

Diseño de un sistema de protección catódica para estructuras metálicas enterradas en Refinería La Libertad

Design of a cathodic protection system for buried metal structures at La Libertad Refinery

José Enrique Escobar-Sandoval

jescobar9442@utm.edu.ec

<http://orcid.org/0000-0001-8537-0032>

Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo,
Ecuador

Byron Fernando Chere-Quiñónez

byron.chere@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-1886-6147>

Universidad Técnica Luis Vargas Torres de
Esmeraldas, Ecuador

Alejandro Javier Martínez-Peralta

amartinez8875@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-1176-5001>

Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo,
Ecuador

Jorge Daniel Mercado-Bautista

jmercado0070@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-6055-1670>

Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo,
Ecuador

Mayer Santiago Quiñónez-Alava

mayer.quinonezalava@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0001-2262-133X>

Universidad Técnica Luis Vargas Torres de
Esmeraldas, Ecuador

RESUMEN

El objetivo de este artículo es establecer que método de sistema de protección catódica (SPC), es idóneo para la protección de estructuras metálicas enterradas en el suelo, y determinar un diseño por el método SPC por corriente impresa de lechos ánodos verticales, bajo las especificaciones de ingeniería, de criterios de diseños para sistemas protección catódica como lo indica la norma PDVSA-HA 201, obtiene las características técnicas necesarias de los equipos y materiales que forman parte del sistema a implementar. En el desarrollo del proyecto mencionaremos los métodos de sistemas de protección catódica como alternativas de protección de las estructuras metálicas frente a la corrosión y el funcionamiento de cada equipo y material, que forman parte del proyecto, y determinar los planos de construcción del proyecto técnico. La investigación utilizada en este proyecto técnico se basa en determinar una corriente necesaria para el sistema de protección catódica por corriente impresa, que se debe suministrar a los lechos de ánodos verticales para el resguardo integral de las estructuras metálicas enterradas en el suelo, permitiendo un incremento en la vida útil de la estructura, teniendo como datos las propiedades eléctricas y naturales de las estructuras metálicas y del suelo, luego se realizó el presupuesto para la implementación del sistema de protección catódica por corriente impresa, conociendo los costos de los elementos del proyecto para la ejecución del sistema que incluye los trabajos civiles, mecánicos y eléctricos. Se concluye que el SPC por corriente impresa es la técnica más eficiente para proteger las estructuras metálicas enterradas, previstas con el proyecto, conforme al cálculo realizado en el área real de las estructuras.

Palabras claves: Sistema de Protección Catódica (SPC), Estructuras Metálicas, Corriente Impresa.

ABSTRACT

The objective of this article is to establish which cathodic protection system (SPC) method is suitable for the protection of metallic structures buried in the ground, and to determine a design by the SPC method by impressed current of vertical anode beds, under the specifications engineering, from design criteria for cathodic protection systems as indicated by the PDVSA-HA 201 standard, obtains the necessary technical characteristics of the equipment and materials that are part of the system to be implemented. In the development of the project we will mention the methods of cathodic protection systems as alternatives for the protection of metal structures against corrosion and the operation of each equipment and material, which are part of the project, and determine the construction plans of the technical project. The research used in this technical project is based on determining a necessary current for the cathodic protection system by impressed current, which must be supplied to the vertical anode beds for the integral protection of the metallic structures buried in the ground, allowing an increase in the useful life of the structure, taking as data the electrical and natural properties of the metal structures and the soil, then the budget for the implementation of the impressed current cathodic protection system was made, knowing the costs of the project elements to the execution of the system that includes civil, mechanical and electrical works. It is concluded that the SPC by impressed current is the most efficient technique to protect the buried metallic structures, foreseen with the project, according to the calculation made in the real area of the structures.

Keywords: SPC Cathodic Protection System), Metallic Structures, Printed.

INTRODUCCIÓN

Con el desarrollo industrial que atraviesa el país, con el cambio de la matriz energética con implementación de nuevos proyectos especialmente en la industria petrolera, las cuales se han visto en necesidad de aumentar sus niveles de producción. Esto ha generado la construcción e instalación de diferentes tipos de almacenamiento y líneas de transporte de derivados de crudo de petróleo, siendo necesario que se instale algún sistema, de protección, para evitar su exposición a sufrir daños como consecuencia del fenómeno de la corrosión.

Esto ha generado el desarrollo de nuevas tecnologías que van desde la utilización de algunos revestimientos para evitar el contacto entre el suelo y las estructuras metálicas enterradas, hasta la instalación de sistema de protección catódica, contra la corrosión.

