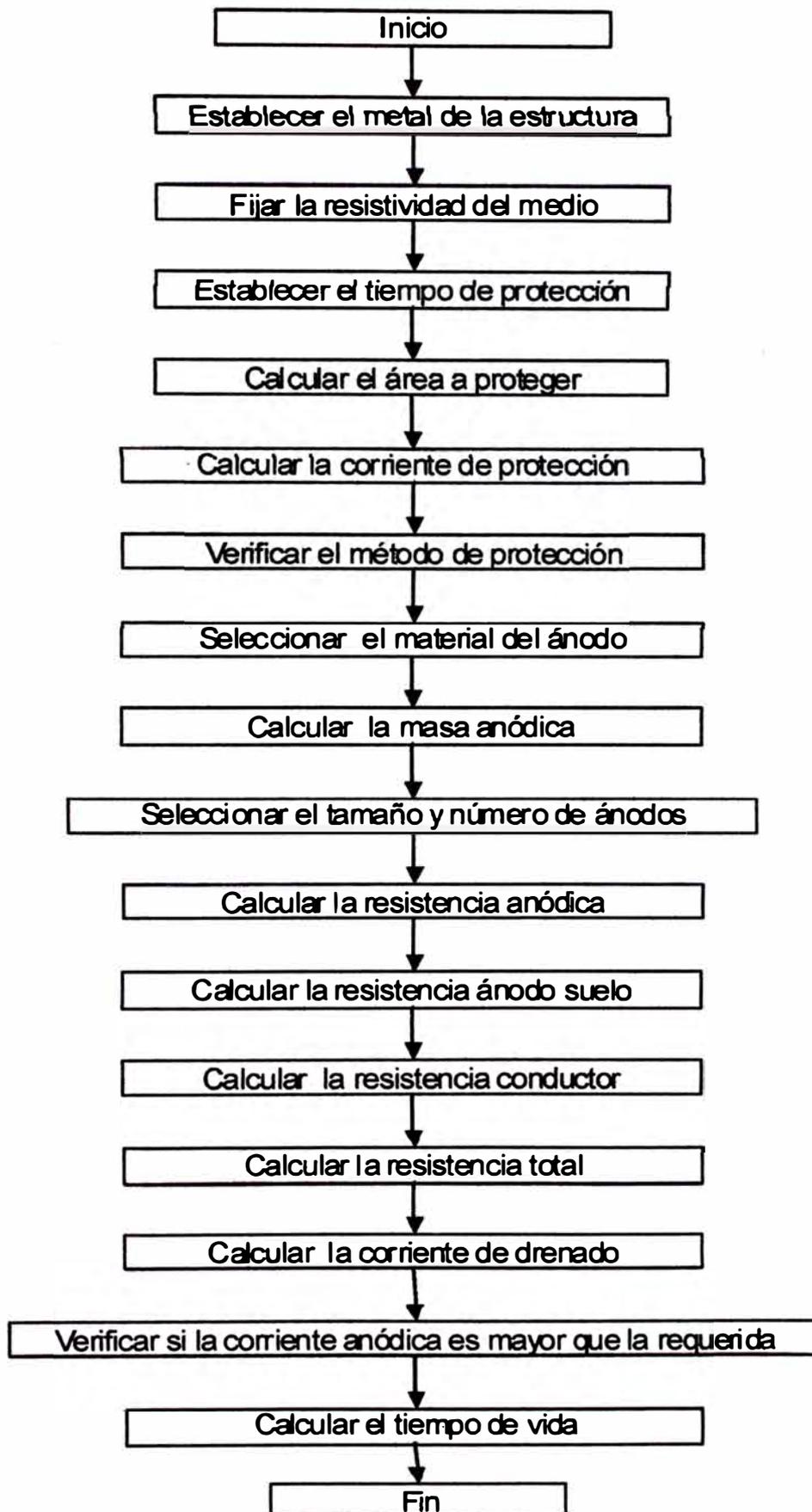


Fig. 3.1. Diagrama de flujo de la metodología de diseño

### 3.3.1 Dimensiones del área a proteger

El área a proteger es la superficie en contacto con el electrolito, área enterrada. No se protegen las superficies que no están en contacto con el electrolito, que estas se deben proteger con otros métodos. La superficie del tanque puede tener insertos para anclajes, dispositivos para transporte y maniobra, etc. El área del tanque que realmente se debe proteger puede ser mayor que el área geométrica total del tanque, lo que se puede expresar:

$$Far = \frac{Ap}{A_{TT}} \quad (3.1)$$

**Far** = Factor de área

**Ap** = Área a proteger

**A<sub>TT</sub>** = Área total enterrada de tanque

### 3.3.2 Corriente de protección

La corriente de protección depende de varios factores, como la estructura, el medio, el tipo de recubrimiento anticorrosivo de la estructura y también de la experiencia del diseñador. La corriente requerida de protección varía según las características propias del medio ambiente donde se instala la estructura.

En el Anexo D se presentan las densidades de corrientes recomendadas para algunos casos de equipos. Estas recomendaciones son generales porque no consideran las características del medio ni del tipo de recubrimiento anticorrosivo de las estructuras, el diseñador debe realizar los ajustes correspondientes.

La demanda corriente de protección es la corriente que requiere la estructura para quedar protegida, la que se determina con:

$$I_p = I_{pu} \cdot A_p \quad (3.2)$$

$I_p$  = Corriente de protección

$I_{pu}$  = Corriente de protección unitaria

La corriente de protección depende principalmente del metal que se debe proteger y de la resistividad del suelo.

Verificación del método de protección

La conveniencia del método de protección seleccionado se verifica con el gráfico Beckmann y Schwenk (1) que establece los campos de aplicación de la protección por corriente impresa y ánodos de sacrificio.



Fig. 3.2 Campos de aplicación de protección catódica con corriente impresa y ánodos de sacrificio

### **3.3.3 Selección del material anódico**

Para seleccionar el material del ánodo se considera que:

*El material del ánodo debe tener un potencial mayor que el material que se protege, que en la tabla 2.1 se encima del material de la estructura a proteger pero se deben tener en cuenta dos consideraciones:*

Que la diferencia de potencial sea la adecuada.

Que el ánodo sea adecuado según el tipo de medio, tabla 2.2 y el valor de su resistividad, tabla 2.3.

La composición de ánodos de sacrificio esta especificada por diversas normas técnicas como la Norma técnica ASTM B6 – 46 y la US Mil A- 18001H. En la tabla 2.5 se presentan las características de los ánodos de zinc, magnesio y aluminio. En caso de ánodos con aleaciones existen numerosos tipos que tienen denominaciones comerciales. En la tabla 2.8 se muestran algunas de ellas con sus respectivas aleaciones.

### **3.3.4 Masa de ánodo de sacrificio**

La masa de metal anódico se determina inicialmente considerando la corriente de protección y el drenaje de corriente dado por los fabricantes de ánodos.

### 3.3.5 Selección inicial del número y tamaño de ánodos

Un ánodo de sacrificio tiene un radio de acción efectivo que le permite proteger un área determinada de la estructura, cuyo tamaño depende de las características propias del ánodo y de las condiciones de la instalación.

El área total de la estructura a proteger se divide en partes de áreas iguales, cada una de las cuales se protege con un ánodo. Para el caso de estructuras como tanques que tienen al menos un eje de simetría se tienen también al menos dos áreas iguales que requieren al menos dos ánodos. Por este motivo el número mínimo de ánodos es dos.

Como no se conoce con exactitud ni la masa ni el número de ánodos se tiene que realizar un cálculo iterativo para que se obtenga el número y peso de ánodos que suministren la corriente de protección requerida.

En estas condiciones se puede iniciar el cálculo con dos ánodos de la masa estándar más pequeñas que se pueden seleccionar de los tamaños comerciales de Fig. 2.5. y se determinan:

$W_a$  = Peso del ánodo

$n$  = Número de ánodos

Esta selección inicial permite determinar una corriente total que debe ser mayor o igual que la calculada como corriente de protección. Si esta condición no se cumple se incrementa la masa del ánodo o aumenta el

número de ánodos para lo cual se redistribuyen las áreas que se determinaron inicialmente.

### 3.3.6 Cálculo de la resistencia del ánodo

La resistencia del ánodo está conformada por las resistencias que se producen entre los componentes que se encuentran entre el metal del ánodo y el suelo que rodea la bolsa del backfill, por lo que generalmente se le conoce como resistencia ánodo suelo

Esta la conforman la resistencia entre el ánodo y el relleno, llamada también resistencia interna y la resistencia entre el relleno y el suelo. Para determinarlas se consideran las dimensiones de la figura 3.3.

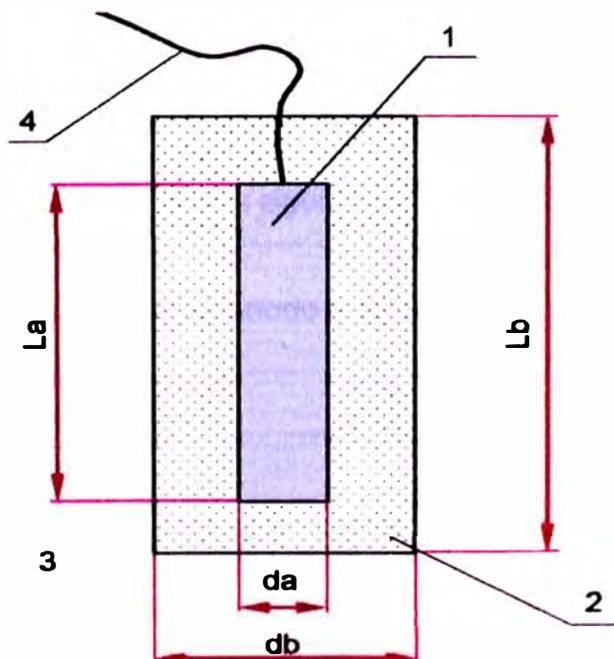


Fig. 3.3 Dimensiones de un ánodo. 1) Ánodo. 2) Relleno. 3) Suelo

4) Conductor de conexión.

Tabla 3.1 Dimensiones de ánodos de magnesio

| ANODOS DE MAGNESIO |             |             |             |             |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| PESO<br>(lb)       | DIMENSIONES |             |             |             |
|                    | Metal       |             | Backfill    |             |
|                    | da<br>(pie) | La<br>(pie) | db<br>(pie) | Lb<br>(pie) |
| 9                  | 0.282       | 1.168       | 0.667       | 2.168       |
| 12                 | 0.374       | 1.000       | 0.667       | 2.000       |
| 17                 | 0.374       | 1.416       | 0.667       | 2.416       |
| 32                 | 0.470       | 1.710       | 0.750       | 2.710       |
| 50                 | 0.658       | 1.333       | 0.918       | 2.333       |
| 60                 | 0.423       | 5.000       | 0.709       | 6.000       |

a) Resistencia ánodo relleno o resistencia interna

La resistencia ánodo - relleno llamada resistencia interna porque esta conformada por la resistencia entre el ánodo y el relleno o backfill y la resistencia entre el relleno y el ambiente exterior o terreno.

