

**PROTECCIÓN CATÓDICA DE LA TUBERÍA DEL RAMAL DE GAS A LA
ESTACIÓN DE SERVICIO EN LA MINA PRIBBENOW DE LA DRUMMOND LTD.**

LUIS ORLANDO ADARME CABALLERO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2014

**PROTECCIÓN CATÓDICA DE LA TUBERÍA DEL RAMAL DE GAS A LA
ESTACIÓN DE SERVICIO EN LA MINA PRIBBENOW DE LA DRUMMOND LTD.**

LUIS ORLANDO ADARME CABALLERO

**Proyecto de Grado presentado como requisito para optar el título de
Ingeniero Químico**

Director:

DIONISIO ANTONIO LAVERDE CATAÑO

Ph. D. Ing. Metalúrgico

Codirector:

FERNANDO VILLAMIZAR ARIZA

Ing. Metalúrgico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2014

DEDICO ESTE TRABAJO:

A MIS HIJOS:

ANGY DANIELA

LAURA SOFIA

DAVID JOSE

POR QUIENES DOY MI VIDA,

A MI MADRE QUIEN HA ESPERADO TANTO

ESTA GRADUACION,

Y A MI DIOS PADRE, HIJO Y ESPIRITU SANTO

QUIENES ME HAN ACOMPÑADO EN TODO MOMENTO.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Ing. Fernando Villamizar Ariza por brindarme primero su amistad, y segundo su colaboración para realizar la practica en su empresa.

Dr. Dionisio Antonio Laverde por su confianza y por ser parte de este capítulo de mi aprendizaje en la UIS.

Ing. Carlos Quintero por su invaluable colaboración y apoyo dentro de la mina Drummond Ltd.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. GENERALIDADES	16
2. OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GENERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3. MARCO TEÓRICO	18
3.1 DEFINICIÓN DE CORROSIÓN	18
3.2 FUNDAMENTOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA	19
3.3 SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO	20
3.3.1 Ánodo galvánico	20
3.3.2 Características de un ánodo de sacrificio	21
3.3.3 Tipos de ánodos	21
3.3.3.1 Ánodos de Magnesio	21
3.3.3.2 Relleno o Backfill	22
3.3.5 Vida del ánodo	23
3.4 PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA.	23
3.4.1 Cama anódica	24
3.6 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE PROTECCIÓN	24
4. DESARROLLO	25
4.1 RESISTIVIDAD DEL SUELO	25
4.2 FACTORES DE DISEÑO	26
4.2.1 Área a proteger	27
4.2.2 Potencial polarizado	27
4.2.3 Demanda de corriente	27
4.2.4 Densidad de corriente	28
4.2.5 Consumo del ánodo	29

4.2.6 Cálculo de la resistencia de un ánodo	29
4.2.7 Cálculo del Número de ánodos	29
4.2.8 Factor de Seguridad	31
4.2.9 Información acerca del medio o condiciones del suelo	31
5.1 EXCAVACIÓN Y ZANJADO	32
5.1.1 Realización de la Excavación	32
5.1.2 Reconformación del terreno y limpieza	33
5.2 INSTALACIÓN DE LOS ÁNODOS DE MAGNESIO HP DE 17 LB	34
5.2.1 Características y dimensionamiento de los Ánodos de magnesio HP 17 lb instalados	34
5.2.2 Aplicación de la soldadura Cadweld	35
5.2.3 Postura de la estación de prueba	36
5.3 MEDICIÓN DE POTENCIALES	36
5.4 JUNTAS AISLANTES PARA BRIDAS	37
5.5 EQUIPOS UTILIZADOS	38
CONCLUSIONES	39
RECOMENDACIONES	40
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	41
ANEXOS	42

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Composición Química de un ánodo de Magnesio	22
Tabla 2. Características generales de los ánodos galvánicos.	23
Tabla 3. Densidad de Corriente de acuerdo a la característica del medio	28
Tabla 4. Tabla de Excel donde se realizaron los cálculos de diseño.	29
Tabla 5. Condiciones del suelo.	31

LISTA DE FOTOS

	pág.
Foto 1. Determinación de la resistividad del suelo de la mina Pribbenow	26
Foto 2. Excavación y zanjado para descubrir la tubería	32
Foto 3. Reconformación del terreno e instalación de la estación de prueba	33
Foto 4. Instalación de un ánodo de magnesio	34
Foto 5. Aplicación de la Soldadura del cable al tubo.	35
Foto 6. Postura de Estación de prueba	36
Foto 7. Medición de Potenciales en diferentes puntos a lo largo de la tubería	37

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Sistema de protección catódica.	16
Figura 2. Corrosión de una capa metálica	18
Figura 3. Diagrama de Pourbaix hierro-agua a 25	19
Figura 4. Ánodo de protección catódica.	20
Figura 5. Variación de resistividad por diversos factores	25

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Acta de entrega del Sistema de Protección Catódica	42

RESUMEN

TITULO: PROTECCIÓN CATÓDICA DE LA TUBERÍA DEL RAMAL DE GAS A LA ESTACIÓN DE SERVICIO EN LA MINA PRIBBENOW DE LA DRUMMOND LTD.*

AUTOR: ADARME CABALLERO, Luis Orlando**

PALABRAS CLAVES: Corrosión, Ánodos de Sacrificio, Protección Catódica, Normas Nace.

DESCRIPCIÓN

En la Protección Catódica con ánodos de sacrificio se utilizan metales fuertemente anódicos conectados a la tubería a proteger, dando origen al sacrificio de dichos metales por corrosión. El presente trabajo tiene como finalidad diseñar e instalar un sistema de protección catódica por ánodos de magnesio para la tubería de la Estación de servicio de gas en la mina Pribbenow de la Drummond Ltd. con el fin de protegerla contra la corrosión.