Sin embargo la utilización de solo revestimientos, como método de protección, por mejor y bien aplicado que estén, siempre contiene posible poros y fallas que lo vuelven deficiente con el pasar del tiempo, Es por esta razón que los esfuerzos para controlar este fenómeno de la corrosión, se han concentrado en la segunda técnica mencionada anteriormente, la protección catódica y el revestimiento se convierte en aliados transcendental que ofrece la integridad de la superficie metálica, y por lo tanto, sea inmune a la corrosión causada por el contacto con el medio en el cual se encuentre.

En función a la relevancia que tiene la consideración de la protección catódica en el diseño de las estructuras metálicas enterradas en la industria petrolera y la importancia de comprender todas las variables involucradas en el proceso

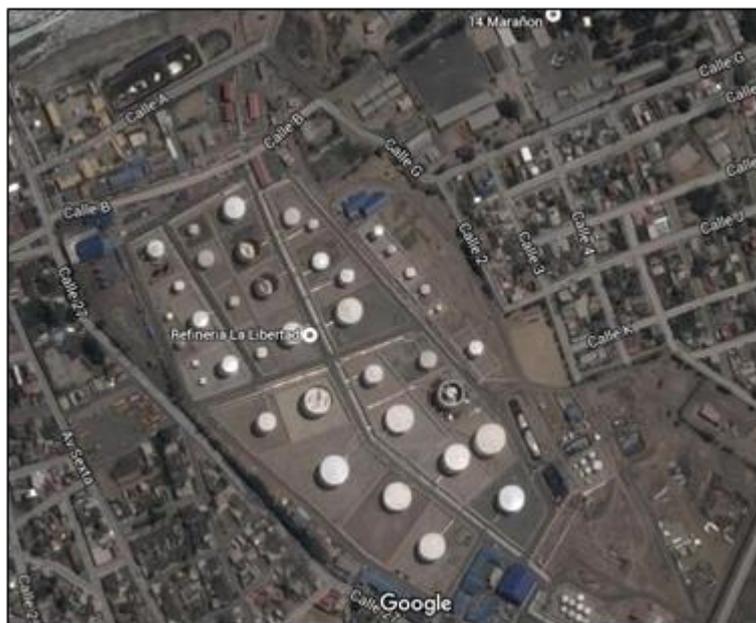
de corrosión, especialmente aquellas instalaciones del estado, con la seguridad operacional y la ausencia de costo por reposición de las partes afectadas, es que la presente investigación propone la aplicación del sistema de protección catódica a todas las estructuras metálicas enterradas.

Ubicación Geográfica de la Refinería La Libertad

La Refinería Estatal La Libertad se encuentra ubicada geográficamente en la Provincia de Santa Elena Cantón La Libertad.

La Refinería la Libertad está diseñada para procesar 45.000 BPDO de petróleo crudo extraído del Oriente Ecuatoriano y produce los siguientes derivados: LPG, Gasolina, Diesel No 1, Diesel No 2, Jet Fuel, JPI, Fuel Oil No 6, Solvente No 1, Solvente No 2, Spray Oil y Mineral Turpentine. La Refinería la libertad con 60 años de operación, es el centro más antiguo del Ecuador y el segundo por su capacidad de producción.

Figura 1. Ubicación Geográfica de la Refinería La Libertad.



Específicamente el área de intervención es donde están ubicadas las estructuras metálicas o tanques de Spray Oil TQ-7, Etanol T-ET-01 y T-ET-, situados dentro de la Refinería La Libertad.

Aspectos conceptuales

Cátodo

Electrodo de una celda electrolítica en el que se produce la reacción de reducción y prácticamente no sufre corrosión (PDVSA, 2005).

Ánodo

Electrodo de una celda electrolítica en el que se produce la oxidación o corrosión (PDVSA, 2005).

Ánodo de Sacrificio / Ánodo de Corriente Impresa

Ánodo de Sacrificio.- Metal que, debido a su ubicación relativa en la serie electroquímica, suministra corriente directa de protección a metales que son más nobles en dicha serie, cuando ambos están acoplados en el electrólito y eléctricamente. Estos ánodos constituyen la fuente de corriente en la protección catódica por ánodos galvánicos o de sacrificio (PDVSA, 2005)

Ánodo de Corriente Impresa.- Los ánodos utilizados en el método de corriente impresa deben ser de materiales como el grafito, el hierro fundido con alto contenido de silicio, metales platinizados, la magnetita y mezcla de óxidos metálicos, entre otros. Estos ánodos se instalan desnudos con material de relleno especial (como el grafito pulverizado, con alto contenido de carbón) (PDVSA, 2005).