Para ánodos en posición vertical, según H. Dwight éstas se determinan con las expresiones siguientes según esquema de la Fig. 3.4.

La resistencia entre el ánodo y el relleno se calcula considerando las dimensiones del ánodo.

$$R_a = \frac{\rho_a \left( \ln \left( \frac{8 \cdot La}{da} \right) - 1 \right)}{2 \cdot \pi \cdot La \cdot 30,48} \quad (3.3)$$

$R_a$  = Resistencia ánodo relleno.

$\rho_a$  = Resistividad del ánodo.

$L_a$  = Longitud del ánodo.

$d_a$  = Diámetro del ánodo.

La resistencia de entre el relleno y el terreno se calcula considerando las dimensiones del saco que contiene el relleno.

$$R_b = \frac{\rho_b \cdot \left( \ln \left( \frac{8 \cdot L_B}{d_B} \right) - 1 \right)}{2 \cdot \pi \cdot L_B \cdot 30,48} \quad (3.4)$$

$R_b$  = Resistencia relleno – terreno.

$\rho$  = Resistividad del terreno.

$L_B$  = Longitud de la bolsa del relleno.

$d_B$  = Diámetro del saco de relleno.

La resistencia interior se obtiene como la diferencia resistencias anteriores no considera ningún efecto exterior, por lo que se llama resistencia interior sin corregir  $R_{ARSC}$  y se obtiene como;

$$R_{ARSC} = R_a - R_b \quad (3.5)$$

Cuando se instalan  $n$  ánodos en un circuito eléctrico, llamado cama anódica, conectados en paralelo la influencia entre ellos incrementa la resistencia ánodo-suelo. Este incremento se debe al denominado factor de apantallamiento que depende de la forma como se distribuyen los ánodos y su efecto se cuantifica con el factor de corrección  $F_c$ :

$$F_c = \frac{\left( \frac{f_n}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon} - \theta \right)}{30.48 k} \quad (3.6)$$

donde se tiene

$$f_n = 0,4404 \cdot \log(n) + 1,2095 \quad (3.7)$$

$$\epsilon = L_1 + \frac{D_T}{2} \quad (3.8)$$

$$\theta = \frac{\Delta}{n \cdot L_B} \quad (3.9)$$

$$\Delta = 0,0928 \cdot \log\left(\frac{S}{L_B}\right) - 0,4034 \quad (3.10)$$

$S$  = distancia entre ánodos.

$$k = \frac{1}{\rho} \quad (3.11)$$

Para estructuras enterradas con ánodos dispuestos en forma circular la corrección se realiza con la expresión siguiente:

$$\mathbf{R}_{AR} = \mathbf{R}_{ARSC} + \mathbf{F}_C \quad (3.12)$$

$\mathbf{R}_{AR}$  = Resistencia ánodo-relleno

b) Resistencia relleno-suelo,

La resistencia del relleno y el suelo no solo depende de las características propias del ánodo si no que está influenciada por los otros ánodos del sistema. Para un conjunto de  $n$  ánodos la resistencia relleno suelo de cada uno de ellos es:

$$\mathbf{R}_{RS} = \frac{\rho \cdot \left[ \mathbf{Ln} \left( \frac{8 \cdot \mathbf{L}_B}{\mathbf{d}_B} \right) - 1 + 2 \cdot \left( \frac{\mathbf{L}_B}{\mathbf{S}} \right) \cdot \mathbf{Ln}(0,656 \cdot \mathbf{n}) \right]}{30,48 \cdot (2 \cdot \pi) \cdot \mathbf{L}_B} \quad (3.13)$$

c) La resistencia entre el ánodo y el suelo se determina con:

$$\mathbf{R}_{AS} = 1,2 \cdot (\mathbf{R}_{AR} + \mathbf{R}_{RS}) \quad (3.14)$$

### 3.3.7 Resistencia del conductor eléctrico

El conductor eléctrico que une la masa del metal anódico con la masa metálica con la estructura metálica que se protege, Fig. 3.3. El conductor se instala directamente enterrado, o en un tubo de PVC por lo que el aislamiento del conductor debe ser adecuado para estas condiciones.

El material del conductor es cobre electrolítico de 99,9 % de pureza que tiene una resistencia eléctrica baja.

Como los tanques de GLP se instalan enterrados en arena el aislamiento debe ser resistente a la abrasión y absorción de humedad para evitar oxidaciones que aumenten la resistencia eléctrica del conductor.

Como referencia se pueden señalar los conductores de la Tabla 3.2. en que se presentan conductores que se pueden instalar directamente o en tubo.

Tabla 3.2 Resistencia y capacidad de corriente de conductores que pueden instalar directamente enterrados

| Tipo RHH - Tipo RHW   |                                   |                       |
|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Calibre del conductor | Capacidad de corriente a 30 °C(*) | Resistencia a 20°C    |
| AWG                   | (A)                               | (Ω/pie)               |
| 10                    | 27                                | $1,04 \times 10^{-3}$ |
| 8                     | 38                                | $6,54 \times 10^{-4}$ |
| 6                     | 50                                | $4,10 \times 10^{-4}$ |
| (*) CNE               |                                   |                       |

En el caso de la protección de tanques y fondos de tanques la distancia entre el ánodo de sacrificio y la estructura protegida es de menos, de un metro, por lo que la resistencia del conductor es muy pequeña.

Por condiciones de resistencia mecánica y eléctrica se utilizan conductores de calibres 6 o 10 mm<sup>2</sup>.

$$R_{CE} = R_E \cdot \left( L_1 + \frac{(n-1) \cdot S}{2} \right) \quad (3.15)$$

$R_{CE}$  = Resistencia total del conductor eléctrico (Ohm.)

$R_E$  = Resistencia específica del conductor (Ohm/pie)

$S$  = Distancia entre ánodos (pies)

$L_1$  = Distancia de ánodo a estructura (pies)

### 3.3.8 Corriente drenada por el ánodo

La corriente drenada por el ánodo, es la corriente que suministra el ánodo y que circula a través de electrolito del ánodo a la estructura, Fig. 3.4. Esta corriente depende de la diferencia de tensión del ánodo y la estructura y la resistencia total del circuito.

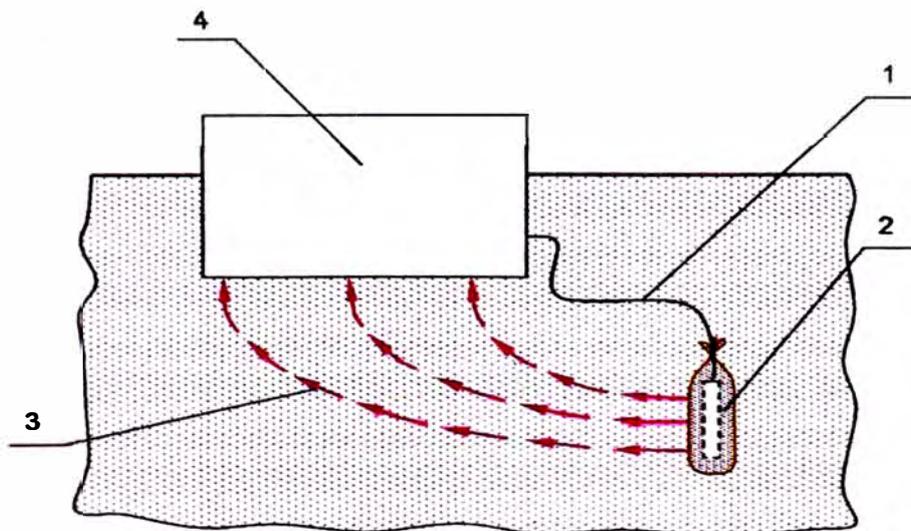


Fig. 3.4 Esquema eléctrico de protección catódica

$$I_D = \frac{\Delta V}{R_{AS} + R_{CE}} \quad (3.16)$$

$I_D$  = Corriente drenada por un ánodo

$\Delta V$  = Diferencia de potencial

La diferencia de tensiones es la que se presenta entre la fuerza electromotriz entre del ánodo y de la estructura.

$$\Delta V = |V_a| - |V_m| - 0,1 \quad (3.17)$$

$V_a$  = Tensión producida por el material del ánodo

$V_m$  = Tensión requerida por el metal

La tensión se reduce en 0,1 voltios para compensar el efecto de la polarización. La diferencia de tensión debe quedar comprendida en los valores del potencial para la protección según el material de la estructura protegida según lo recomendado en la tabla 3.4.

Tabla 3.3 Potencial de metales, referidos al Cu / CuSO<sub>4</sub>

| Metal   | Potencial (V) |
|---|---------------|
| Magnesio comercialmente puro                  | -1,75         |
| Aleación magnesio (6 % Al, 3 % Zn, 0.15 % Mn) | -1,6          |
| Cinc  | -1.1          |
| Aleación de aluminio (5 % Zn)                 | -1            |
| Aluminio comercialmente puro                  | -0,8          |
| Acero medio                                   | -0,5 a -0,8   |
| Hierro dulce                                  | -0,2 a -0,5   |
| Hierro fundido                                | 0,5           |
| Plomo   | -0.5          |
| Acero en concreto                             | -0.2          |
| Cobre, latón y bronce                         | -0.2          |
| Hierro fundido alto silicio                   | -0.2          |
| Acero inoxidable                              | -0.2          |

Tabla 3.4 Potencial recomendado según metal protegido

| METAL A PROTEGER                      | E (Cu / CuSO <sub>4</sub> ) (V) |
|---------------------------------------|---------------------------------|
| Hierro y acero en ambiente aeróbico   | -0.85                           |
| Hierro y acero en ambiente anaeróbico | -0.95                           |
| Plomo                                 | -0.6                            |
| Estaño                                | -0.7                            |
| Níquel                                | -0.8                            |
| Aleación a base de cobre              | - 0.5 a - 0.65                  |
| Aluminio limite positivo              | -0.95                           |
| Aluminio limite negativo              | -1.2                            |
| Cobre                                 | - 0,2                           |

### 3.3.9 Tiempo de vida del lecho anódico

El tiempo de vida de cada ánodo se determina con:

$$T = \frac{F_U \cdot n \cdot W_n \cdot \alpha_R}{kn \cdot I_D} \quad (3.18)$$

**T** = Tiempo de vida del ánodo, años.

**F<sub>U</sub>** = Factor de utilización

**$\alpha_R$**  = Suministro real de corriente del material ánodo

**kn** = Factor que depende de las unidades de  $\alpha_T$

**W<sub>n</sub>** = Peso del ánodo

| <b>Unidades de</b> | <b>Valor de</b> |
|--------------------|-----------------|
| $\alpha_T$         | kn              |
| A·h/lb,            | 8760            |
| A·año/lb,          | 1               |

### 3.3.10 Masa de ánodo de sacrificio anódico

Los ánodos de sacrificio que se encuentran en el mercado tienen dimensiones estándar. Unos se presentan en valores de unidades inglesas, es decir en libras, y otras en Kg.

