ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Diseño del Sistema de Protección Catódica por Ánodos Profundos para un Bosque de Tanques de Almacenamiento de Combustible.

Willian Luis Suque Cercado (1), Julián Peña Estrella(2)
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción (1) (2)
Escuela Superior Politécnica del Litoral (1) (2)
Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador (1)
wsuque@espol.edu.ec, jpena@espol.edu.ec (1) (2)

Resumen

El objetivo de esta tesis es diseñar un sistema de protección catódica por el método de ánodos profundos, bajo principios y criterios de la protección en metales se obtiene los requerimientos necesarios de ánodos, transformador, cables conductores, conexiones, aisladores y demás elementos que forman parte del sistema a implementar. La metodología utilizada en este trabajo se basa en la obtención de la corriente de protección necesaria que deberán suministrar los ánodos profundos para la protección integral de los fondos de tanques, teniendo como antecedentes las propiedades eléctricas y naturales tanto del suelo como también de la estructura. Luego se realizó un análisis de factibilidad técnico-económica acerca de la ejecución de este tipo de métodos para un bosque de tanques, donde factores como el costo inicial de la obra, el espacio de aplicación, los requerimientos de corriente y facilidad para su instalación son primordiales para su elección contra el método de ánodos superficiales.

Palabras Claves: *Protección Catódica, Ánodos Profundos, Factibilidad.*

Abstract

The objective of this thesis is to design a Cathodic Protection System by deep anodes, which under principles and criterions from metals protection achieve us to find the necessities such as anodes, rectifier, conduction wires, connections y others elements that includes in the system. Considering the electrics and naturals properties from the soil and the structure, the used methodology is to obtain the adequate protection current that should to supply the deeps anodes for the integral protection of the bottoms tanks. After in this project realized analysis of technique-economic feasibility about the carrying out this method for one farm tanks, where the factors such the initial cost, the available space, requirements of current and facility for its installation are fundamentals for its selection against the surfaces verticals anodes method.

1. Introducción

Uno de los problemas que aquejan a la vida útil de una estructura metálica tales como los tanques de almacenamiento de combustible son los daños causados por la corrosión. Si la corrosión no es considerada en el diseño inicial de un sistema, puede causar frecuentes paros no programados y la necesidad de mantenimiento excesivo, reparaciones y reemplazo de piezas o partes dañadas para mantener el sistema en operación.

2. Contenido.

El alcance de este trabajo es la selección y el diseño adecuado para un bosque de tanques de almacenamiento de combustible, la selección será tratada a través de matrices de decisión, las cuales tendrá como precedentes parámetros tales como costo, facilidad de instalación, interferencia eléctrica y espacio físico para su implementación.

2.1. La Protección Catódica en Fondos de Tanques

Teniendo como marco teórico a la corrosión como la degradación del material debido a su interacción con el medio circundante, a través de la investigación se ha logrado de alternativas para el control y su posterior mitigación. Entre las alternativas encontramos los sistemas de protección catódica. Este tipo de método hace que la superficie del metal a proteger, actúe como el cátodo de una celda electroquímica ocasionando a que otro metal menos noble inmerso en el medio donde interactúan cumpla la función de ánodo o de "sacrificio". Existen dos sistemas de protección catódica:

- Sistemas de Protección Catódica por Ánodos Galvánicos.
- Sistemas de Protección Catódica por Corrientes Impresas.

Los sistemas de protección catódica por corrientes impresas utilizan como medio de alimentación para su funcionamiento una fuente externa de energía. La tasa de consumo de los ánodos es usualmente mucho mas baja. Este tipo de sistemas son favorables bajo requerimientos de alta demanda de corriente y electrolitos o medios con alta resistividad eléctrica. Las siguientes ventajas pueden ser citadas para los sistemas de corrientes impresas:

- Rangos altos de corriente.
- Capacidad para ajustar los niveles de protección, c) extensas áreas de protección.
- Bajo número de ánodos incluso en medios de alta resistividad eléctrica.
- Pueden proteger estructuras con recubrimientos de baja calidad.

Las limitaciones que se tienen identificadas para este tipo de sistemas son:

- Riesgo relativamente alto para causar efectos de interferencia.
- Energía externa debe ser suministrado.
- Alto riesgo de daños sobreprotección.
- Riesgo de conexiones incorrectas por polaridad.
- Más complejo pero menos volumen que los sistemas de ánodos galvanicos en ciertas aplicaciones.