Corriente Impresa

Corriente directa suministrada por una fuente de poder externa al componente anódico. Entre las fuentes de poder típicas, tenemos: rectificadores, módulos solares, generadores de motores eléctricos, baterías y molinos de viento (energía eólica) (PDVSA, 2005).

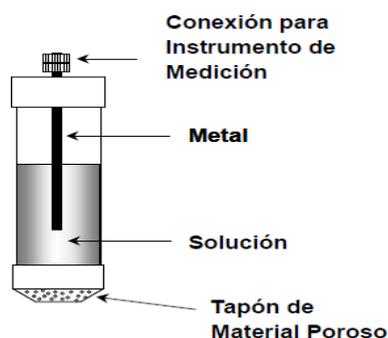
Densidad de Corriente

Corriente directa que circula hacia o desde la superficie de un electrodo por unidad de área, generalmente expresada como A/m^2 o mA/m^2 . La densidad de corriente óptima para obtener protección catódica, varía dependiendo del ambiente y de la estructura a ser protegida (PDVSA, 2005).

Electrodo de Referencia

Media celda reversible con potencial de circuito abierto constante bajo condiciones similares de medida que se puede utilizar en forma permanente o portátil. Se utiliza para medir potenciales metal/electrolito, siendo los más comunes los electrodos de cobre/sulfato de cobre, plata/cloruro de plata y cinc (PDVSA, 2005).

Figura 2. Celda de Referencia



Interconexión

Conductor eléctrico, usualmente de cobre, utilizado para interconectar estructuras diferentes, a fin de evitar cambios apreciables en el potencial de un punto con respecto al otro o nivelarlos (PDVSA, 2005).

Interferencia

Efecto adverso causado sobre estructuras no conectadas a los sistemas de protección catódica por corriente impresa, generando corrosión acelerada de las mismas (PDVSA, 2005).

Lecho de Ánodo Profundo

Grupo de ánodos instalados en un hoyo vertical, cuya profundidad es mayor a 20 m. Los objetivos que se persiguen con este tipo de lecho son obtener baja resistencia en el sistema, distribuir uniformemente la corriente y minimizar la interferencia eléctrica anódica (PDVSA, 2005).

Lecho de Ánodo Superficial

Grupo de ánodos instalados en un hoyo horizontal, vertical o direccional, cuya profundidad es menor a 20 m (PDVSA, 2005).

Sobre Protección

Término utilizado cuando el potencial de protección causa pérdidas de energía, desgaste prematuro de los ánodos, desprendimiento del revestimiento y en algunos casos la fragilidad de la estructura por penetración de hidrógeno (PDVSA, 2005).

Potencial OFF (Potencial Polarizado)

Suma del potencial de corrosión y la polarización catódica medido inmediatamente después de haber interrumpido el flujo de corriente (descartando la caída IR) (PDVSA, 2005).

Potencial ON

Potencial medido con la corriente de protección aplicada. Representa la suma de todas las caídas de potencial del circuito de medición (PDVSA, 2005).

Caída IR

Voltaje a través de una resistencia de acuerdo con la Ley de Ohm, (PDVSA, 2005).

Principio Teórico de la Corrosión

Corrosión

La corrosión se define como el deterioro de los metales por reacciones químicas y electroquímicas entre el metal y su medio ambiente, cuyo resultado es la pérdida de metal, El control de la reacción de corrosión se basa en la práctica de actuar sobre el propio medio ambiente o sobre el metal. El control sobre el medio ambiente significa controlar su composición, reducir la humedad en la atmosfera, desairar los electrolitos, cambiar la acidez o alcalinidad a valores más moderados, eliminar las bacterias, reducir las temperaturas o añadir sustancias químicas específicas para inhibir la acción de corrosión. Estos son los medios más importantes empleados en la lucha contra la corrosión (Ortiz, 2013).

La característica fundamental de este fenómeno, es que solo ocurre en presencia de un electrolito, ocasionando regiones plenamente identificadas, llamadas estas ANODICAS y CATODICAS: una reacción de oxidación es una reacción anódica, en la cual los electrones son liberados dirigiéndose a otras regiones catódicas (Ortiz, 2013).

En la región anódica se producirá la disolución del metal (corrosión) y, consecuentemente en la región catódica la inmunidad del metal (Ortiz, 2013).