Se hacen las respectivas excavaciones sobre la tubería y zanjas para las estaciones de prueba. Se suministran cinco ánodos de magnesio y se instalan cinco estaciones de prueba en cinco puntos diferentes de la tubería de 2" de diámetro para monitoreo. Se sueldan los cables de los ánodos de magnesio y los cables de las estaciones de prueba al tubo con soldadura cadweld (mezcla de óxido de cobre y aluminio). Se toman potenciales iniciales utilizando electrodos de Cu/CuSO₄.

Se encontraron valores de -1.555 mV, cerca de los ánodos y -1.300 mV para el sistema. Es necesario instalar una brida con respectiva junta de aislamiento en la llegada a la estación de bombeo de gas para evitar la pérdida de corriente y polarizar totalmente la tubería ya que se encontró un valor de potencial muy bajo en la estación.

Los criterios de evaluación se basa en las normas y recomendaciones de la National Association of Corrosion Engineers (NACE).

* Proyecto de Grado

** Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Director: Ph. D. Ing. Dionisio Antonio Laverde Cataño

ABSTRACT

TITLE: CATHODIC PROTECTION SYSTEM OF THE RAMAL PIPE TO THE GAS SERVICE STATION IN MINE PRIBBENOW OF DRUMMOND LTD.*

AUTHOR: ADARME CABALLERO, Luis Orlando**

KEYWORDS: Corrosion, Sacrifice Anodes, Cathodic Protection, Nace Standards.

DESCRIPTION

In the cathodic protection with sacrificial anodes are used metals highly anodics connected to the pipe, giving rise to the sacrifice of these metals from corrosion. This paper aims to design and install a cathodic protection system by magnesium anodes for pipeline of the gas service station in the mine Pribbenow of Drummond Ltd. in order to protect it against corrosion.

There were made the respective excavations on the pipe and the trench for the test stations. There were provided five magnesium anodes and there were installed five test stations in five different positions of the 2 "pipe diameter for monitoring. There were welded the cables of the magnesium anodes and the cables of test stations to the tube with CADWELD welding (a mixture of copper oxide and aluminum). The initial potential are taken using electrodes of Cu/CuSO_4 .

There were found values of -1.555 mV, close to the anode and -1.300 mV for the system. It is necessary to install a flange with respective insulation gasket on arrival at the gas pumping station to prevent power loss and completely polarize the pipeline since a value of very low potential at the station was found.

The evaluation criteria are based on standards and recommendations of the National Association of Corrosion Engineers (NACE).

* Degree Draft

** School of Chemical Engineering, Faculty of Physicochemical Engineering Director: Ph. D. Engineer. Dionisio Antonio Laverde Cataño

INTRODUCCIÓN

Este proyecto corresponde a un trabajo en Protección Catódica que se ha hecho en la Mina Pribbenow de la Drummond Ltd; ubicado en el corregimiento La Loma, Departamento del Cesar. Los costos y consumo de gasolina y ACPM del parque automotor y uso en general en máquinas y equipos, ha llevado a los directivos de la Drummond Ltd; a pensar en cambiar de combustible en la mina. Es por eso que se ha construido una estación de gas para proveer a su parque automotor, máquinas y equipos, bajando los costos en combustibles.

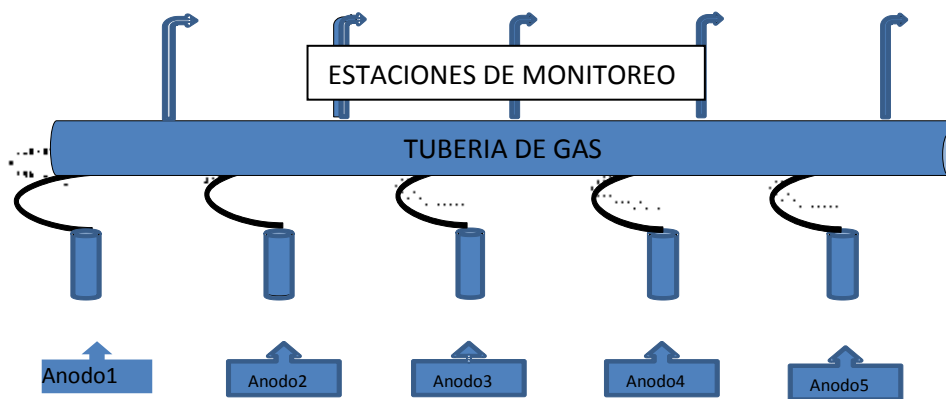
Para proteger la tubería de gas de la corrosión se ha diseñado e instalado un sistema de protección catódica por ánodos de magnesio de 17 lb en la línea de gas de 150 m de longitud y 2" de diámetro, perteneciente a la estación de gas de la mina Drummond Ltd.

Se suministraron e instalaron cinco (5) ánodos de magnesio de 17Lb hp y cinco (5) estaciones de monitoreo en cinco (5) puntos diferentes del ramal de gas a la estación de servicio de gas. La Protección Catódica es uno de los métodos de prevención de la corrosión más usados actualmente. Proteger catódicamente una estructura metálica consiste en eliminar todas las zonas anódicas para que toda su superficie funcione catódicamente, o sea no se oxide. Los ánodos de magnesio, también llamados de sacrificio, son conectados a la estructura a proteger (tubería, etc.) quienes suministran los electrones suficientes que evitan la corrosión.

1. GENERALIDADES

La construcción del sistema de protección catódica se efectuó en el ramal de la estación de gas de 2" de la Mina Pribbenow, Drummond Ltd. instalando 5 ánodos de magnesio de acuerdo a un diseño previo con una capacidad de corriente de 450-540 A-h/Lb y 5 estaciones de monitoreo como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Sistema de protección catódica.



Diseño del sistema de Protección Catódica realizada por el autor

Se realizaron 5 apiques para la instalación de los 5 ánodos y las zanjas para el cableado de las estaciones de prueba. Cada ánodo se instaló individualmente entre 1,5 y 2 m de profundidad, 1 m de distancia perpendicular a la tubería y distanciados el uno del otro a 30 m aproximadamente.