Los ánodos en su presentación comercial tienen dos componentes principales, el metal anódico que se encuentra rodeado por el backfill que es una mezcla estabilizadora, todo empaquetado en un saco de algodón. De todo esto se considera como masa del ánodo exclusivamente a la masa del metal anódico.

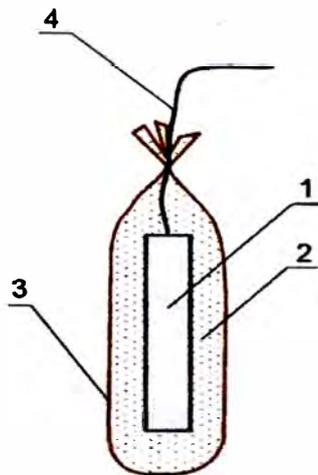


Fig. 3.5 Esquema de ánodo de sacrificio.

1) Masa anódica. 2) Backfill. 3) Saco de yute. 4) Conductor eléctrico

### 3.4 DISEÑO DEL SISTEMA

El diseño del sistema de protección debe proteger contra la corrosión al tanque de almacenamiento de GLP cuyas características se presentaron en el apartado 2.2 se realiza considerando los parámetros de diseño siguientes;

|                        |                    |
|------------------------|--------------------|
| Material a proteger    | Acero ASTM A36     |
| Resistividad del medio | 2 000 $\Omega$ -cm |

#### Área a proteger

Se debe proteger un tanque que se encuentra enterrado, pero no totalmente si no con la parte superior libre, como se muestra en la figura 3.6.

Para determinar el área a proteger se debe determinar el área enterrada que se puede considerar que el cuerpo central es un cilindro y las tapas forman una esfera por lo que el área enterrada se puede determinar como:

$$A_P = A_{TT} - A_{DE} \quad (3.19)$$

$A_P$  = Área protegida

$A_{TT}$  = Área total del tanque

$A_{DE}$  = Área descubierta no enterrada

El área total del tanque se determina como la suma de las áreas del cuerpo cilíndrico y las tapas hemisféricas que juntas forman un a esfera. Se tiene que el área total del tanque se calcula con:

$$A_C = \pi \cdot D \cdot L \quad (3.20)$$

$A_C$  = Área del cilindro

$$A_E = \pi \cdot D^2 \quad (3.21)$$

$A_E$  = Área de esfera

$$A_{TT} = A_C + A_E \quad (3.22)$$

Tabla 3.5 Área total del tanque

| Área total del tanque      |                |                       |       |
|----------------------------|----------------|-----------------------|-------|
| Longitud cuerpo cilíndrico | m              | <b>L</b>              | 4.95  |
| Diámetro                   | m              | <b>D</b>              | 2.67  |
| Area cilindro              | m <sup>2</sup> | <b>A<sub>C</sub></b>  | 41.52 |
| Area esférica              | m <sup>2</sup> | <b>A<sub>E</sub></b>  | 22.40 |
| Area total                 | m <sup>2</sup> | <b>A<sub>TT</sub></b> | 63.92 |

En la Fig. 3.6 se muestra la sección transversal y en la Fig. 3.7 se muestra la sección recta del tanque mostrando sus partes enterradas y descubiertas.

El área del tanque descubierta, que no queda enterrada, cuya sección recta se muestra en la Fig. 3.7, está formada por tres componentes, mostrados en Fig.

3.8.

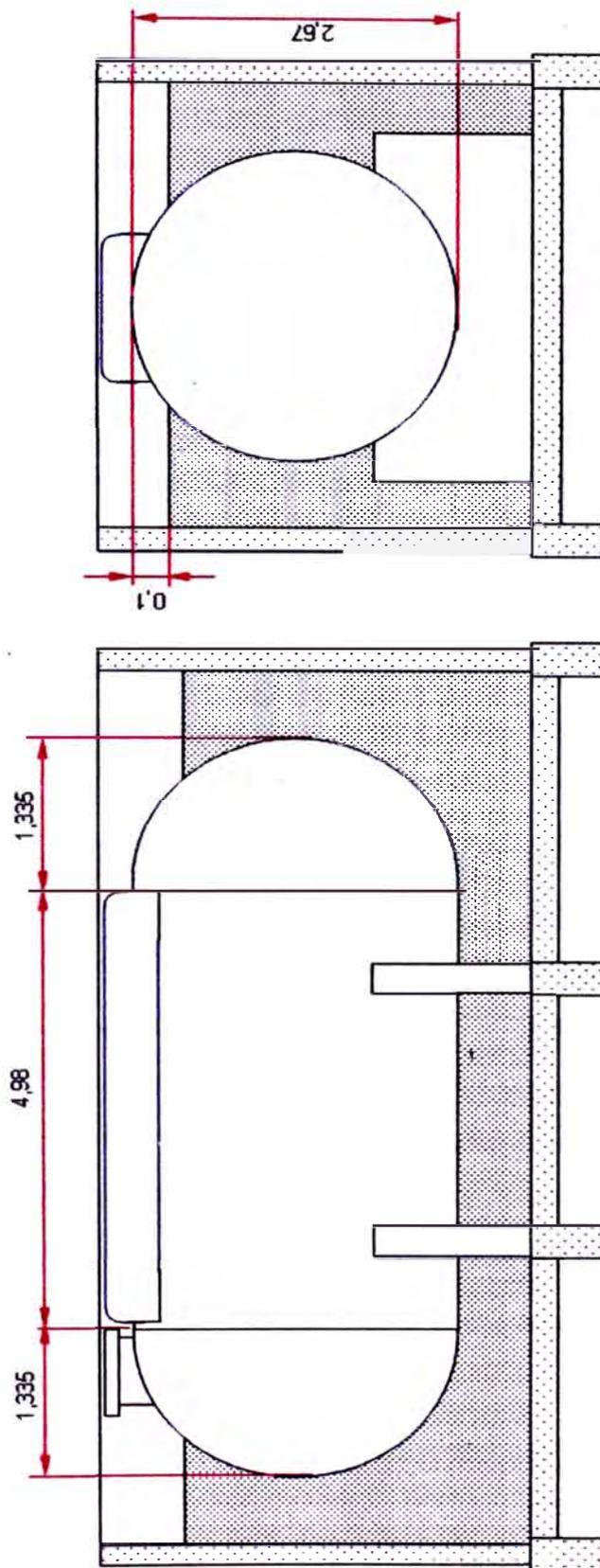


Fig. 3.6 Secciones del tanque enterradas

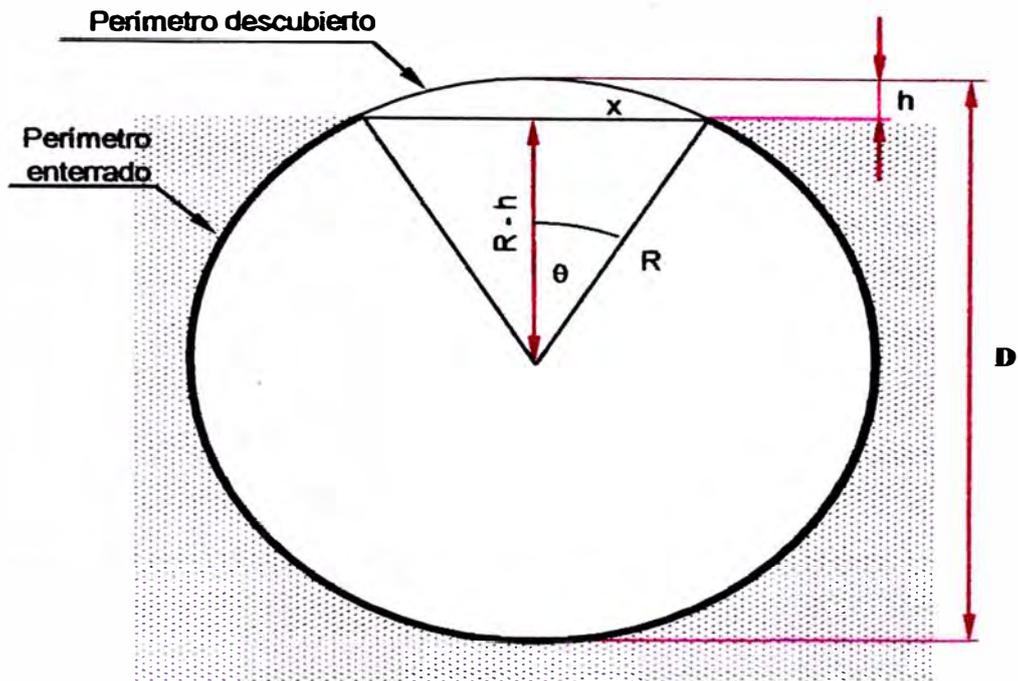


Fig.3.7 Sección recta enterrada del tanque

El área del tanque descubierta esta formada por:

- Un casquete cilíndrico de altura "h" que forma la parte central del área descubierta.
- Dos mitades de un casquete esférico de altura h, que se ubica en u los extremos del casquete cilíndrico central

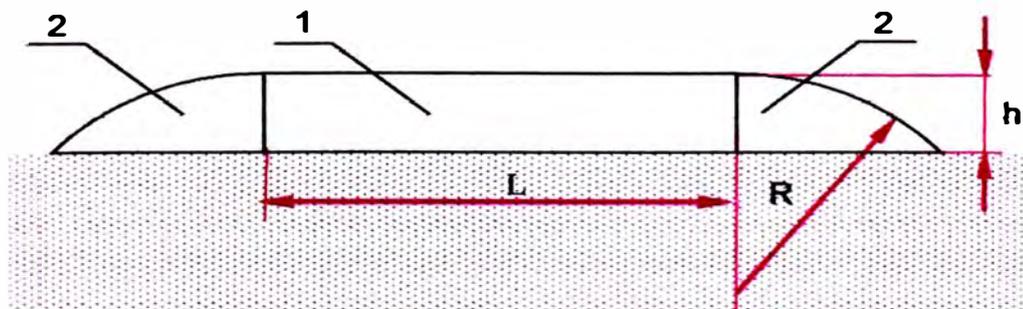


Fig. 3.8 Sección recta del área no enterrada 1) Casquete cilíndrico.

2) Casquete esférico.

Esta área se calcula como la suma del área del sector cilíndrico y la suma de los dos semi casquetes esféricos, que en conjunto representan un casquete esférico. Fig. 3.8.

$$A_{SC} = \theta \cdot D \cdot L \quad (3.23)$$

$A_{SC}$  = Área del sector cilíndrico.