Este mecanismo, que es analizado desde un punto de vista electroquímico, indica que el metal tiende a retornar al estado primitivo o de mínima energía, siendo la corrosión por lo tanto la causante de grandes perjuicios económicos de instalaciones enterradas. Por esta razón, es necesaria la oportuna utilización de la técnica de protección catódica (Ortiz, 2013).

Corrosión Galvánica

Se produce este tipo de corrosión cuando dos metales de diferente potencial electroquímico están unidos eléctricamente en un medio húmedo, en la cual el metal menos noble actúa de ánodo y el más resistente de cátodo (Ortiz, 2013).

Severidad de la Corrosión

La severidad de la corrosión depende de muchos factores que intervienen en afectar la rapidez o aceleración de la corrosión (Ortiz, 2013).

Las más importantes son los siguientes:

- Tamaño del área catódica y anódica
- Oposición del circuito metálico.
- Enfoque de los metales en la cadena galvánica.
- Prototipo y estructura del electrolito
- Situaciones de la despolarización

Protección Contra la Corrosión

Son medidas utilizadas en las industrias para combatir el fenómeno de la corrosión en las cuales se incluyen las aplicadas, donde aremos énfasis en una de ellas, que es la protección catódica, (Ortiz, 2013).

Protección catódica.

Recubrimiento ligero en las estructuras metálicas.

Uso de material de gran pureza como el acero inoxidable.

Principios y Requerimientos de Protección catódica

Protección Catódica

La protección catódica, es una técnica de control de corrosión, la cual tiene como fundamento la polarización, a potenciales más negativos, de cualquier superficie metálica hasta alcanzar un grado de polarización, en el cual se acepta que dicha superficie metálica es inmune a la corrosión. Esta polarización se alcanza mediante el empleo de una fuente energía eléctrica externa (PDVSA, 2005).

Existen dos métodos diferentes para lograr la protección catódica:

Conectando la superficie metálica que se desea proteger a un metal menos noble que ésta, es decir, más negativo en la serie electroquímica, este procedimiento es conocido como protección catódica por ánodos galvánicos, (PDVSA, 2005).

Sistema de protección catódica por corriente impresa, el cual consiste en conectar un conjunto de ánodos a la superficie metálica por medio de una fuente de energía externa, (PDVSA, 2005).

Requerimientos

Los controles de corrosión externa deben ser considerados durante el diseño del sistema (estructura) y las primeras defensas contra la corrosión externa deben ser los revestimientos y la selección de materiales. Los revestimientos perfectos no son posibles por lo cual la protección catódica debe combinarse con éstos (PDVSA, 2005).

El sistema de protección catódica seleccionado deberá ser diseñado, de forma tal, que se evite cualquier efecto corrosivo adverso en estructuras cercanas (equipos, tuberías, cables, etc.) (PDVSA, 2005).

Los planos de ingeniería deberán definir claramente la ubicación del equipo de protección catódica incorporado en la tubería, así como la ubicación de otras instalaciones o estructuras, bien sean a la vista o enterradas, que pudiesen afectar o ser afectadas por el sistema de protección catódica. El diseño del sistema se hará para el tiempo de vida útil de la instalación (PDVSA, 2005).

El sistema de protección catódica seleccionado deberá ser diseñado, de forma tal, que se evite cualquier efecto corrosivo adverso en estructuras cercanas (equipos, tuberías, cables, etc.) (PDVSA, 2005).

Criterios de Protección Catódica

Las estructuras metálicas enterradas se deben resguardar del fenómeno de la corrosión, el cual se puede controlar con los criterios de requerimientos mínimos que nos indica la norma PDVSA HA-201 (CRITERIOS DE DISEÑO PARA SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA) (PDVSA, 2005).

- Criterio del Potencial Mínimo: El valor mínimo de polarización catódica para controlar la corrosión es de -850 mV. Este valor es medido respecto al electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre en contacto con el electrolito, con la protección catódica aplicada Potencial ON) (PDVSA, 2005).
- Criterio -850 mV Polarizado (Potencial OFF): cuando existe un potencial polarizado negativo de al menos 850 mV con respecto al electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre en contacto con el electrolito (PDVSA, 2005).
- Criterio del Cambio de Potencial: La diferencia de los potenciales de referencia medidos en OFF y Natural de la estructura debe ser como mínimo de -100 mV (PDVSA, 2005).
- Criterio -850 mV Polarizado (Potencial OFF): cuando existe un potencial polarizado negativo de al menos 850 mV con respecto al electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre en contacto con el electrolito (PDVSA, 2005).