Se eligieron ánodos de magnesio más frecuentemente utilizados en suelos debido a que el magnesio es muy activo y puede superar las grandes resistividades que a menudo el suelo presenta.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Instalar un sistema de protección por ánodos de magnesio de 17 lb en la línea de gas perteneciente a la estación de gas de 150 m en 2" de diámetro de la mina Pribbenow de Drummond Ltd.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir el sistema de Protección Catódica, apropiado en la línea de gas perteneciente a la estación de gas utilizando ánodos de sacrificio.
- Garantizar una vida útil al sistema a partir del diseño desarrollado de Protección Catódica.
- Instalar estaciones de monitoreo para medir el potencial del sistema de protección catódica.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 DEFINICIÓN DE CORROSIÓN¹

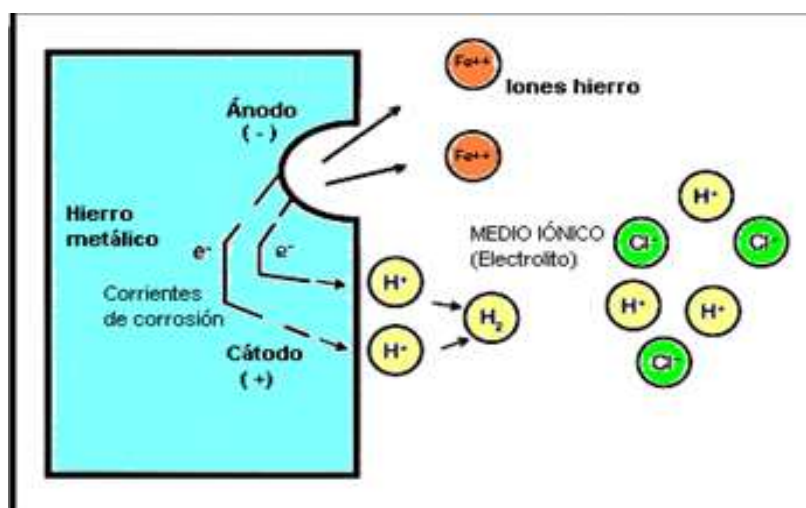
La corrosión es el deterioro de un material como resultado de una reacción con el medio. Termodinámicamente, la energía impartida al metal durante la refinación queda disponible como energía potencial ($-\Delta G^0$) para impulsar la reacción de corrosión cuando el metal se pone en contacto con un medio. El hierro o sus aleaciones tenderán espontáneamente a transformarse hacia un estado de menor energía. La transformación se produce debido a un cambio de la energía libre de Gibbs ($-\Delta G^0$).

La oxidación se define como una reacción en la cual un átomo, ion o molécula se vuelve más electropositivo. La reacción anódica o de oxidación del metal se puede esquematizar de la siguiente forma:



Esta reacción se muestra en la figura 2.

Figura 2. Corrosión de una capa metálica



Fuente: Bertolini, L; Corrosión of Steel in water.

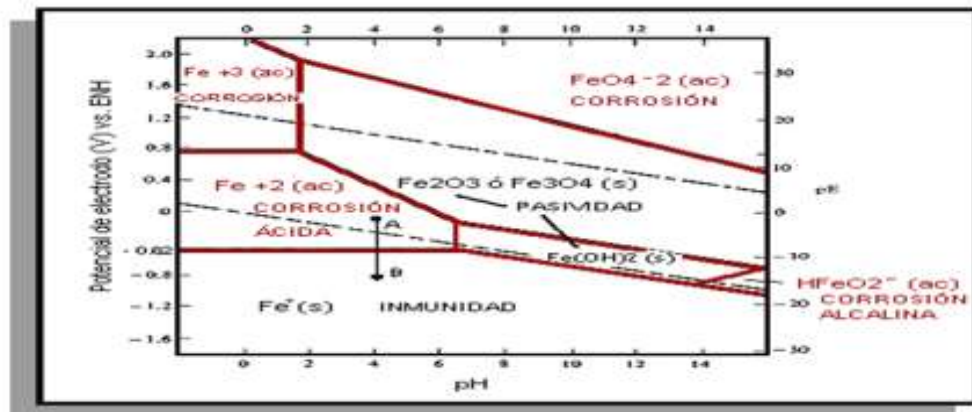
¹ NACE: CP 3 Technologist Course Manual. p. 1-5

3.2 FUNDAMENTOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA²

El mecanismo de esta técnica se basa en la polarización catódica del metal a proteger mediante la acción de una corriente continua (DC) externa, la cual lleva al potencial eléctrico de la superficie del metal hasta un valor de protección. La aplicación de este mecanismo implica el montaje de una celda electroquímica donde el metal que se quiere proteger debe situarse como cátodo (polaridad negativa).

Desde el punto de vista termodinámico, la protección catódica disminuye el potencial de electrodo natural del metal a proteger, hasta un valor en el cual su estabilidad pertenezca al estado reducido del mismo (M^0). Esto se visualiza gráficamente en la Figura 3, la cual es correspondiente al diagrama de Pourbaix hierro - agua a 25°C; en este diagrama se observa que el estado inicial natural del hierro en medio ácido se ubica dentro de la zona de corrosión ácida (punto A), y la influencia de la protección catódica lo lleva hacia potenciales de electrodo en la zona de inmunidad (punto B).