$\theta$  = Semiángulo frente al área descubierta

$$\theta = \arctan \left( \frac{\sqrt{\left(\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - h\right)^2\right)}}{\frac{D}{2} - h} \right) \quad (3.24)$$

$$A_{Ce} = \pi \cdot D \cdot h \quad (3.25)$$

$A_{Ce}$  = Área de casquete esférico

Tabla 3.6 Área descubierta del tanque

| <b>Área Descubierta</b>        |                |          |      |
|--------------------------------|----------------|----------|------|
| Altura descubierta             | m              | h        | 0,1  |
| Longitud del cuerpo cilíndrico | m              | L        | 4,95 |
| diámetro                       | m              | D        | 2,67 |
| Angulo                         | rad            | $\theta$ | 0,39 |
| Área sector cilíndrico         | m <sup>2</sup> | $A_{sc}$ | 5,15 |
| Área de casquete esférico      | m <sup>2</sup> | $A_{ce}$ | 0,84 |
| Área descubierta               | m <sup>2</sup> | $A_D$    | 5,99 |

El área neta que se debe proteger es la diferencia entre el área total y el área descubierta

$$A_p = A_{TT} - A_{DE} \quad (3.26)$$

$$A_p = (63,92 - 5,99) \text{ m}^2 = 57,93 \text{ m}^2$$

El tanque no tiene adosados ningún tipo de componentes como cartelas, tapas, u otros en este caso particular el factor de área se considera igual a la unidad. El área que se debe proteger se considera como el área de diseño así resulta:

$$A_D = Far \cdot A_p \quad (3.27)$$

$A_D$  = Área de protección o de diseño

$$Far = 1,0$$

Se tiene

$$A_D = 57,93 \text{ m}^2$$

Cálculo de la corriente de protección

El tanque tiene un acabado arenado con un revestimiento de pintura epóxica con una aplicación que se considera de calidad aceptable.

En el anexo D se dan valores recomendados para fondos de tanques enterrados, sin recubrimientos, donde se tiene 1 mA/pie<sup>2</sup> equivalente a 10,7 mA/m<sup>2</sup>. Por el recubrimiento se considera una reducción al 20 %, entonces se asume:

$$I_{pu} = 2 \text{ m A/m}^2$$

La corriente de protección se obtiene con la expresión 3.2:

$$I_p = 2 \cdot (57.93) = 115,86 \text{ m A}$$

$$I_p = 0,11 \text{ A}$$

Con la resistividad del terreno de 2000 Ohm-cm se selecciona como material anódico al magnesio y para determinar el peso y número de ánodos se realiza un cálculo iterativo con las combinaciones ánodos de peso estándar y números pares de ánodos. En la Tabla 3.1 se obtienen las dimensiones del metal y relleno del ánodo estándar. Las combinaciones de peso y número analizadas se muestran en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Alternativas de peso y número ánodos analizados.

| Peso<br>Lb | Cantidad | Peso total<br>Lb |
|------------|----------|------------------|
| 9          | 2        | 18               |
| 9          | 4        | 36               |
| 9          | 6        | 54               |
| 9          | 8        | 72               |
| 12         | 4        | 48               |
| 12         | 6        | 72               |
| 17         | 4        | 68               |

El mejor resultado se obtiene con la combinación de 4 ánodos de 17 lb que totalizan 68 lb de material anódico. Los cálculos y resultados obtenidos para esta alternativa se detallan a continuación.

#### **Cálculo de la resistencia ánodo/suelo $R_a$**

Esta se compone de las resistencias ánodo/relleno y resistencia relleno/suelo.

La resistencia ánodo/relleno se determina con la expresión 3.3 y las dimensiones de un ánodo de 17 lb, donde:

Resistividad del ánodo de magnesio  $\rho_a = 0,00008$  Ohm-cm.

Longitud del ánodo

$L_a = 1,416$  pies

Diámetro del ánodo,  $d_a = 0,374$  pies

Con la expresión 3.3 donde se tiene:

$$R_a = \frac{0,00008 \cdot \left( \ln \left( \frac{8 \cdot 1,416}{0,374} \right) - 1 \right)}{2 \cdot \pi \cdot 1,416 \cdot 30,48}$$

$$R_a = 7 \times 10^{-7} \text{ Ohm}$$

De manera similar se obtiene la resistencia relleno/suelo con la expresión 3.4, y los datos siguientes.

Resistividad del terreno  $\rho = 2000$  Ohm-cm

Longitud de la bolsa del relleno  $L_B = 2,416$  pie

Diámetro del saco de relleno,  $d_B = 0,667$  pie

$$R_b = 10,229 \text{ Ohm}$$

La resistencia interna sin corregir se calcula como la diferencia de las resistencias anteriores con 3.5.

$$R_{ARSC} = -10,229 \text{ Ohm}$$

El factor de corrección se calcula con las ecuaciones 3.7

Como el tanque tiene un eje axial de simetría se selecciona un número par de ánodos. En el cálculo, en 3.7, se tiene:

$$n = 4$$

$$f_n = 0,4404 \cdot \log(4) + 1,2095$$

$$f_n = 1,475$$

La distancia del tanque a la pared es de 0,60 m por lo que se considera una distancia de:

$$L_1 = 2 \text{ pies}$$

El perímetro del circuito, Fig. 3.11, es de 25,38 m, (83,82 pies) con un radio equivalente promedio de 3,17 m (10,41 pies). Aplicando la ecuación 3.8

$$D = 10,41 \text{ pies}$$

$$\varepsilon = 2 + \frac{10,41}{2}$$

$$\varepsilon = 7,205$$

El espaciamiento S con 4 ánodos resulta un espaciamiento entre ánodos de 6,35 m (20,82 pies), entonces:

$$S = 20,82 \text{ pies}$$

$$L_B = 2,416 \text{ pies}$$

Entonces en la expresión 3.10:

$$\Delta = 0,0928 \cdot \log\left(\frac{20,82}{2,416}\right) - 0,4034$$

$$\Delta = -0,317$$

Con la resistividad del terreno  $\rho$  en la expresión: 3.11

$$k = \frac{1}{2000}$$

$$k = 0,0005$$

$$\theta = \frac{-0,317}{4 \cdot 2,416}$$

$$\theta = -0,033$$

El factor de corrección, expresión 3.6, es

$$F_C = \frac{\left( \frac{1,475}{4 \cdot \pi \cdot 7,205} + 0,033 \right)}{30,48 \cdot 0,0005}$$

$$F_C = 3,218$$

Y con 3.12 se tiene:

$$R_{AR} = -7,011$$

Resistencia relleno suelo, se obtiene con la expresión 3.13

$$R_{RS} = \frac{2000 \left[ \text{Ln} \left( \frac{8 \cdot 2,416}{0,667} \right) - 1 + 2 \cdot \left( \frac{2,416}{20,82} \right) \cdot \text{Ln}(0,656 \cdot 4) \right]}{30,48 \cdot (2 \cdot \pi) \cdot 2,416}$$

$$R_{RS} = 11,197$$

La resistencia ánodo suelo, se determina con 3.14:

$$R_{AS} = 5,030$$

Resistencia del conductor eléctrico

Debido a que la distancia entre el ánodo y el tanque es pequeña selecciona un conductor eléctrico calibre 10 AWG tipo RHW, aptos para ser instalados al aire libre, en ductos o directamente enterrados en ambientes húmedos con temperaturas hasta de 75°. Las conexiones se aíslan con un recubrimiento epóxico.

Se selecciona un conductor de cobre con aislamiento tipo RHW. La resistencia del conductor se determina con la expresión 3.15, según la Fig. 3.11 donde la longitud total del conductor es de 85,82 pies.

El calibre de conductor es 10 mm<sup>2</sup>. La distancia entre ánodos S y la distancia del ánodo a la estructura se obtienen de las figuras 3.9 y 3.10 respectivamente

|                         |                                 |
|-------------------------|---------------------------------|
| Resistencia             | $R_E = 1,04 \times 10^{-4}$ Ohm |
| Longitud                | $L_1 = 2$ pie                   |
| Número de conductores   | $n = 4$                         |
| Separación entre ánodos | $S = 20,82$ pie                 |

Reemplazando estos valores en la expresión 3.15 se tiene:

$$R_{CE} = 1,04 \times 10^{-3} \cdot \left( 2 + \frac{(4-1) \cdot 20,82}{2} \right)$$

$$R_{CE} = 0,035 \text{ Ohm.}$$

#### Corriente drenada por el ánodo:

El metal que se protege es acero estructural y el material del ánodo es magnesio por lo que la tensión se obtiene con 3.17 donde:

|   |                |
|---|----------------|
| Tensión producida por el material del ánodo | $V_a = 1,55$ V |
|---|----------------|

|                                |               |
|--------------------------------|---------------|
| Tensión requerida por el metal | $V_m = 0,6$ V |
|--------------------------------|---------------|

Entonces:

$$\Delta V = |1,55| - |0,6| - 0,1$$

$$\Delta V = 0,85 \text{ V}$$

La corriente drenada por el ánodo se obtiene con: 3.16

$$I_D = \frac{0,85}{5,023 + 0,035}$$

$$I_D = 0,17 \text{ A}$$

La corriente drenada de 0,17 A es mayor que la corriente requerida de protección estimada (0,11 A).

El periodo de vida **T** se obtiene con 3.18 donde:

Factor de utilización

$$F_U = 0,76$$

Suministro real de corriente del material anódico

$$\alpha_R = 500 \text{ A-lb/h}$$

Factor **kn** para  $\alpha_T$  en A·h/lb

$$kn = 8760 \text{ h}$$

Peso del ánodo

$$W_n = 17 \text{ lb}$$

$$T = \frac{0,76 \cdot 4 \cdot 17 \cdot 500}{8760 \cdot 0,17}$$

$$T = 17,3 \text{ años}$$

El periodo de vida del lecho anódico conformado por cuatro ánodos de 17 lb es de 17,3 años, que superan ampliamente el periodo de vida de diseño.

### 3.5 INSTALACIÓN DEL SISTEMA

#### 3.5.1 Acondicionamiento del tanque de GLP

El tanque recibe un tratamiento de arenado y pintado con tres capas de pintura epoxica. En el centro de sus cuerpos esféricos extremos se sueldan dos orejas de acero ASTM A 35 para conectar por soldadura de estaño los conductores de conexión de los ánodos de sacrificio.

#### 3.5.2 Instalación de ánodos y relleno anódico

Los ánodos se instalan en posición vertical a una profundidad de 2,10 m del borde superior poso de concreto, y en el centro de los lados del poso de concreto.

##### Ánodo

Material: Magnesio

Peso de 17 Lb.