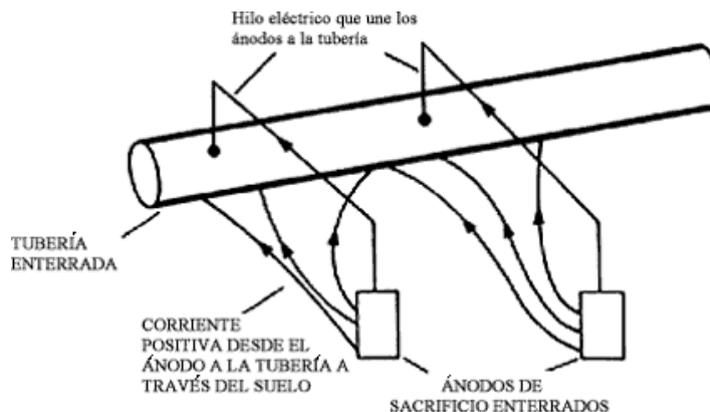
Métodos, Equipos y Materiales de SPC

Existen dos métodos de protección catódica, por ánodos galvánicos y por corrientes impresas. Por los dos métodos el principio es el mismo que consiste en direccionar una corriente continua a través del electrolito hacia las estructuras metálicas enterradas.

Método de SPC por Ánodos Galvánicos o de Sacrificio

En el caso de SPC por ánodos galvánicos, o ánodos de sacrificio, la energía se genera debido a la diferencia de potencial entre el par galvánico.

Figura 3. Sistema de Protección Catódica por Ánodo de Sacrificio.



Material de los Ánodos Galvánicos

Los metales que tienen un potencial más negativo y que se utilizan para fabricar principalmente los ánodos galvánicos, son el magnesio, zinc y aluminio para la protección de estructuras metálicas enterradas. La principal característica de los ánodos la describimos en la siguiente tabla 2 (PDVSA, 2005).

Ventajas y Limitaciones de la Protección con Ánodos Galvánicos

La protección con ánodos de sacrificio se utiliza cuando se requiere de una corriente pequeña y la resistividad del medio agresivo es baja y por consiguiente tiene algunas ventajas y limitaciones que las mencionaremos en la siguiente tabla. (Giudice & Pereyra).

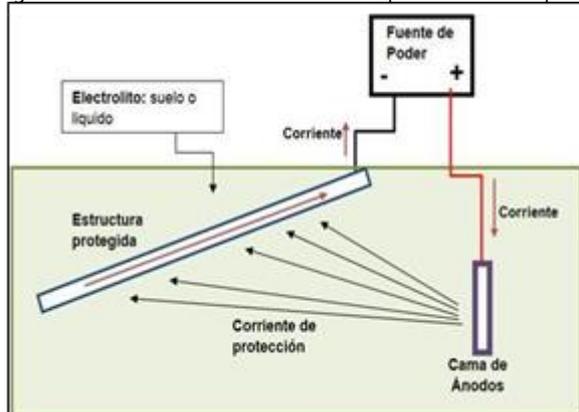
Ventajas	Limitaciones
No necesita fuentes de corriente.	Ineficaz en ambientes de resistividad elevada
No provoca problema de interferencia.	Costo inicial muy alto
Fácil en su instalación.	La corriente que suministra es muy limitada.
Bajo costo de mantenimiento	Alto consumo de ánodos para estructuras metálicas enterradas mal cubiertas y sin revestimiento en agua de mar.
Se pueda incrementar el número ánodos, con el sistema en funcionamiento.	

Método de SPC por Corriente Impresa

En el caso de SPC por corriente impresa, un transformador/rectificador convierte la corriente alterna a corriente continua, la cual es direccionada hacia las estructuras metálicas enterradas que se van a proteger.

Este método de protección catódica involucra a las estructuras metálicas enterradas que se van a proteger, que forman parte del circuito eléctrico, el cual consiste en unir eléctricamente las partes, permitiendo que la estructura sea el polo negativo con una fuente de corriente directa y un lecho de ánodos (PDVSA, 2005).

Figura 4. Sistema de Protección Catódica por Corriente Impresa.



Cálculo de la Protección y Distribución de los Ánodos

Establecida la corriente total de protección, se elige el tipo de ánodo con base en los criterios, teniendo en cuenta la densidad de corriente máxima que puede suministrar cada ánodo, se determina su número por exceso con respecto al teórico, para así poder obtener un mayor grado de confiabilidad del sistema de protección catódica por corriente impresa (Ortiz, 2013).