Figura 3. Diagrama de Pourbaix hierro-agua a 25



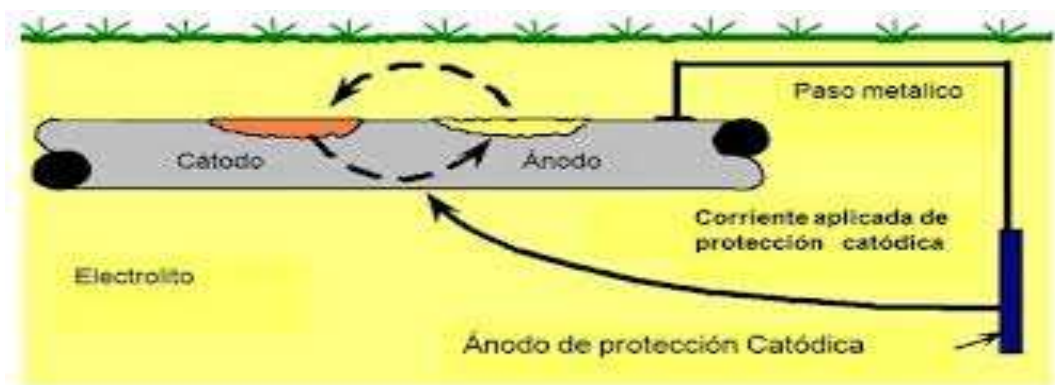
Fuente: Bertolini, L; Corrosión of Steel in water.

² GÓMEZ, Félix Cesáreo y ALCARAZ LORENTE, Diego J. Manual Básico de Corrosión para ingenieros. Universidad de Murcia, España. 2004.

3.3 SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO³

3.3.1 Ánodo galvánico. Se fundamenta en el mismo principio de la corrosión galvánica, en la que un metal más activo es anódico con respecto a otro más noble, corroyéndose el metal anódico, como se muestra en la figura 3.

Figura 4. Ánodo de protección catódica.



Fuente: <https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQjwYdNUVYI6ilvW-NLcZ-d4oDy2A8>

En la protección catódica con ánodo galvánico, se utilizan metales fuertemente anódicos conectados a la tubería a proteger, dando origen al sacrificio de dichos metales por corrosión, descargando suficiente corriente para la protección de la tubería.

La diferencia de potencial existente entre el metal anódico y la tubería a proteger, es de bajo valor porque este sistema se usa para pequeños requerimientos de corriente, pequeñas estructuras y en medio de baja resistividad.

³ CALLISTER, William. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. 1996

3.3.2 Características de un ánodo de sacrificio⁴

- Debe tener un potencial de disolución lo suficientemente negativo, para polarizar la estructura del acero a -0,8 V. Sin embargo el potencial no debe de ser excesivamente negativo, ya que eso motivaría un gasto superior, con un innecesario paso de corriente. El potencial práctico de disolución puede estar comprendido entre -0,95 a -1,7 V.
- Corriente suficientemente elevada, por unidad de peso de material consumido.
- Buen comportamiento de polarización anódica a través del tiempo.
- Bajo costo.

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

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

3.3.3.1 Ánodos de Magnesio. Los ánodos de Magnesio tienen un alto potencial con respecto al hierro y están libres de pasivación. Están diseñados para obtener el máximo rendimiento posible, en su función de protección catódica. Los ánodos de Magnesio son apropiados para oleoductos, pozos, tanques de almacenamiento de agua, incluso para cualquier estructura que requiera protección catódica temporal. Se utilizan en estructuras metálicas enterradas en suelo de baja resistividad hasta 3000 ohmio-cm. El magnesio puro permite manejar un voltaje de 850 mV para la protección del acero, pero experimentalmente se ha demostrado una muy rápida corrosión con baja eficiencia.

⁴ PEABODY'S. Control of Pipeline Corrosion. Ánodos de Magnesio de Alto Potencial. Pág. 182. Compañía CORRPRO INC.

Algunas aleaciones con 150 mV menos de voltaje han demostrado ser satisfactorias en una gran variedad de electrolitos. Tres propiedades del magnesio lo hacen utilizable como ánodo de sacrificio: posee un alto manejo de voltaje para protección del acero, tiene un bajo equivalente electroquímico y tiene buenas propiedades de polarización anódica. Si la corrosión del magnesio se considera como una reacción divalente, entonces su equivalente electroquímico teórico es 1000 A-hr/lb 0 9 lb/A-año.

La composición química de un ánodo de magnesio se muestra en la tabla 1:

Tabla 1. Composición Química de un ánodo de Magnesio

COLADA	%Al	%Zn	%Mn	%Cu	%Si	%Fe	%Ni	%Mg
00-45-27	0,0009	0,0101	0,956	0,0007	0,0160	0,0039	0,0003	99,01

FUENTE: NACE: CP 3 Technologist Course Manual

3.3.3.2 Relleno o Backfill. Para mejorar las condiciones de operación de los ánodos en sistemas enterrados, se utilizan algunos rellenos entre ellos el de Backfill especialmente con ánodos de Zinc y Magnesio, estos productos químicos rodean completamente el ánodo produciendo algunos beneficios como:

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

La composición típica del Backfill para ánodos galvánicos está constituida por yeso (CaSO₄), bentonita, sulfato de sodio. La resistividad varía entre 50 a 250 ohm-cm. Ver especificaciones de los ánodos galvánicos en la tabla 2.

3.3.4 Especificaciones de los ánodos galvánicos

Tabla 2. Características generales de los ánodos galvánicos.

Ánodo	Eficiencia	Rendimiento A-hr/kg	Contenido de energía Ahr/kg	Potencial de trabajo (voltio)	Relleno
Zinc	95%	778	820	-1.10	50%yeso; 50%bentonita
Magnesio	95%	1102	2204	-1.45 a -1.70	75%yeso; 20%bentonita;5 % NA_2SO_4
Aluminio	95%	2817	2965	-1.10	

Fuente: Manual Básico de Corrosión para ingenieros, p. 102

3.3.5 Vida del ánodo. El tiempo de vida puede depender de la velocidad de la disolución del metal de acuerdo con la ley de Faraday y la eficiencia con la cual este proceso ocurre; definiéndose ésta como la carga de A-hr real sobre la teórica. El consumo del ánodo puede ser proporcional al total de la carga liberada, pero la velocidad de consumo en cualquier punto sobre la superficie del ánodo dependerá de la densidad de la corriente; en los bordes, esquinas y otros puntos la densidad de corriente puede ser más grande y el ánodo se corroerá más rápidamente.