Dimensiones:

Diámetro 0,374 pie. (113,9 mm)

Longitud 1,416 pie (431.6 mm)

##### Backfill

Composición

Yeso 75 %,

Bentonita, 20 %,

$\text{Na}_2\text{SO}_4$  ,5%

**Dimensiones**

**Diámetro**      0.667 pie      (203,3 mm)

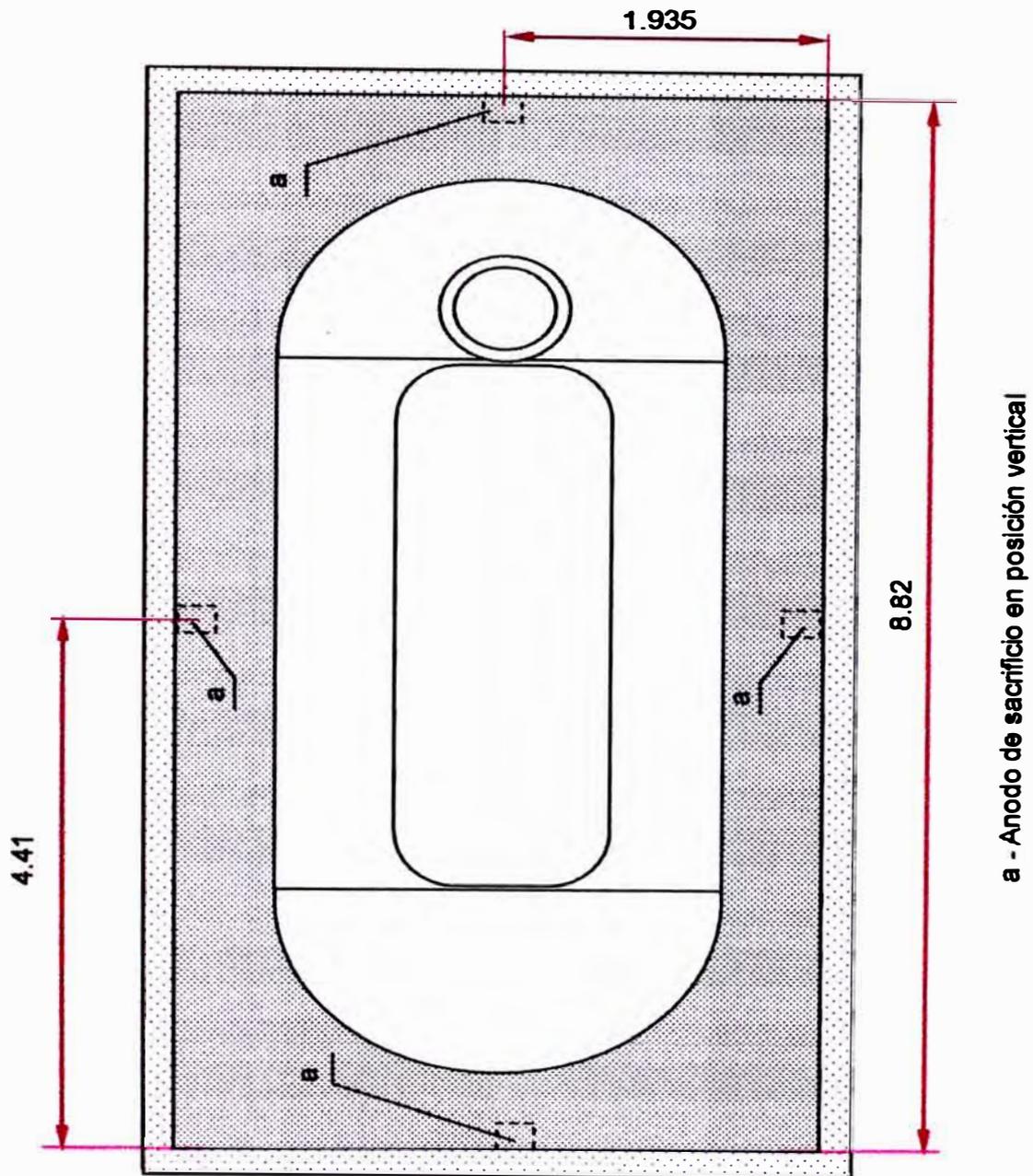
**Longitud**      2,416 pie      (736.4 mm)

**Conductor eléctrico**

**Tipo de aislamiento:**      RHW

**Calibre**      10 mm<sup>2</sup>

**Longitud:**      28 m



a - Anodo de sacrificio en posición vertical

Fig. 3.9 Ubicación de los ánodos.

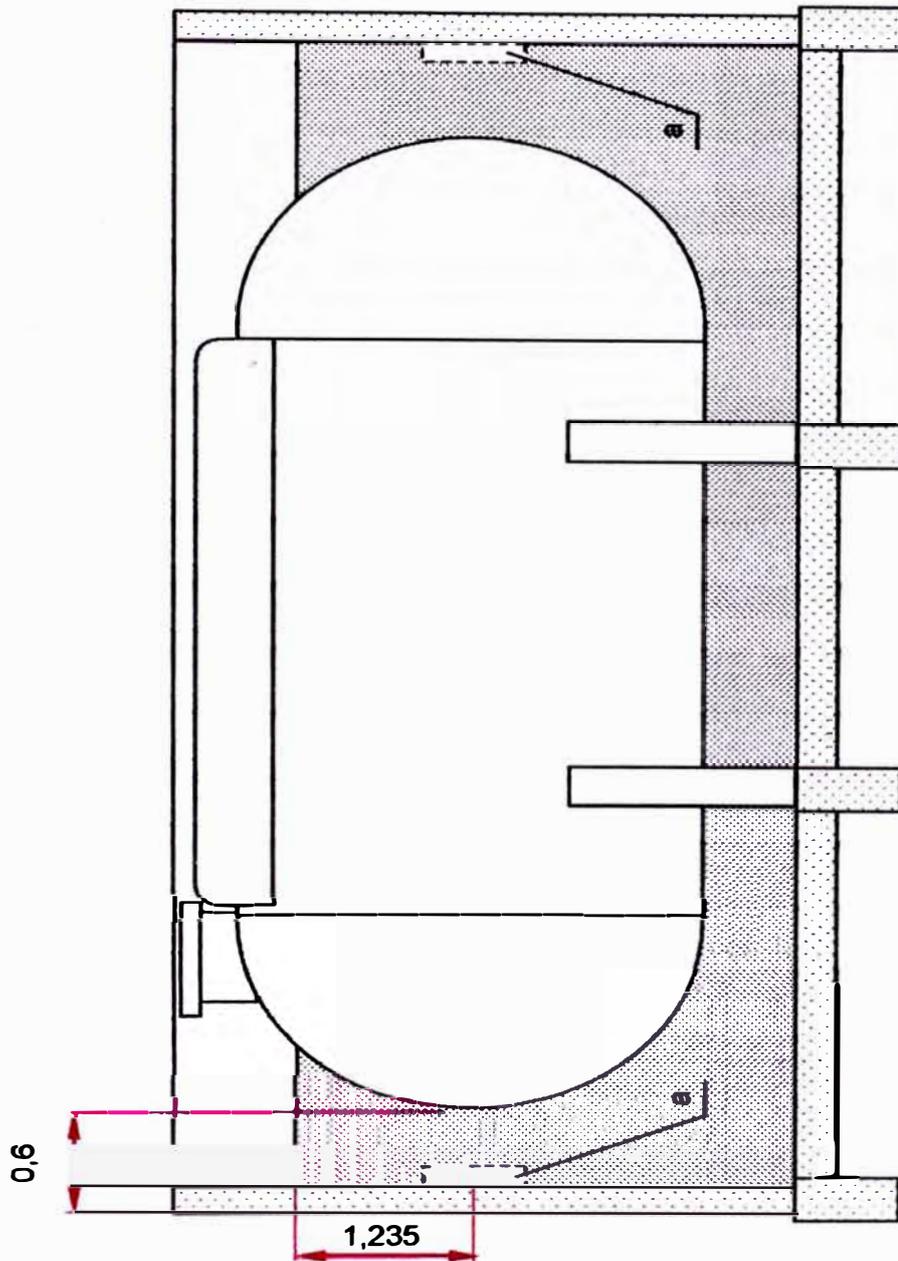
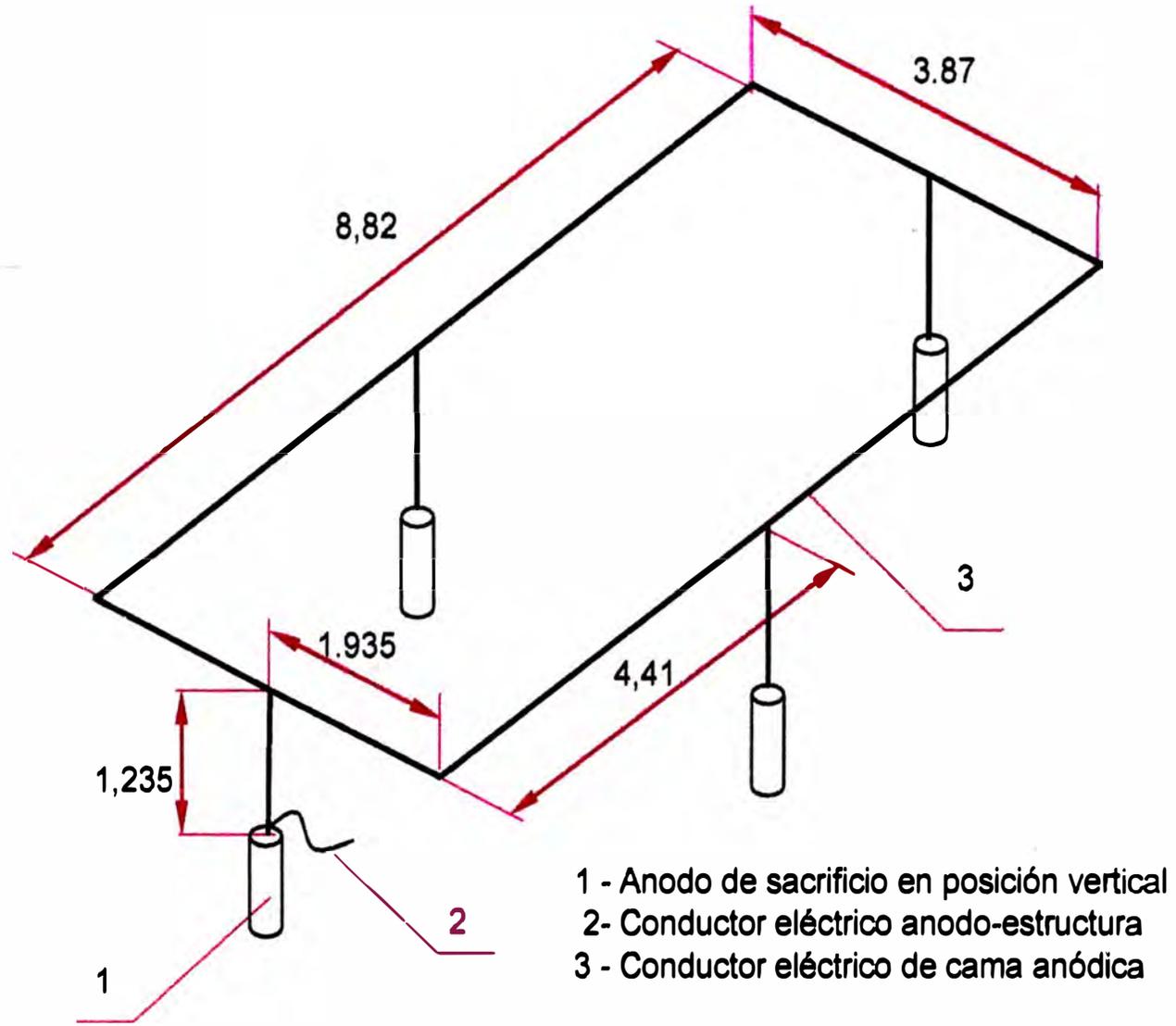


Fig. 3.10. Profundidad de enterramiento de los ánodos.