“En la ubicación de los ánodos o del lecho anódico es muy importante conocer la posición de posibles estructuras que pudieran estar presentes en las vecindades, con la finalidad de evitar fenómenos de interferencia que puedan provocar ataques graves de corrosión” (Ortiz, 2013).

Procedimiento para el Cálculo de Protección Catódica por el Método de Corriente Impresa

El procedimiento del cálculo de protección catódica por el método de corriente impresa, indica que cada lecho de

ánodo se conectará de forma individual a la caja de distribución de los ánodos, por lo consiguiente, con los datos del área que se desea proteger, diámetro y longitud de las estructuras metálicas enterradas, y de la densidad de corriente se puede procesar o hacer los cálculos (Ortiz, 2013).

Ventajas y Limitaciones de la Protección Catódica por Corriente Impresa

Las ventajas y limitaciones que se presentan en el método de protección catódica por corriente impresa las mencionaremos en la siguiente tabla. Esencialmente, se puede decir que este método es más conveniente que el de los ánodos de sacrificio, cuando se tratan de proteger estructuras metálicas enterradas muy grandes o con una demanda de corriente muy alta y cuando la resistividad del ambiente es elevada, como en el caso de los suelos (Giudice & Pereyra).

Ventaja	Limitación
Es muy eficaz para proteger estructuras metálicas enterradas no cubierta o mal recubierta.	Tiene un costo muy elevado
Puede diseñarse para un amplio intervalo de potencial y de corriente	Conexiones del cable pueden estar expuestas a ruptura
Se utiliza en ambientes de resistividad muy Elevada	Debe tener una fuente de corriente continúa
Con una sola instalación se puede proteger áreas muy grandes	Requiere de mantenimiento e inspección periódica
proteger una gran superficie con un solo ánodo	Puede causar problemas de interferencia
Es un sistema que presenta una gran flexibilidad operacional	Está sujeto a ruptura de fuentes de corriente

Equipos y Materiales

Los SPC por corriente impresa tienen como componentes: un ánodo dispersor, fuente de corriente continua, cajas de distribución y cable anódico para la conexión de los elementos entre sí. Por lo consiguiente la protección catódica se utiliza cuando se requiere suficiente cantidad de corriente para la protección de las estructuras metálicas enterradas (PATIÑO, 1990).

Los equipos y materiales cumplirán con los criterios de diseño y condiciones que nos indican la norma PDVSA-HA 201, para que cumplan un apropiado y determinado funcionamiento en su instalación. A continuación, describimos los equipos y materiales del SPC por corriente impresa:

Fuentes de Corriente para Protección Catódica

Las fuentes de corriente en los sistemas de protección catódica deben ser siempre continuas, a las condiciones que se mantengan con el paso del tiempo. Las fuentes de corriente de los sistemas de protección catódica contienen: rectificadores/transformadores AC/DC, generadores termoeléctricos, motores generadores, generadores de viento y generadores solares, de los cuales, el más utilizado son los rectificadores/transformadores (PDVSA, 2005).

Transformadores/Rectificadores

Los rectificadores de corriente son dispositivos que transforman o permiten el paso la corriente alterna en un solo sentido (directa), este procedimiento permite que el voltaje de salida se pueda regular según la necesidad para la protección de las estructuras metálicas enterradas contra el fenómeno de la corrosión (Ortiz, 2013).

Figura 5. Transformador/Rectificador.



Material de los Ánodos de Corriente Impresa

Para los SPC por corriente impresa se utilizan ánodos inertes pasivos que están formados por los siguientes

materiales: grafito, hierro/silicio/cromo, chatarra, titanio, MMO (Óxidos de Metal Mezclado), etc., cuyas propiedades se describen en la siguiente tabla 1 (PDVSA, 2005).

Tabla 1. Propiedades de los Materiales de Ánodos de Corriente Impresa

Ánodos de corriente impresa						
Propiedad	Fe – Si - Cr	Grafito	Chatarra de acero	MMO	Niobio platinizado	Lida
Consumo aproximado (kg/A. año)						
Agua de mar	1,0	N	9,1		8,63*10 ⁻⁶	0,0005
Suelo	1,0	0,20	9,1	1*10 ⁻⁶	1*10 ⁻⁶	0,0071
Fondo de lago	1,3	N	9,1			
Densidad de corriente máxima recomendada(mA/cm²)						
Agua de mar	0,5	N	L		40	60
Suelo	1,0	0,15	0,5		0,15	10
Agua dulce	0,5	N	L		40	11
Voltaje máximo permitido (voltios)						
Agua de mar	N/L	N	L		60	N/L
Suelo	N/L	N/L	L		N/L	N/L
Agua dulce	N/L	L	L		N/L	N/L
Factor de utilización recomendado (Fu)						
	0.85	0.85	0,75		0,90	0,90

Fuente de información: Manual de Ingeniería de Diseño de Sistema de Protección Catódica. (Lagoven. Marza, 1997).