3.4 PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA.

Para librarse de las limitaciones asociadas a voltaje con los ánodos galvánicos, la corriente proveniente de una fuente de energía externa puede ser impresa sobre el metal usando una cama anódica enterrada y una fuente de poder.

La fuente de energía más común es un rectificador, este dispositivo convierte la corriente alterna (CA) a corriente directa (CD).

Los ánodos de corriente impresa deben ser materiales como: grafito, hierro fundido con alto contenido de silicio, metales platinizados, magnetita y mezcla de óxidos metálicos entre otros. Estos ánodos se instalan desnudos con material de relleno especial tal como grafito pulverizado (con alto contenido de carbón). Están conectados individualmente o en grupos a una terminal positiva o a una fuente de corriente directa, mediante conductores aislados. Los ánodos pueden ser localizados en camas o distribuidos cerca, abajo o alrededor de las estructuras a proteger.

3.4.1 Cama anódica. La cama anódica es el sitio donde se instalan de forma permanente los dispositivos anódicos y no requieren de mantenimiento. Estos dispositivos deben ser revisados cuando se tenga la seguridad de una falla en el ánodo o cama y debe reemplazarse cuando el tiempo de vida útil para el cual fueron diseñados haya concluido. Sin embargo se debe verificar la corriente de salida de los ánodos y la corriente total de la cama, con el fin de determinar si la cama anódica está funcionando de acuerdo a las especificaciones.

3.6 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE PROTECCIÓN

Los siguientes factores influyen en la selección de un sistema de protección catódica:

- Área a proteger.
- Corriente requerida.
- Condiciones de suelo tales como: resistividad, composición química, aireación, pH y bacterias sulfato reductoras.
- Posibilidad de interferencia de la Protección Catódica sobre estructuras adyacentes.

4. DESARROLLO

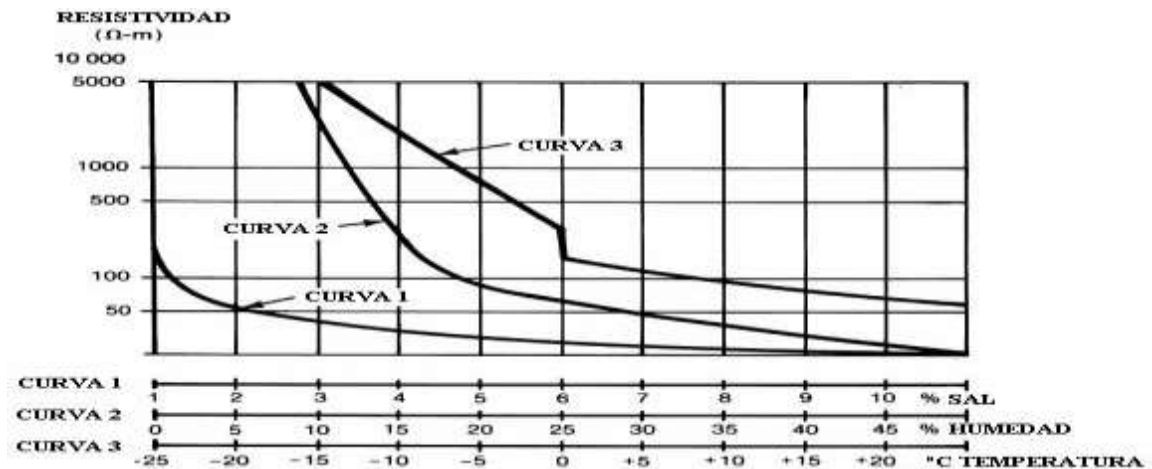
4.1 RESISTIVIDAD DEL SUELO⁵

El suelo es de naturaleza heterogénea; varía por su composición y según las condiciones del medio y se pueden clasificar de diversas formas, por ejemplo en arcillosos, rocoso o arenoso, sí, se realizan mediciones se pueden encontrar diversos valores de resistividad.

Las medidas de resistividad eléctrica de un suelo nos dice qué tan conductivo puede ser. La corrosividad de un suelo es inversamente proporcional a su resistividad eléctrica, dependiendo esta última del contenido de iones de solución, el contenido de humedad y la temperatura. Ver figura 5.

Se puede definir la resistividad del suelo ρ como la resistencia eléctrica entre las caras opuestas de un cubo (arista = 1 m) llenado con este suelo. Sus unidades serán Ωm ó Ωcm .

Figura 5. Variación de resistividad por diversos factores



Fuente: adaptada de IEEE, 2000

⁵ NACE: CP 3 Technologist Course Manual

Para la determinación práctica de la medida de las resistividades se utiliza el método de Wenner. Tenemos dos electrodo de corriente (I) y dos de tensión (V); conocida la intensidad de corriente que atraviesan los electrodos y la distancia entre los electrodos adyacentes S, el valor de la resistividad se calcula con la Ec. 1.

$$\rho = 2\pi VS/I \quad (1)$$

La resistividad del suelo tomada en la mina de Pribbenow teniendo en cuenta las características de pH, humedad, temperatura de acuerdo a la figura 5 y basado en pruebas realizadas días atrás en otro trabajo con corriente impresa es de 100 Ωm ó 10.000 Ωcm . Se relaciona en la imagen 1.

Foto 1. Determinación de la resistividad del suelo de la mina Pribbenow



Foto tomada en el Laboratorio de Ingacor de Colombia.

4.2 FACTORES DE DISEÑO

Los principios electroquímicos son muy directos, pero su aplicación en sistemas reales es a menudo suficientemente compleja para hacer determinaciones cuantitativas.