Fig. 3.11 Cama anódica



Otras condiciones:

Se considera una protección anticorrosiva constituida por dos capas de pintura aplicada sobre la superficie metálica con acabado arenado. La primera capa de pintura una coalta de base y una capa de acabado de pintura epóxica color amarillo ocre (color estándar para GLP).

Características de los ánodos que se adquieren.

Se adquieren en el mercado ánodos de sacrificio de 17 lb completos, es decir incluyendo el backfill en su bolsa de algodón y tres metros de cable, listo para su instalación, como se muestra en la Fig. 3.9

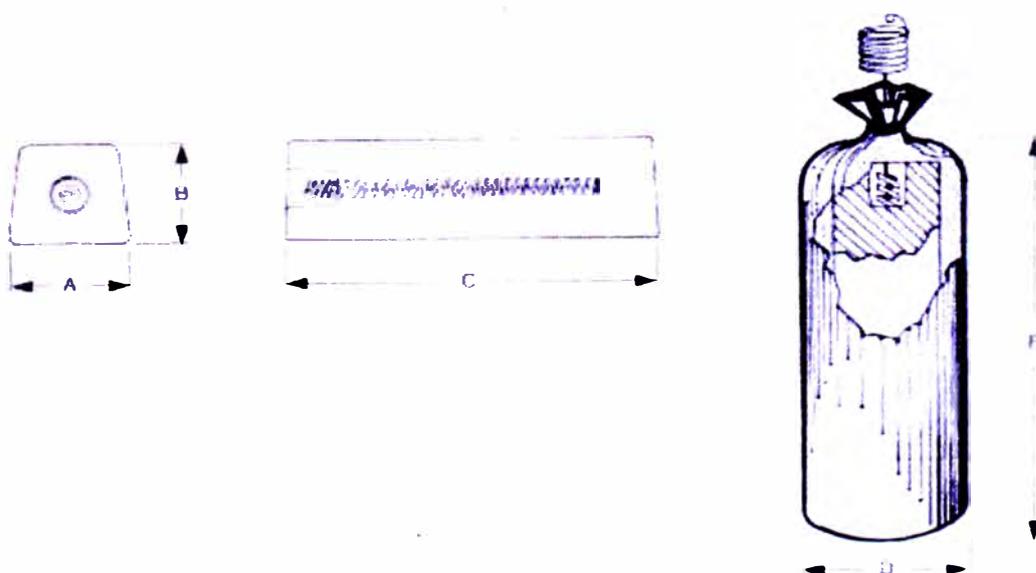


Fig. 3.12 Ánodo de sacrificio con relleno

### 3.6 RESULTADOS

El sistema de protección catódica del tanque consta de una cama anódica formada por cuatro ánodos de sacrificio de magnesio de 17 lb instalados en los extremos y parte media del poso y conectados eléctricamente con el punto medio de una de las tapas semiesféricas del tanque, como se muestran el plano M 1 y plano de detalle M 2.

## **CAPITULO 4**

### **COSTOS**

#### **4.1 COSTOS DE INVERSIÓN**

El costo de inversión es el siguiente:

Costo de ánodos de sacrificio.

Los ánodos de sacrificio de magnesio de 17 lb. y todos sus accesorios se encuentran en el mercado nacional. Los costos de adquisición e instalación se muestran en la tabla 4.1 Medrado y presupuesto.

Costo de capa de pintura.

El costo de la pintura anticorrosiva también se incluye en la tabla 4.1

Costo de Diseño.

#### **4.2 COSTOS DE OPERACIÓN**

El sistema de protección es una pila electroquímica que actúa automáticamente por lo que su costo de operación es cero.

Su costo de mantenimiento es mínimo ya que no tiene partes en movimiento y las conexiones eléctricas no están sometidas a riesgo de manipulación indebida porque se encuentran enterradas.

Uno de los aspectos que se tiene que tener en cuenta, es la cobertura de techo, que se debe mantener en buen estado para evitar que el agua de la lluvia se introduzca en el pozo del tanque de GLP. Estos costos son muy poco significativos y no se tienen en cuenta.

#### **4.3 COSTO TOTAL**

En términos prácticos el costo total de este sistema de protección se puede considerar como el costo de inversión que se muestra en la tabla 4.1.

#### **4.4 VENTAJAS ECONÓMICAS**

El sistema de protección catódica se puede considerar como el costo de un seguro, es decir que si el ambiente es corrosivo, la instalación del sistema de protección catódica garantiza que la estructura metálica protegida no sufrirá ningún daño, pero si no se instala, o se instala defectuosamente, de todas maneras se producirá el fenómeno de la corrosión, cuya consecuencia es el deterioro de la estructura, con daños que pueden ser irreparables, en cuyo caso el costo de reposición es muchas veces mayor que el costo de la protección catódica.

En este caso, con un costo de tanque de US\$ 28 000, el costo de instalación de la protección anticorrosiva que es de 3079.60 US\$, que representa sólo el 11 % del costo del tanque.

Tabla 4.1 METRADO Y PRESUPUESTO

| Item | Descripción   | Cant. | Unid.  | Precio unitario US\$ | Precio parcial US\$ |
|------|---|-------|--------|----------------------|---------------------|
| 1.1  | Anodo de sacrificio de magnesio de 17 lb con backfill de yeso, bentonita y $\text{CuSO}_4$ en saco de algodón, con 3 m de conductor de cobre de 10 mm <sup>2</sup> tipo RHW | 4     | uu     | 150.00               | 600.00              |
| 1.2  | Conductor RHW unipolar  | 30    | m      | 1.40                 | 42.00               |
| 1.3  | Tubo de PVC SAP $\phi$ 3/4  | 10    | uu     | 2.16                 | 21.60               |
| 1.4  | Instalación de cuatro ánodos de sacrificio  |       | global |                      | 100.00              |
| 1.5  | Pruebas - medición de corriente   |       | global |                      | 60.00               |
| 1.6  | Diseño  | 1     | global | 2000                 | 2000.00             |
|      | <b>Sub total 1</b>  |       |        |                      | <b>2823.60</b>      |
| 2.1  | Esmalte epóxico color amarillo ocre x gln   | 2     | uu     | 39.00                | 78.00               |
| 2.2  | Pintura coaltar x gln   | 2     | uu     | 39.00                | 78.00               |
| 2.3  | Mano de obra de pintura   | 2     | uu     | 50.00                | 100.00              |
|      | <b>Sub total 2</b>  |       |        |                      | <b>256.00</b>       |
|      | <b>Total</b>  |       |        |                      | <b>3079.60</b>      |

## **CONCLUSIONES**

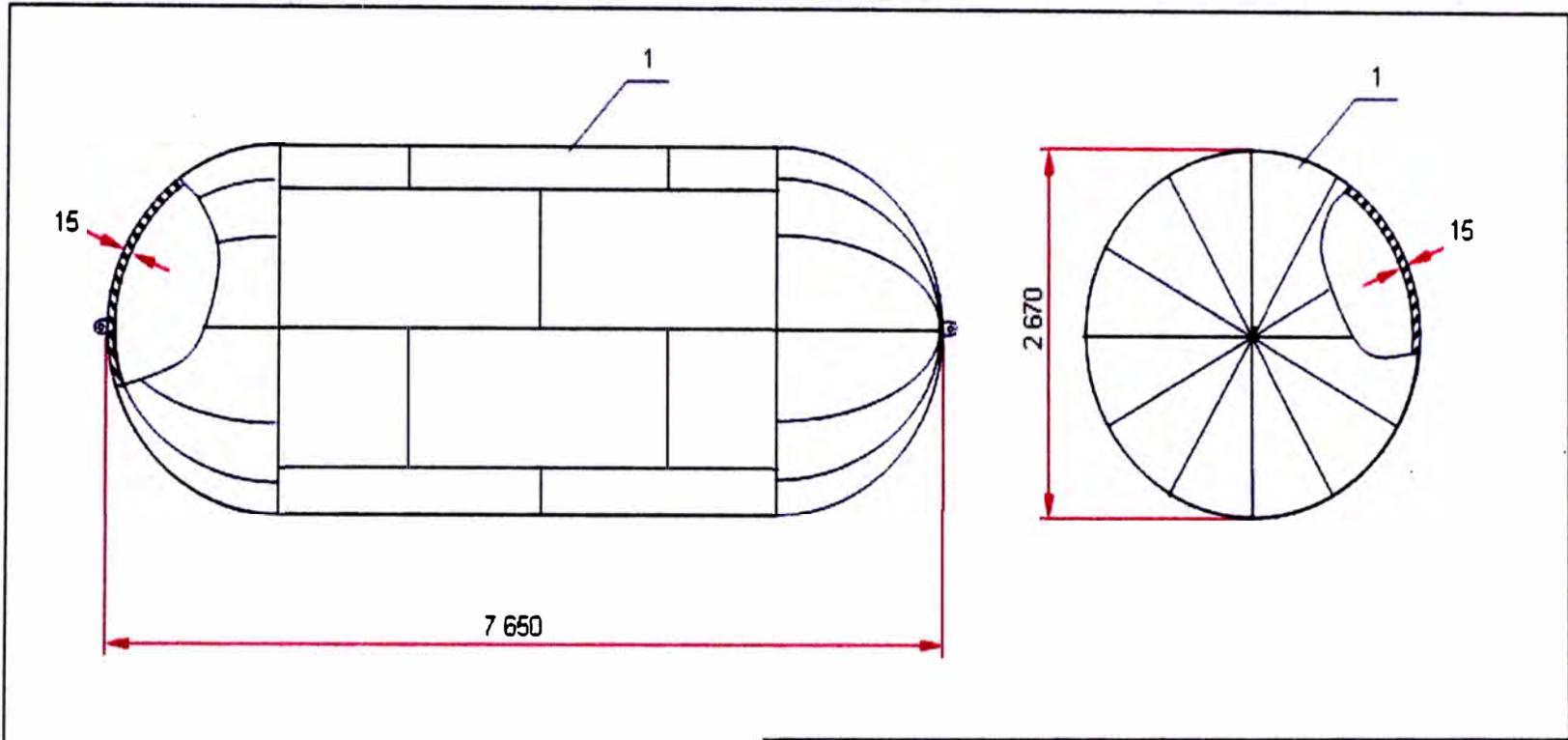
- 1) El sistema de protección catódica está formado por una cama anódica de cuatro ánodos de magnesio de 17 lb. La corriente de protección obtenida de 0,17 A es mayor que la corriente calculada de 0,11 A, por lo que la cama anódica suministra una corriente de protección adecuada.
- 2) El sistema de protección catódica protegerá al tanque durante 17,3 años, que supera el periodo requerido de 15 años con un margen de seguridad de 15,33 %.
- 3) La distribución de los ánodos en los extremos y el punto medio del tanque permite una adecuada distribución del área total protegida en cuatro sectores.
- 4) El costo del sistema de protección de 3079.60 US\$, representa el 11% del costo del tanque, que es de 28 000 US\$ que es poco significativo. es decir, con solo el 11 % del costo se protege el 100 % de la inversión.
- 5) El costo de operación es cero y el costo de mantenimiento es poco significativo.
- 6) Como el sistema provee la corriente de protección adecuada y protege el tanque por 17,3 años, se considera que el sistema diseñado cumple con las condiciones de diseño.