Dónde:

N: No recomendado

L: Si está colgado en agua, no hay límite N/L: Sin limite

Ánodo de Hierro silicio. - Es un ánodo altamente costoso y quebradizo, pero es usado a gran escala, para camas dispersoras.

Figura 6. Ánodo de Hierro Silicio.



Ánodo de Grafito.- Tienen una baja tasa de consumo. El grafito es impregnado con cera o resina para reducir las posibilidades que se quiebre mientras se consume. La desventaja es que los ánodos de grafito por ser quebradizos requieren cuidado durante su transporte, almacenamiento e instalación.

Figura 7. Ánodo de Grafito.



Ánodo de Titanio platinizados o niobio platinizados.- Este ánodo ha sido utilizado en gran escala para agua de mar. No es conveniente para suelo o barro. El niobio y el titanio desarrollan una capa de óxido adherente en sus superficies, de alta resistencia eléctrica.

Figura 8. Ánodo de Titanio Platinizados o Niobio Platinizados.



Ánodo de Óxidos de Metal Mezclados (MMO).- El material fue desarrollado con la tecnología de electrodos, en 1960. Las capas de mezcla de óxido de metal son térmicamente aplicadas a metales preciosos como el titanio o el niobio.

Figura 9. Ánodo de Óxidos de Metal Mezclados (MMO).



Relleno de Coque

El relleno de coque utilizado para la construcción del lecho de ánodos deberá tener una resistividad no mayor de 25 ohm-cm a presión atmosférica. Por otro lado, debe poseer una granulometría de 90% finos menores de 1 mm, bajo contenido de S < 2 ppm en peso, para Fe-Si-Cr. Para el MMO, el coque debe ser de muy baja resistividad eléctrica < 2 ohm-cm.

Figura 10. Relleno de Coque.



Caja de Distribución

Las cajas de distribución son las que sirven para transferir corriente a través de cables conectados a los lechos de los ánodos verticales.

Figura 11. Caja de Distribución.



Electrodos de Referencia

Se trata de un electrodo de referencia de Cu/Cu/SO4 con una solución saturada de CuSO4 químicamente pura, para

ser instalado de forma permanente en una toma de potencial, donde se quiera que el electrodo esté muy próximo a las estructuras metálicas enterradas, cuyo potencial se quiere medir o bien para llevar la señal de potencial al transformador/rectificador, bien sea porque este lo necesite por ser de funcionamiento automático o bien porque en él haya un voltímetro para la medida del potencial de protección.

Figura 12. Electrodo de Referencia.



Cable Conductor que Conecta a los Ánodos

Los conductores son de cobre blando con un calibre # 8 AWG, cada conductor cuenta con su aislamiento individual, con una cubierta resistente de tipo HMWPE. Los conductores de los ánodos del lecho vertical se conectan individualmente a la caja de distribución sin ningún tipo de empalme, hay que tener mucho cuidado en su introducción en los lechos de los ánodos para evitar daño o corte en los conductores.

Puntera de Acero

La punta acero está instalada en el extremo de la tubería lisa, para hacer peso y así poder colocar el Coque de petróleo calcinado. Esta es de tubo de acero de 15cm. (6 pulg.) de diámetro, la cual tiene 3 metros de longitud.

Encamisado de Tubo PVC Liso

El encamisado de tubo PVC liso es utilizado para proteger la perforación, consistirá en una tubería rígida de pvc policloruro de vinilo, con un diámetro de 6 pulg. Y una longitud de 6 metros cada tramo con un sistema de unión por medio de espiga y campana con anillo de empaque y también en sistema con campana cementar.

Encamisado de Tubo PVC Ranurada

El encamisado tubos pvc Ranurado es de diámetro de 6 pulg, con una longitud de tramo de 6 m, la terminación para revestir las ranuras tiene que ser cubierta con una membrana metálica sellada para prevenir el fluido de líquido.

Cable Negativo

Estos conductores conectan a las estructuras metálicas enterradas en el área a proteger, con el transformador/rectificador, es de calibre #1/0 AWG con un tipo de aislamiento HMWPE.