4.2.1 Área a proteger. Las áreas pueden ser fácilmente subestimadas en estructuras complejas sujetas a una variedad ambientes. Se debe incluir un estimativo de la superficie expuesta por el deterioro del recubrimiento durante la vida del sistema.

Se calcula el área superficial total desnuda a proteger:

El área total es: $At = \pi dL$

Donde d = diámetro= 2"=2*2.54=5.08 cm

L= longitud de la tubería = 150 m = 15000 cm

$$At = \pi dL \quad (2)$$

$$At = 3.1416 * 5.08 \text{ cm} * 150 * 100 \text{ cm}$$

$$At = 239389.92 \text{ cm}^2$$

Efectividad del recubrimiento: 99% o un 1% desnuda por ser una tubería nueva.

Superficie total a proteger: $A_{\text{desnuda}} = 239389.92 * 0.01 = 2393.8992 \text{ cm}^2$

4.2.2 Potencial polarizado. La densidad de corriente necesaria para alcanzar este potencial se usa en el diseño del sistema.

Potencial impulsor = $\Delta E = -1.70 \text{ V} - (-1.00 \text{ V}) = -0.7 \text{ V}$

E_p del ánodo de magnesio = -1.70 V (CSE)

4.2.3 Demanda de corriente⁶. La variación de los parámetros de diseño, trae como consecuencia cambios en los requerimientos de corriente de protección, llegando a disminuir hasta un 50% cuando se presenta la formación de capas calcáreas o incrementarse hasta 20 veces por el deterioro del recubrimiento o por daños en la superficie del cátodo.

⁶ ASME Corrosión Control B31 - 8 - 1.989

Debido a la gran variación en los requerimientos en la densidad de corriente resulta importante que la estimación de la misma sea lo más precisa posible.

La corriente requerida se calcula del producto del área y la densidad de corriente requerida.

4.2.4 Densidad de corriente⁷.Una vez determinados los requerimientos de la densidad de corriente, se multiplica la densidad de corriente requerida por la superficie desnuda para obtener la corriente total:

$$I_T = i_{\text{desnuda}} \times A_{\text{desnuda}} \quad (3)$$

La densidad de corriente del acero disminuye a medida que aumenta la resistividad del suelo, pero si está muy aireado requiere una densidad de corriente mayor.

De acuerdo a la tabla 3, el suelo en el que se encuentra la tubería es ácido y alcanza temperaturas de 40° C por lo tanto se tomó una densidad de corriente de 161.4 mA/m² que es la mayor densidad, para estar seguros de suministrarle la máxima corriente necesaria.

Tabla 3. Densidad de Corriente de acuerdo a la característica del medio

MEDIO	DENSIDAD DE CORRIENTE mA/m ²
Suelo neutro	4.3 a 16.1
Suelo muy ácido	32.3 a 161
Suelo caliente	32.3 a 269
Agua dulce en movimiento	32.3 a 64.6
Agua dulce turbulenta con O ₂	32.3 a 161.4
Agua de mar	32.3 a 161.4
Solución ácida o alcalina en tanques	32.3 a 161.4
Hormigón mojado (concreto húmedo)	32.3 a 161.4

Fuente: NACE Internacional, 2005 CP 3 fundamentos de diseño pag. 4:11

⁷ NACE: CP 3 Technologist Course Manual

Por lo tanto se realiza el cálculo de la Ecuación 3.

$$I_T = i_{\text{desnuda}} \times A_{\text{desnuda}}$$

$$I_T = 0.01614 \text{ mA/cm}^2 \times 2393.8992 \text{ cm}^2 \quad I_T = 38,637$$

4.2.5 Consumo del ánodo. La masa total requerida de ánodos se determina de las velocidades de consumo conocidas por la demanda de la corriente calculada.

4.2.6 Cálculo de la resistencia de un ánodo. Para un ánodo de magnesio de HP de 17 lb (utilizados en la mina Pribbenow) cuyas dimensiones son: 30 in (76.2 cm) de largo y 6 in (15.2 cm) de diámetro

Al usar la ecuación de Dwight modificada:

$$R = (\rho / 2\pi L) (\ln(8L/d) - 1) \quad (4)$$

Donde $\rho = 10.000 \text{ } \Omega\text{-cm}$, $L = 76.2 \text{ cm}$, $d = 15.2 \text{ cm}$

$$R = (10000 / 2 * 3.1416 * 76.2) (\ln(8L/d) - 1) = 56.21 \text{ } \Omega$$

Calculo de drenaje de corriente de un ánodo:

$$I_a = \Delta E / R = 0.7V / 56.21 \Omega = 12.45 \text{ mA}$$

4.2.7 Cálculo del Número de ánodos. Número de ánodos se calcula por:

Corriente requerida/drenaje de corriente de un ánodo: # ANODOS = $I_T / I_a = 3.109$.

Todos los cálculos se encuentran resumidos en la tabla 4 de Excel.

Tabla 4. Tabla de Excel donde se realizaron los cálculos de diseño.

CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE UN ÁNODO					
$R(\Omega) = (\rho / 2\pi L) (\ln(8L/d) - 1)$					
Resistividad	$2 * \pi$	Longitud	Diámetro	$(\rho / 2\pi L)$	$(\ln(8L/d) - 1)$
10000	6,2832	76,2	15,2	20,8864266	2,69150758
RESISTENCIA UN ÁNODO=					56,2159755

Tabla 4 (Continuación)

CALCULO DEL DRENAJE DE CORRIENTE DE UN ÁNODO					
$I_a = \Delta E / R$					
Ep Mg(VCSE)	Criterio Protecc	ΔE impulsor	ΔE	Resistencia	I (Amp)
-1,7	-1	-0,7	0,7	56,2159755	0,01245198
CORRIENTE UN ÁNODO=					12,4519764