## **RECOMENDACIONES**

- 1) Se recomienda instalar el sistema de protección catódica, pues cumple con las disposiciones reglamentarias y tiene costos aceptables.**
- 2) Para la protección de estructuras con máxima economía son usados los esquemas mixtos de protección, los cuáles consisten en emplear un revestimiento con buenas características aislantes y de bajo costo complementado con un sistema de protección catódica.**
- 3) Se recomienda proteger las estructuras metálicas con sistemas anticorrosión por sus ventajas técnicas y porque, como se demuestra en este proyecto, en términos relativos tienen costos muy poco significativo.**

## BIBLIOGRAFIA

- 1. Universidad de Alicante;** "Prevención de la corrosión", Departamento de Física Química. Alicante, España, 1999.
- 2. Jorge Luis Ojeda Lay.** "Control del peso neto del gas licuado de petróleo en cilindros por un organismo supervisor", TESINA Facultad de ingeniería industrial UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS Lima Perú 2006
- 3. Ministerio de Energía y minas.** D.S. No 019-97-EM "Reglamento de Establecimientos de Gas Licuado de Petróleo para Uso Automotor Gasocentros". El Peruano. Lima- Perú.1997.
- 4. WWI Procat S.L.** "Protección catódica. Anodos de magnesio ensacados."
- 5. Jorge Cantor Rodríguez.** "Programa para el diseño de sistemas de protección catódica con ánodos de sacrificio" UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA. Santa Fe de Bogotá. 1995.
- 6. Ministerio de Energía y Minas.** "Código Nacional de Electricidad". 1992. Tomo V. Sistema de Utilización. Dirección General de Electricidad. Lima, Perú. 1992.
- 7. Conductores Eléctricos Lima S.A.** "Catálogo General". Segunda Edición. Año 2000. Lima, Perú. 2000
- 8. Santiago Castellano Vidal.** "Sistema de protección catódica para tuberías y equipos de una planta concentradora de mineral." Tesis de Grado FIM. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima\*Perú. 1990.
- 9. Combustión y Clinkerización.** "Combustión industrial de Gas Natural"

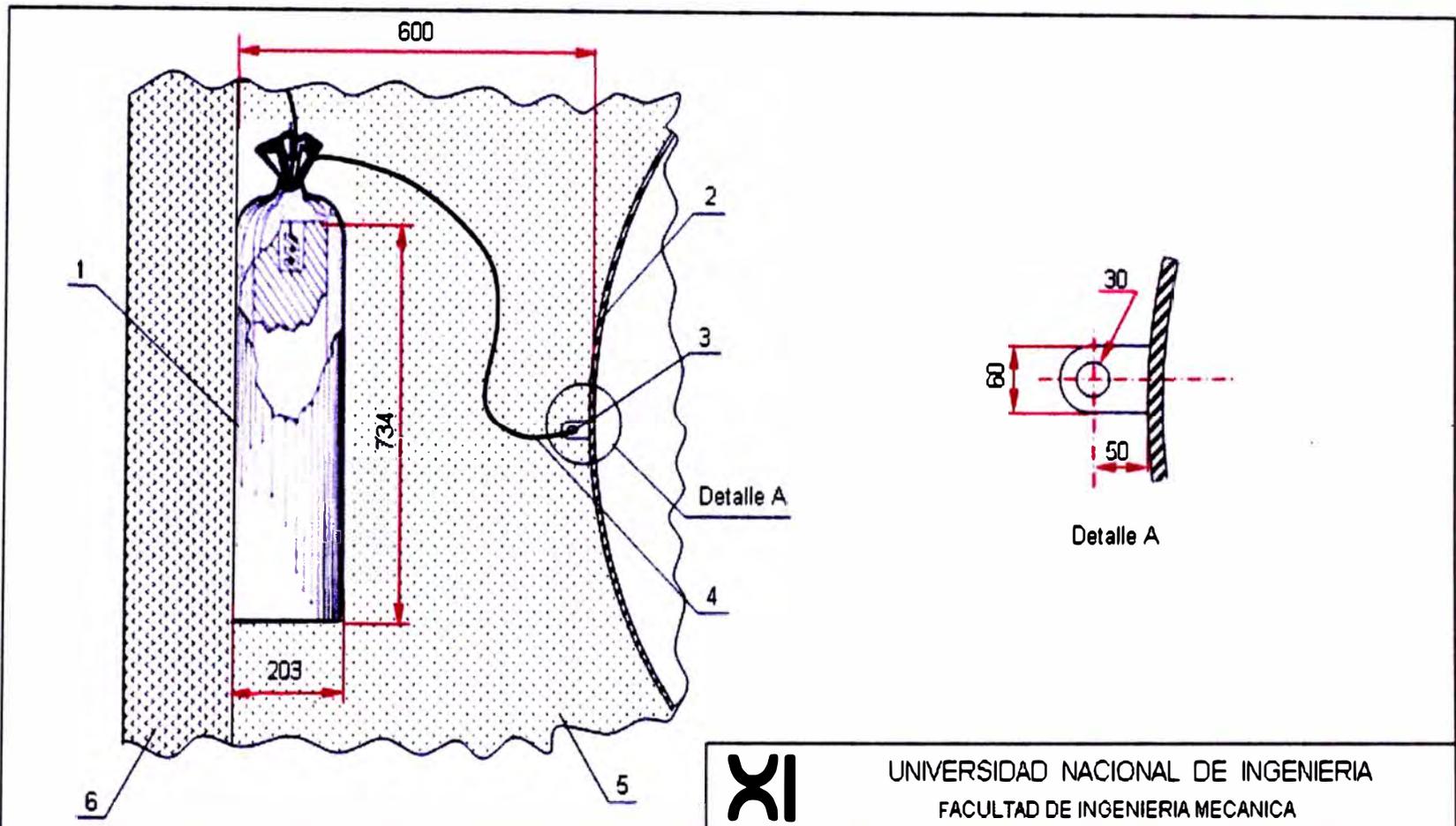


**XI** UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

Denominación:  
UBICACIÓN DE INSERTOS PARA CONEXIONES A ANODOS

|          |                |               |  |          |
|----------|----------------|---------------|--|----------|
| DISEÑO   | G. Saldarriaga | Escala<br>S/E | Todas las medidas en mm<br>excepto las especificadas | VºBº     |
| DIBUJO   | G. Saldarriaga |               |  |          |
| REVISADO | W. S           | Fecha         | PLANO Nº M.-1  | Revisado |
| APROBADO | W.S.           | 11-11-02      | Reemplazado por:                                     |          |

|    |                          |             |            |      |
|----|--------------------------|-------------|------------|------|
| 1  | Tanque de 10 000 Galones | 7650 x 2670 | Acero A 36 | 1    |
| Nº | Denominación             | Dimensiones | Material   | Cant |



|    |                           |                        |           |      |
|----|---------------------------|------------------------|-----------|------|
| 6  | Muro de concreto          |                        | Concreto  | 1    |
| 5  | Arena de rio              |                        | Arena     |      |
| 4  | Conductor eléctrico       | 10 mm <sup>2</sup> RHW | Cobre     | 29 m |
| 3  | Inserto para conexión     | Ver detalle A          | Acero A36 | 4    |
| 2  | Tanque de 10 000 Galones  | 7650 x 2760            | Acero A36 | 1    |
| 1  | Anodo de sacrificio 17 lb | 203 x 734              | Magnesio  | 4    |
| Nº | Denominación              | Dimensiones            | Material  | Cant |

|   |                |               |  |   |
|---|----------------|---------------|--|---|
|  <b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA</b><br><b>FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA</b> |                |               |  |   |
| Denominación:   |                |               |  |   |
| UBICACIÓN DE INSERTOS PARA CONEXIONES A ANODOS  |                |               |  |   |
| DISEÑO  | G. Saldarriaga | Escala<br>S/E | Todas las medidas en mm<br>excepto las especificadas | V"B°  |
| DIBUJO  | G. Saldarriaga |               |  |   |
| REVISADO  | W. S           | Fecha         | PLANO N° M -2  | Revisado  |
| APROBADO  | W.S.           | 11-11-02      |  |   |
|   |                |               | Reemplazado por:                                     |  |

## **ANEXOS**

## **ANEXO A**

### **Reglamento de Establecimientos de Gas Licuado de Petróleo Para Uso Automotor Gasocentros**

04/09/97.- D.S. No 019-97-EM.- Reglamento de establecimientos de gas licuado de petróleo para uso automotor-gasocentros . (05/09/97)

#### **CAPITULO II TANQUES DE ALMACENAMIENTO**

##### **NORMAS TECNICAS**

**Artículo 33°.-** Los Gasocentros deben tener tanques de almacenamiento de GLP diseñados, fabricados y probados, de acuerdo a lo establecido en la Norma Técnica Peruana emitida por INDECOP; y, en caso de ausencia, por lo establecido en el Código ASME Sección VIII, División 1 o División 2, para recipientes a presión.

##### **CUMPLIMIENTO DE LAS NORMAS ASME**

**Artículo 45°.-** Los tanques enterrados o monticulados deben ser diseñados y construidos de acuerdo con las Normas ASME, específicas para tal fin y estar provistos de protección catódica y protección anticorrosiva; y deben estar cubiertos por material no corrosivo, tal como arena de río o polvillo de cantera, con un espesor de treinta centímetros (0.30 m.) como mínimo. Está prohibido el tránsito vehicular sobre el área de tanques enterrados; para lo cual, el área respectiva debe estar señalizada y protegida con barreras físicas.