La fuente externa de energía es usualmente derivada de un rectificador, el cual a la fuente de corriente alterna la transforma y rectifica para obtener corriente continua de salida. Su polaridad negativa es derivada hacia la estructura mientras que la positiva es conectada a los ánodos.

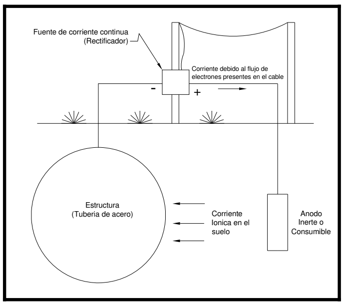

Figura 1. Esquema de protección catódica por corrientes impresas.

Ánodos Profundos: uno de los diversos métodos de protección catódica por corrientes impresas, la instalación consiste en la disposición de ánodos de manera vertical a profundidades de 40 metros o más con respecto al nivel del suelo. Entre sus ventajas se pueden mencionar la buena distribución de la corriente de protección que se desarrolla gracias a que la corriente de protección tiene su descarga a una profundidad adecuada con respecto a la superficie a proteger. En áreas congestionadas con estructuras de toda índole, este tipo de sistemas tiene la fortaleza que para su instalación no se necesita de espacio físico considerable en relación a los otros tipos de sistemas de protección ya sean galvanicos o por corrientes impresas. Otra de las ventajas es que gracias a que la zona de descarga de corriente de protección se encuentra a una profundidad considerable, la instalación de un sistema de ánodos profundos se puede realizar a una distancia remota con referencia a la estructura a proteger.

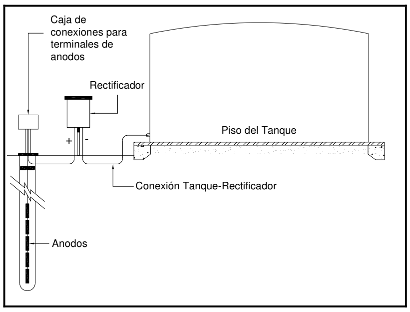

Figura 2. Esquema de instalación de ánodos profundos.

Para este tipo de aplicación se utilizan ánodos tipo MMO (mezcla de óxidos metálicos), las barras de titanio o niobio son recubiertos por óxidos metálicos mediante procesos térmicos.

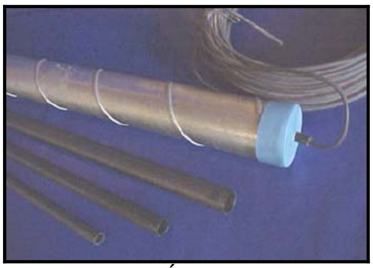

Figura 3. Ánodos MMO.

2.2. Diseño del sistema de protección catódica por ánodos profundos.

El sistema a diseñar será capaz de suministrar corriente de protección a un grupo de tanques, para esto se determina el área total a proteger, en la siguiente tabla se transcribe el área en mención.

Tabla 1. Área total a proteger.

# TANQUE	DIAMETRO (metros)	ÁREA (metros cuadrados)
39	52,12	2133,60
40	51,82	2108,71
41	36,58	1050,71
42	36,58	1050,71
CEPE-1	51,82	2108,71
SUMATORIA (metros cuadrados)		8452,44

Otro de los parámetros a considerar es la **densidad de corriente** a aplicar, por recomendaciones basadas en la experiencia, para este tipo de aplicaciones es 10 10x10-3 A/m^2. Una vez establecida la densidad de corriente, procedemos a calcular la corriente de protección a aplicar a los fondos de tanques mediante la siguiente ecuación.

$$I_{requerida} = A_{Total} x D_{corriente} x(1-e)$$

Donde:

- $I_{requerida}$: Corriente de protección para los tanques (A).
- A_{Total}: Área total de los fondos de los tanques (m2).
- $D_{corriente}$: Densidad de corriente (A/m2).
- e: Eficiencia del recubrimiento (valor entre 0 y 1).

$$I_{requerida} = 8452{,}44 m^2 x 10 x 10^{-3} \frac{A}{m^2} x(1-0)$$

$$I_{requerida} = 84{,}52 A$$

Como buena practica de ingeniería un factor de seguridad (1,2) es tomado en cuenta para determinar la corriente de protección final que debe desarrollar el sistema.

$$I_{requerida} = 84{,}52 A x 1{,}2$$

$$I_{requerida} = 101{,}42 A$$

Una vez conocido el tipo de ánodo a emplear se procede a realizar el cálculo de la cantidad de ánodos a emplear. Para esto utilizaremos la capacidad del ánodo para drenar corriente desde su superficie, como se muestra en la tabla 2 es de 5 Amperios por ánodo.