CÁLCULO DEL ÁREA SUPERFICIAL TOTAL DESNUDA DE LA TUBERIA					
Adesnuda= $\pi dL \cdot S_d$ S_d = Superficie desnuda (1%)					
π	Longitud	Diámetro	At	Sd	Adesnuda
3,1416	15000	5,08	239389,92	0,01	2393,8992
AREA DESNUDA =					2393,8992

CALCULO DE LA CORRIENTE REQUERIDA PARA EL SISTEMA					
$I_T = i_{desnuda} \times A_{desnuda}$					
DENSIDAD I	Adesnuda	I_T (mA)			
0,01614	2393,8992	38,6375331			
CORRIENTE REQUERIDA=					38,6375331

CALCULO DEL NUMERO DE ANODOS NECESARIOS	
$\# \text{ ANODO S} = I_T / I_a$	
# ANODOS NECESARIOS=	3,10292373
APLICACIÓN FACTOR DE SEGURIDAD (X1,5) Ó EL 50%	
# ANODOS FINALES=	4,6543856

Tabla 4 (Continuación)

CALCULO DE LA VIDA UTIL					
L=(W*Ca*U*E)/I Ánodo					
W (peso Kg)	Ca (A-y/Kg)	U-Factor utilización	E-Eficiencia	I Ánodo	Vida útil L
7,7	0,102	0,85	0,5	0,01245198	26,8065879
VIDA ÚTIL DE C/ANODO =					26,8065879

FUENTE: Autor

4.2.8 Factor de Seguridad. Ingacor de Colombia utiliza un factor de seguridad de 1.5, equivalente a un 50% valor efectivo de Corriente requerida con el fin de mitigar cualquier falencia en el cálculo final:

ÁNODOS TOTALES= $IT/Ia = 3.109 \cdot 1.5 = 4.6$ y este valor se aproxima a 5.

4.2.9 Información acerca del medio o condiciones del suelo

Tabla 5. Condiciones del suelo.

CONDICIONES DEL SUELO	
Resistividad del suelo	10.000 Ω cm
Profundidad del tubo	1,5 a 2,5 m
Variabilidad de la humedad	5% max humedad
Variabilidad de la temperatura	30°C a 40°C
Variación del pH	5 a 6.5

FUENTE: Información tomada en el Corregimiento La Loma Dpto. del Cesar.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 EXCAVACIÓN Y ZANJADO

En la construcción de sistemas de protección catódica así como en las inspecciones de integridad de las tuberías, se hace necesario realizar excavaciones ya sea para destapar la tubería o zanjas para cableado.

Foto 2. Excavación y zanjado para descubrir la tubería



Foto tomada cerca a la estación de servicio de la mina realizando la excavación y zanjado para descubrir la tubería.

En el caso de apique para realizar soldaduras Cadweld o inspección de la tubería, lo primero que se hace es localizar la tubería, antes de demarcar el sitio de la excavación según criterio de inspección y demarcación de la zanja o apique.

El zanjado se realiza en las dimensiones especificadas en el plano de diseño y según las distancias necesarias para realizar la soldadura y construir las acometidas.

5.1.1 Realización de la Excavación. La excavación se realiza de acuerdo al terreno con las herramientas adecuadas: para concreto y pavimento se utiliza

martillo neumático y para terreno normal se utiliza picas, palas, barras y pala dragas.

Se debe entibar la excavación para evitar accidentes con los operarios si la profundidad supera los 1.5 m.

Para la instalación de los 5 ánodos de magnesio se hizo 5 apiques respetivamente y sus zanjas para el cableado de las estaciones de prueba.

5.1.2 Reconformación del terreno y limpieza. Realizadas las actividades para las cuales se hizo la zanja o excavación se procede al tapado de la excavación en capas de (30) treinta cm debidamente compactadas con herramientas manuales o mecánicas.

La limpieza del terreno se debe enfocar en los desechos de la excavación y en las basuras generadas por las actividades que se realizaron en el sitio de trabajo, al igual se deben reparar los daños. Ver imagen 3.

Foto 3. Reconformación del terreno e instalación de la estación de prueba



Foto tomada cerca a la estación de servicio de la mina, realizando el relleno y la instalación de la estación de prueba.

5.2 INSTALACIÓN DE LOS ÁNODOS DE MAGNESIO HP DE 17 LB

Se seleccionó, suministró e instaló cinco (5) ánodos de magnesio HP 17LB humectados previamente, de acuerdo al pre diseño elaborado, la profundidad mínima fue de 20 cm debajo del eje de la tubería enterrada.

Igualmente se instalaron(5) estaciones de monitoreo de potenciales de 1.50m en tubería hierro de 2" en una caja de concreto de 40*40*50 cm, y un terminal de cobre.

5.2.1 Características y dimensionamiento de los Ánodos de magnesio HP 17 lb instalados⁸. Este ánodo tiene una capacidad de corriente de 450-540 A-h/Lb, y un índice de descomposición es de 16-19 lb/A. año. Ver foto 4.

Foto 4. Instalación de un ánodo de magnesio



Foto tomada cerca a la estación de servicio de la mina, realizando la instalación del ánodo de magnesio.

Los ánodos de magnesio HP 17LB instalados fueron rellenados con backfill, 75% de yeso hidratado($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 20% de arcilla de bentonita y 5% de sulfato de

⁸ PEABODY'S. Control of Pipeline Corrosion. Ánodos de Magnesio de Alto Potencial. Pág. 182. Compañía CORRPRO INC.

sodio(Na_2SO_4) debidamente expandido, compactado y se realizó el respectivo control de humedad. El backfill fué vaciado en su parte inferior con veinte centímetros, el cual sirvió de cama y cubrió completamente el ánodo hasta la parte superior más veinte centímetros

Cada ánodo (+) se instaló individualmente entre 1,5 y 2,5 m de profundidad a 1 m de distancia horizontal de la tubería y conectado en la estación de prueba al cable que se suelda a la tubería (-) para cerrar el circuito, además la distancia entre cada uno de ellos es de 30 m aproximadamente.