## ANEXO B



### **Magnesium Anodes**

**Galvotec's magnesium anodes** are produced in a variety of shapes and sizes for use in seawater, brackish water, and fresh water cathodic protection systems.

Our experience in producing galvanic anodes assures that you will receive top quality anodes that will effectively inhibit corrosion when used in a properly designed and maintained cathodic protection system.

### **Composition:**

Galvotec's magnesium anodes conform in composition to the requirements of U.S. Government Specification MIL-A-21412A (Ships). This 6% aluminum, 3% zinc alloy (AZ-63) usually provides the best combination of economy and operating characteristics in seawater or brackish water.

### **Galvanic Efficiency:**

The current efficiency of Galvotec's magnesium anodes is nominally 55% in seawater and the current capacity is about 550 amp-hr/lb. The open circuit potential of the magnesium alloy used is nominally -1.55 volts to a

copper/copper sulfate half cell in seawater; the driving voltage to galvanized steel is about 0.70 volts, providing a relatively high current output per anode. Both hull and condenser anodes are available with a plastisol (polyvinyl chloride) coating which serves as an excellent current barrier shield.

### **Applications:**

Magnesium anodes are effective and economical corrosion fighters that for over 25 years have been protecting a variety of steel structures in salt, brackish and fresh water, including:

- Hulls of ships, barges, tugs and boats
- Ballast tanks of ore carriers and similar vessels
- Bulkheads
- Water storage tanks
- Piers and pilings
- Pipelines
- Heat exchangers
- Travelling screens

For further information, or to discuss your specific requirements, contact our sales office.

[Click here to view our Magnesium Anodes catalog](#) in PDF format.



You'll need the free acrobat viewer to browse our brochures and catalogs.

Galvotec Corporate Offices: (956) 630-3500

Galvotec Sales Offices: (504) 362-7776

Galvotec Corrosion Services (504) 362-7373

Galvotec™ Anodes are manufactured by Galvotec Alloys, Inc.

Galvotec™ is a trademark of Galvotec Alloys, Inc., for sacrificial anodes.

© 2011 Galvotec Alloys, Inc. All rights reserved.

## ANEXO C



### MATERIALES ANODOS DE SACRIFICIO Ánodos de Magnesio

De los metales empleados como ánodos de sacrificio, el magnesio es el que tiene el potencial de circulación más alto, por lo que es el que se suele emplear para proteger catódicamente el acero en electrolitos de mayor resistividad, en donde el aluminio y el zinc pueden resultar antieconómicos.

Las aplicaciones más usuales de los ánodos de magnesio son:

#### ***Protección eventual***

- En estructuras submarinas protegidas con ánodos de aluminio o zinc, los cuales, por defecto de cálculo, no son capaces de dar la corriente inicial necesaria para polarizar la estructura. El empleo de ánodos de magnesio, cuya reacción en agua de mar produce potenciales muy altos en el acero, ayudará a alcanzar rápidamente el potencial de polarización.
- Protección temporal de tuberías enterradas durante el periodo de construcción y antes de que entre en funcionamiento el sistema de Protección definitivo. Estos ánodos se instalan fácilmente en la misma zanja que el tubo, sin necesidad de excavación adicional. La conexión a la tubería se puede hacer a través de una caja de toma de potencial o directamente a la tubería.
- Limpieza de tanques de carga y lastre en buques, utilizando cinta de magnesio de gran longitud, con la que se produce un alto potencial en las paredes de acero del tanque, con la consiguiente evolución de hidrógeno que desprenderá cualquier incrustación adherida a la pared del tanque.
- Protección exterior de cascos de embarcaciones varadas en agua de estuarios o ríos.

Normalmente consiste en colgar los ánodos desde la borda.

#### ***Protección permanente***

Los ánodos de magnesio se emplean especialmente para la protección de:

- Tuberías enterradas en zonas urbanas o en zonas muy congestionadas con otros servicios, de esta forma se evitan interferencias sobre estructuras ajenas.
- Para reforzar zonas de tubería protegida catódicamente por un sistema de corriente impresa, en donde, por cualquier circunstancia, no se alcanza el nivel de protección.
- Tramos de tubería aislados del sistema general de Protección Catódica mediante juntas dieléctricas
- Tramos cortos de tuberías de acero, como son las acometidas a edificios o industrias.
- Vainas en el cruce de tuberías con vías públicas

- Protección del interior de recintos conteniendo agua dulce: cajas de agua de intercambiadores de calor, depósitos de agua, sobre todo si es potable, etc.
- Accesorios y válvulas metálicas intercaladas en tuberías de plástico enterradas.

En una tubería enterrada en una canaleta de hormigón o un espacio angosto, se puede instalar cinta de magnesio paralela a la tubería. Los ánodos de magnesio actúan como electrodos de referencia en tanques acumuladores de agua caliente, en cuyo medio el zinc no funciona correctamente.

### **Aleaciones**

Los ánodos de magnesio se fabrican en diferentes aleaciones, algunas de las cuales están protegidas bajo patentes. Hay dos tipos básicos que se diferencian según el potencial: -1,55 V y -1,75 V (respecto al electrodo Cu/SO<sub>4</sub>Cu). Las composiciones básicas y rendimientos de cada tipo aparecen en la tabla adjunta. La aleación de 1,75 V puede funcionar en terrenos de mayor resistividad que la de menor potencial.

### **Ánodos para protección de tuberías enterradas**

Estos ánodos se suministran normalmente preempaquetados, en un saco de algodón, rodeados de un relleno estabilizador. El relleno, ayuda a que la salida de corriente se haga uniformemente por toda la superficie del ánodo, con lo cual el consumo de éste se reparte por igual en toda la superficie anódica. Además, mantiene la humedad, rebaja la resistividad del electrolito y disminuye la polarización anódica, por formar sales de magnesio más solubles.

No obstante, si el terreno fuese de baja resistividad, los ánodos de gran longitud o la demanda de corriente fuese muy pequeña, se podrán emplear ánodos desnudos, sin relleno. En estas situaciones se suele emplear cinta o barras de magnesio extruido.

*Existen varias mezclas de relleno, una de las más populares tiene la siguiente composición:*

|                     |     |
|---------------------|-----|
| Sulfato Calcio..... | 75% |
| Bentonita.....      | 20% |
| Sulfato Sódico..... | 5%  |

La mejor calidad de los ánodos de magnesio se obtiene por fundición vertical, en moldes cilindricos que, comparados con los de sección en D, tienen las siguientes ventajas:

- Mejor control del peso, por ausencia de rechupes.
- Mejor estructura microscópica, menor contracción y menor porosidad.
- Mejor colocación y centrado del ánima, para conexión del cable.
- Mejor acabado de la superficie exterior, condición fundamental para obtener una salida de corriente uniforme.

### **Conexión**

Para garantizar una completa utilización de la masa anódica, el ánima insertada deberá quedar bien centrada, haciendo un buen contacto eléctrico en toda la masa del magnesio. Esto se logra utilizando un ánima de acero galvanizado, con lo que el zinc hace de medio aleante entre el acero y el magnesio.

Conexión del cable al ánima:

Los relativamente bajos potenciales de circulación, que se manejan con los ánodos de sacrificio, exigen muy baja resistencia en el circuito eléctrico interno, por lo que la conexión entre el cable y el ánima de acero, tendrá que ser la menor posible.

La baja resistencia inicial de esta conexión es fácil de obtener por varios procedimientos clásicos, (cuña, soldadura, manguito de presión, etc.), pero si esta conexión fuese aumentando su resistencia con el tiempo, disminuiría la efectividad del ánodo.

Por ello, una vez efectuada la conexión, deberá quedar impermeabilizada mediante un material aislante de gran efectividad y durabilidad (resinas epoxi y/o cinta autovulcanizable).

### ***Cables***

El cliente, podrá elegir el tipo y sección de cable, pero si no se ordena otra cosa, los ánodos de magnesio se suministran con tres metros de cable de cobre de 6 mm<sup>2</sup> con aislamiento de

Polietileno y cubierta de PVC, tipo RV 0,6 kV, o similar, de color rojo.

En la tabla adjunta se dan los tipos de ánodos de magnesio estándar, con sus medidas, resistencia a tierra en terreno de 1.000 Ohm × cm., corriente liberada en este terreno en mA y pesos netos y del conjunto ánodo-relleno.

### ***Otras formas de ánodos***

#### **ÁNODOS DE SERVICIO.**

Empleados para proteger pequeñas longitudes de tuberías de acometidas de gas, agua, gasóleo, etc., pudiéndose emplear, bien desnudos o preempaquetados con relleno.

Pueden suministrarse con un inserto de acero roscado a 1/2", para roscar sobre una T ciega intercalada en el centro de la tubería; en este caso, los ánodos funcionarán desnudos, sin relleno; se pueden suministrar con relleno, en cuyo caso, irán con cable de conexión.

Así mismo, se pueden emplear ánodos largos, de pequeño diámetro, fabricados con cinta o barra de magnesio extruido, disponibles en varios diámetros, pudiéndose suministrar desnudos.

## ANEXO D

Densidades de corriente recomendadas para protección catódica.

| Medio                                  | Corriente requerida ( mA/pie <sup>2</sup> ) |
|--|---|
| Tuberías                               | 1 - 2                                       |
| Paredes de pozos profundos             | 1   |
| Fondos de tanques, parte externa       | 1   |
| Parte interna de tanques               | 5 - 10                                      |
| Tanque de procesos                     | 7 - 10                                      |
| Suelo con bacterias sulfato reductoras | ≤ 42  |
| estructuras en agua de mar             | 5 - 15                                      |
| estructuras en aguas pantanosas        | 1 - 2                                       |

Fuente: Programa para el diseño de sistemas de protección catódica con ánodos de sacrificio.- Jorge Cantor.

## ANEXO E

### Características de los Ánodos de sacrificio

| <b>CARACTERISTICA</b>                        | <b>Mg H - 1</b> | <b>Mg High Potencial</b> | <b>Cinc</b> |
|--|-----------------|--------------------------|-------------|
| <b>Potencial(Cu/CuSO4)</b>                   | -1.55           | -1.75                    | -1.1        |
| <b>Eficiencia de corriente(%)</b>            | 25 - 50         | 50                       | 90          |
| <b>Salida de corriente real(A-hr/lb)</b>     | 250 - 500       | 500                      | 335         |
| <b>Salida de corriente teórica (A-hr/lb)</b> | 1000            | 1000                     | 372         |
| <b>Pérdida de peso real(lb/A.año)</b>        | 35 - 17.5       | 17.5                     | 26.2        |

PROTECCION CATODICA

<http://www.docentes.unal.edu.co/napinzonc/docs/Proteccion%20catodica.pdf>