Tabla 2. Características de los ánodos a emplear.

CerAnode Tipo 5C		
Característica	**Valor**	**Unidad**
Longitud	1.50	m
Diametro	0.025	m
Peso	0.35	Kg
Amperios/Tubo	5	A
Tiempo Diseño	20	años

El **número de ánodos** se determina de la siguiente ecuación.

$$N_{anodos} = \frac{I_{requerida}}{I_{drene} / anodo}$$

$$N_{anodos} = \frac{101{,}42 A}{5 A / anodo} = 20{,}2 anodos$$

El número de ánodos seleccionados es de 21, esto por la decisión de ejecutar 3 lechos anódicos para obtener una mejor distribución de corriente a través de los fondos de los 5 tanques considerados. Es decir cada lecho anódico desarrollara una corriente parcial de protección igual a:

$$I_{Sistema} = \frac{I_{requerida}}{N_{lechos}} = \frac{101{,}42 A}{3} = 33{,}81 A$$

Esto es considerado con el fin de determinar la altura de backfill (relleno) de carbón-coque donde irán alojados los 7 ánodos de cada lecho, este relleno ofrecer como máximo una densidad de descarga ($D_{Backfill}$) de 1,6 A/m^2. **La superficie externa de la columna de backfill** (A_{SB}) esta dada por:

$$A_{SB} = \frac{I_{Sistema}}{D_{Backfill}} = \frac{33{,}81A}{1{,}6\frac{A}{m^2}} = 21{,}31m^2$$

Para nuestro diseño utilizaremos una perforación final diámetro (d) igual a 25 cm. La **longitud de la columna** (L_{CA}) de carbón esta dada por:

$$L_{CA} = \frac{A_{SB}}{\pi \times d} = \frac{21{,}31m^2}{\pi x 0{,}25m} = 24{,}64m$$

La **resistencia eléctrica (R_{Total})** a la cual se someterá el sistema se determina en base a la sumatoria de resistencias que ofrece la cama anódica con referencia a la estructura (R_A), la resistencia ofrecida por el cable conductor (R_W) y la resistencia asumida por conexiones y empalmes.

$$R_{Total} = R_A + R_W + R_D$$

Para R_A, utilizaremos la ecuación de Dwight para ánodos verticales con un valor de resistividad del suelo (ρ) de 2500 Ω.cm.

$$R_A = \frac{0{,}005\rho}{\pi L_{CA}}\left(\ln\left(\frac{8L_{CA}}{d}\right) - 1\right)$$

$$R_A = \frac{0{,}005x2500}{\pi x 24{,}64}\left(\ln\left(\frac{8x24{,}64}{0{,}25}\right) - 1\right) = 0{,}92\Omega$$

El valor de R_W se define como la sumatoria de las resistencias de 7 cables conectados en paralelo que corresponden a cada ánodo instalado en un lecho (R_1), la resistencia entre el rectificador y el lecho de ánodos profundos (R_2) y la resistencia que ofrece el cable conectado entre la estructura y el rectificador (R_3).

$$R_W = R_1 + R_2 + R_3$$

Para R_1:

$$R_1 = \frac{RL}{7}$$

Donde R es la resistencia del cable #8 AWG propio de cada ánodo, L el valor promedio de longitud del cable en mención (valor asumido 40m).

$$R_1 = \frac{(2{,}09x10^{-3}\Omega/m)(40m)}{7} = 0{,}012\Omega$$

Para R_2:

$$R_2 = RL_{AR}$$

Donde L_{AR} es la longitud correspondiente del lecho anódico al rectificador (100 metros) y R la resistencia del cable que para este tipo de conexión se recomienda utilizar cable 1/0 con una resistencia de 3,34 x 10^{-4}Ω/m.