5.2.2 Aplicación de la soldadura Cadweld

Foto 5. Aplicación de la Soldadura del cable al tubo.



Foto tomada al tubo después de la soldadura cadweld.

La soldadura Cadweld es una mezcla de óxido de cobre y aluminio que se funde en un molde de grafito y se utiliza para hacer las uniones del cable con la estructura metálica a proteger. Dicho cable puede ser tanto de un ánodo de sacrificio como de una estación de prueba para medir los potenciales. Ver foto 5.

5.2.3 Postura de la estación de prueba

La estación de prueba es un punto donde se pueden medir los potenciales de las tuberías enterradas y/o estructuras que están siendo medidas o monitoreadas frecuentemente. En este caso se puede medir el potencial del ánodo como el potencial del sistema (tubería). Ver foto 6.

Foto 6. Postura de Estación de prueba



Foto tomada a la postura de la estación de prueba.

5.3 MEDICIÓN DE POTENCIALES⁹

En la práctica de Protección Catódica para tuberías enterradas de acero, es universalmente conocido que el potencial de electrodo por debajo del cual se asegura la inmunidad del metal ante las reacciones de corrosión, es de -850 mV referidos al *electrodo de Cu/CuSO₄* (equivalentes a -550 mV referidos al ENH); es decir, que valores más negativos que éste son aceptados como indicativo de protección catódica de aceros enterrados.

⁹ NACE: CP 3 Technologist Course Manual

Si en un suelo existe actividad microbiana (presencia de bacterias sulfato reductoras y/o ferruginosas), se adopta un criterio de Protección Catódica de -950 mV vs. Cu/CuSO₄, dados los efectos despolarizantes causados tras la actividad metabólica de dichas bacterias

Los potenciales ON medidos en las estaciones de prueba presenta potenciales menores y mayores a (-0,85V) por lo que la estructura se encuentra polarizada catódica y parcialmente.

1. Punto más alejado estación -1,148 V ON
2. -0,84 V
3. Punto medio -0,658 V
4. -0,60 V
5. Punto más cercano estación -0,57 V ON

Foto 7. Medición de Potenciales en diferentes puntos a lo largo de la tubería



Foto tomada a una lectura de los potenciales en la estación de servicio.

5.4 JUNTAS AISLANTES PARA BRIDAS

En el Sistema de Protección Catódica de la tubería en la estación de servicio de la

mina Pribbenow de la DrummondLtd., se ha encontrado que la tubería no está aislada y la corriente se aterriza en la llegada a la estación de bombeo. Por lo tanto de debe colocar un aislamiento eléctrico entre la tubería a proteger y la estación de bombeo. Se pretende evitar la dispersión de la corriente de protección de la tubería a través de la estación de bombeo que no está aislada y está aterrizada.

Cuando se aisló la tubería de la estación de bombeo y se desconectó la puesta a tierra se alcanzó un valor del potencial de -1.300 mV (CSE).

5.5 EQUIPOS UTILIZADOS

- Electrodo Cu/CuSO₄
- MiliamperímetrosFluke
- Molde Cadweld
- Cámara fotográfica
- Retroexcavadora
- Herramientas varias

CONCLUSIONES

1. Se realizó el diseño de Protección Catódica por ánodos de magnesio para proteger la tubería de gas de la corrosión, perteneciente a la estación de gas de la mina Drummond Ltd.
2. Se suministraron e instalaron cinco (5) ánodos de magnesio de 17 Lb HP de acuerdo al diseño realizado que aporta la corriente necesaria de Protección Catódica.
3. Se instalaron cinco (5) estaciones de monitoreo en cinco (5) puntos diferentes en el ramal de la estación de servicio para medir los potenciales de la tubería

RECOMENDACIONES

1. Las tuberías del ramal de gas a estación de servicio en la Mina DrummodLtd. de 150 m y 2" está parcialmente protegida catódicamente según norma Nace SP-0169-2007 con potenciales menores y mayores a -0,85 ON V.
2. Es necesario instalar una brida con respectiva junta de aislamiento en la llegada a la estación de bombeo de gas para evitar la pérdida de corriente y polarizar totalmente la tubería.
3. La tubería se encuentra recubierta con Epoxi Fundido FBE y por lo tanto se tomó solo un valor del 1% de desprotección.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ASME Corrosión Control B31 - 8 - 1.989

BERTOLINI, L; Corrosión of Steel in water.

CALLISTER, William. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. 1996

GILLESPIE, Ronald J. Química, Volumen 2, 1990, p. 761

GÓMEZ, Félix Cesáreo y ALCARAZ LORENTE, Diego J. Manual Básico de Corrosión para ingenieros. Universidad de Murcia, España. 2004.

NACE Control of External Corrosion on Underground and Submerged

NACE: CP 3 Technologist Course Manual

GILLESPIE, Ronald J. Química, Volumen 2, 1990, p. 761

PEABODY, A, Peabody's Control of Pipeline Corrosion, Houston, NACE Press, 2nd ed; 2001

ULICK R. Evans. Corrosiones metálicas. Editorial Reverté, 1987, p 127

ANEXOS

Anexo A. Acta de entrega del Sistema de Protección Catódica



Ingacor de Colombia E.U.

ACTA DE RECIBO

Drummond ltd recibe a satisfacción el suministro e instalación de cinco(5) anodos de magnesio de 17 lb para la protección catódica de la estación de gas vehicular por parte de Ingacor de Colombia e.u. con Nit. 804.005.673-6.

Potenciales tomados:

POTENCIAL SISTEMA - 1,300 mV.
POTENCIAL ANODOS -1,680, -1,550,
-1,450, -1,530, -1,560 (mV).

Se firma en La Loma , Cesar a los 28 días del mes de abril de 2013

Luis Orlando Adarme A
Técnico
Ingacor de Colombia E.U

Carlos Quintan
Drummond
Abril 29-13