$$R_2 = (3{,}43x10^{-4}\Omega/m)(100m) = 0{,}0334\Omega$$

Para R_3:

$$R_3 = RL_{ER}$$

Donde L_{ER} es la longitud correspondiente del cable desde el rectificador a la estructura (100 metros). Para este tipo de conexión (cable negativo) es recomendable utilizar cable 1/0.

$$R_3 = (3{,}43x10^{-4}\Omega/m)(100m) = 0{,}0334\Omega$$

La resistencia total tiene un valor de:

$$R_{Total} = R_A + (R_1 + R_2 + R_3) + R_D$$

$$R_{Total} = 1{,}28\Omega$$

Selección del rectificador: Antes de decidir las características del rectificador acorde a nuestra necesidad, se determinará la capacidad del mismo. Para tal efecto se calculará el voltaje necesario de la unidad mediante la siguiente ecuación:

$$V_{Rectificador} = I_{Sistema} x R_{Total}$$

$$V_{Rectificador} = (33{,}81A)x(1{,}28\Omega) = 43{,}28V$$

Un rectificador estándar con una salida de 120 Amperios y 48 Voltios de capacidad es lo adecuado para la puesta en marcha de nuestro diseño. La siguiente tabla muestra las características del rectificador seleccionado.

Tabla 3. Características del rectificador seleccionado.

DESCRIPCION	
VOLTAJE DE ENTRADA	240 VAC
FRECUENCIA	60 Hz
SALIDA (DC)	48 VCD / 120 Amperios
FASES	MONOFASICO
ENFRIADO POR	ACEITE
MATERIAL CARCAZA	ACERO GALVANIZADO

2.3. Análisis de factibilidad técnico-económica para su ejecución.

Al realizar un análisis técnico-económico expondremos los factores mas relevantes para la instalación de un sistema de protección catódica sea este por el método de ánodos superficiales o ánodos profundos. Lo que se plantea a continuación es determinar de una matriz de ponderación el grado de importancia de cada uno de estos factores frente a otro, luego con una matriz de decisión clasificar el orden de que factor es primordial en la selección final del sistema a instalar. Los factores a tomar en cuenta son:

- Facilidad de Instalación del Sistema.
- Espacio Físico Disponible para la Instalación del Sistema.
- Interferencia eléctrica.
- Costo Inicial de la Obra.

Para plantear nuestra matriz de ponderación lo primero que se debe establecer es un marco comparativo entre factores, calificándolas a través del nivel de importancia con valores numéricos. En la Tabla 4 se muestra los niveles con su respectiva calificación (columna i hacia fila j), mientras que en a Tabla 5 se denota la calificación en orden inverso (fila j hacia la columna i).

Tabla 4. Nivel de importancia y valores numéricos designados (a_{ij}).

aij=1	se considera igualmente importante i que j
aij=3	se considera ligeramente mas importante i que j
aij=5	se considera notablemente mas importante i que j
aij=7	se considera mucho mas importante i que j
aij=9	se considera absolutamente mas importante i que j

Tabla 5. Nivel de importancia y valores numéricos designados (a_{ji}).

aji=1	se considera igualmente importante j que i
aji=0,333	se considera ligeramente mas importante j que i
aji=0,200	se considera notablemente mas importante j que i
aji=0,143	se considera mucho mas importante j que i
aji=0,111	se considera absolutamente mas importante j que i

Para nuestro proyecto basado en conocimientos previos de trabajos de esta índole y experiencias de profesionales en el ramo de la protección catódica se procedió a obtener los siguientes resultados con la siguiente matriz de ponderación establecida en la Tabla 6.

Tabla 6. Matriz de ponderación.

		i			
		Facil Instalacion	Espacio Fisico Disponible para Instalacion	Interferencia electrica causada por los Sistemas Anodicos	Costo Inicial de la Obra
j	Facil Instalacion	1,00	1,00	5,00	0,33
j	Espacio Fisico Disponible para Instalacion	1,00	1,00	5,00	1,00
j	Interferencia electrica causada por los Sistemas Anodicos	0,20	0,20	1,00	3,00
j	Costo Inicial de la Obra	3,03	1,00	0,33	1,00
j	Sumatoria de las columnas i	5,23	3,20	11,33	5,33

La sumatoria obtenida por cada una de las columnas i de la matriz de ponderación servirá como numerador para la división entre cada uno de los componentes de la matriz y de esta manera establecer la matriz de decisión.

Tabla 6. Matriz de ponderación.

	Facil Instalacion	Espacio Fisico Disponible para Instalacion	Interferencia electrica causada por los Sistemas Anodicos	Costo Inicial de la Obra	Prioridad
Facil Instalacion	0,19	0,31	0,44	0,06	1,01
Espacio Fisico Disponible para Instalacion	0,19	0,31	0,44	0,19	1,13
Interferencia electrica causada por los Sistemas Anodicos	0,04	0,06	0,09	0,56	0,75
Costo Inicial de la Obra	0,58	0,31	0,03	0,19	1,11

La columna llamada prioridad en la matriz de decisión establece el orden el cual los factores según nuestra calificación debe ser tomada en cuenta, es decir, la matriz informa que el espacio disponible y el costo inicial de la obra tienen un grado alto y de vital importancia para la selección final del sistema a proteger. Hay que resaltar que la instalación relativamente fácil (tradicional) y la interferencia eléctrica son dos factores a los cuales hay que tomar muy en cuenta ya que no se alejan de los dos principales con un alto rango.

2.4. Conclusiones y Recomendaciones.

Se concluye lo siguiente:

- El sistema de ánodos profundos resultó el método más viable de implementar; acorde al análisis realizado en función del espacio físico existente en el bosque de tanques.
- Existe un incremento del 11,56% del costo con referencia al costo por ánodos superficiales, esto se compensará una vez ejecutado su reemplazo al cabo de su vida útil.
- El sistema de ánodos profundos es ideal para una tasa de interferencia nula comparada con el sistema de ánodos superficiales.
- El sistema planteado para una vida útil de 20 años con los materiales y características establecidas.

Se recomienda:

- Para el sistema propuesto de ánodos profundos es primordial realizar una perforación piloto para la obtención de un registro más detallado y efectivo de las resistividades a diversas profundidades y textura del suelo
- Se deben realizar pruebas de vacío una vez terminada la instalación del rectificador, que básicamente consiste en probar cada una de las escalas de voltajes señalados en los taps del equipo sin carga eléctrica y así conocer cada uno de los rangos de salida en DC del rectificador.
- Es obligación del personal técnico cumplir con los parámetros de inspección y mantenimiento dadas por las normas: NACE RP-0193-01(External Cathodic Protection of On Grade Metallic Storage Tank Bottoms) y NACE RP-0572-95(Design, Installation, Operation and Maintenance of Impressed Current Deep Groundbeds).
- Una vez puesto en marcha el sistema se deberá llevar un registro de los potenciales de protección para los tanques, el criterio utilizado para esto es la obtención de una lectura de potencial mínimo de protección de -0.850 voltios de D.C, medido con respecto a un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre ($Cu/CuSO_4$) en contacto con el electrolito.
- Es recomendable realizar ensayos ON/OFF, que consiste en medir el potencial adquirido por el fondo del tanque cuando el rectificador se encuentra encendido y luego apagado con referencia al electrodo de .cobre/sulfato de cobre ($Cu/CuSO_4$). Esta prueba demuestra el grado de polarización que tiene el fondo del tanque.

Referencias

1. Corrosion of Pipeline Corrosion, Peabody A. W., Second Edition.
2. Cathodic Protection Tester Course Manual Level 1, NACE.
3. Cathodic Protection Tester Course Manual Level 2, NACE.
4. Cathodic Protection Tester Course Manual Level 3, NACE.
5. Corrosion Handbook, Uhlig H., Second Edition.
6. ASM Metals Handbook, Volumen 13: Corrosion, 9th Edition.
7. Curso de Corrosion Basica, NACE Internacional, Octubre 2005.
8. Handbook of Cathodic Corrosion Protection, Baeckmann W., Schwenk W., Prinz W., Third Edition.
9. Handbook of Corrosion Engineering, Pierre R., Second Edition.
10. NACE Corrosion Engineering's Reference Book, Third Edition.

Ing. Julián Peña Estrella.
Director de Tesis

Sr. Willian Luis Suque Cercado.
Tesista-FIMCP