Cable Positivo

Estos conductores conectan a la caja de distribución de los lechos de los ánodos verticales con el transformador/rectificador, es de calibre #1/0 AWG con un tipo de aislamiento HMWPE.

Tubería de Ventilación

Es una tubería construida con tubo PCV de diámetro de 6 pulg, con una longitud de 6 m, las ranuras son de 3 pulg, de longitud y un ancho de 0.016 pulg, un alejamiento entre ranuras de 10 pulg, la tubería de ventilación estará alojado en el área de drenaje de corriente del SPC.

Terminación de Instalación del Lecho de Ánodo

La terminación se efectúa con una duración de un día transcurrido para poder rellenar, la superficie del lecho con el suelo natural hasta 8 m, la tubería de manipulación estará protegida con una tapa de diámetro de 6 pulg de tubo PVC. Los conductores de los ánodos de TI-MMO están drenados por las ranuras hasta la parte superior del encamisado de tubo PVC liso, por debajo de la cubierta de tubo PVC. Para después hacer una adecuación que sea firme para la cámara de hormigón, con una tapa hormigón armado. El tubo de PVC para la ventilación de aire esta llevado hasta la caja de conexiones y acabará en forma de U invertida.

Diseño del Sistema de Protección Catódica

Cálculos de Parámetros y Determinación de las Características Técnicas de los Equipos y Materiales del SPC

Mediciones en Campo

Generalmente las mediciones en campo son tomadas en el perímetro, cerca de las estructuras metálicas enterradas, o en diversos puntos entre el centro y el contorno. Estas mediciones deben ser hechas para determinar las debidas investigaciones, técnicas o pruebas en campo donde se desea instalar el SPC, como así también el estado y comportamiento de las estructuras metálicas enterradas con el medio donde se han determinado instalar (Suque, 2008).

Medición del pH del Suelo

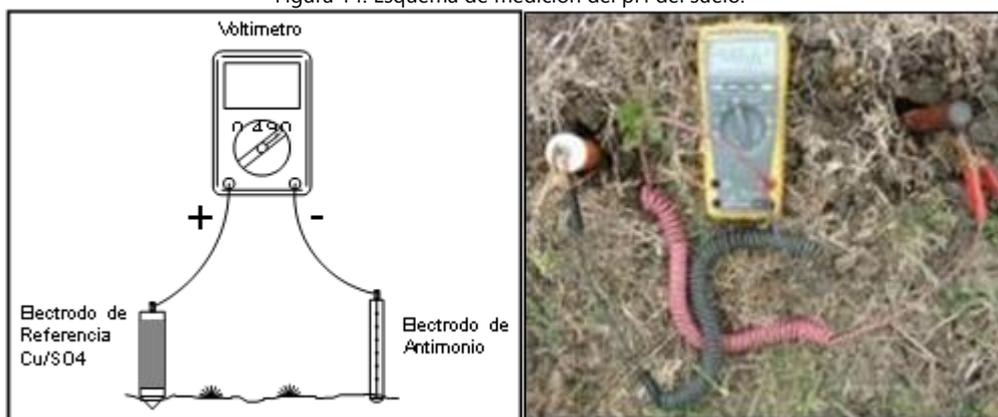
Es importante conocer el pH, ya que es una medida que nos indica el grado de acidez o alcalinidad básico del suelo, esta medición se efectúa con un electrodo de referencia cobre/sulfato de cobre y el voltímetro, y otro electrodo de antimonio. Para tener una lectura directa del pH del suelo o electrolito, con estos dos electrodos tenemos dos escalas de medición, una corresponde a la diferencia de potencial medida entre el electrodo de referencia y el electrodo de antimonio en mV, y la otra escala nos indica el grado de ácido básico del suelo. A continuación, se presenta en la figura 13 el electrodo de antimonio (Suque, 2008).

Figura 13. Electrodo de Antimonio.



A continuación, presentamos como se debe realizar de medición del pH del suelo en el área de las estructuras metálicas enterradas, para complementar el estudio de SPC como mostramos en la figura 2, el positivo del voltímetro lo conectamos en el electrodo de referencia cobre/sulfato de cobre y el negativo lo conectamos el electrodo de antimonio así nos dará el dato que se requiere del pH del suelo, (Suque, 2008).

Figura 14. Esquema de medición del pH del suelo.



En continuación mostraremos las mediciones del pH que se realizaron en el área donde se va a implementar nuestro SPC.

Tabla 2. Mediciones Obtenidas del pH.

Medición en mV	Medición del pH
430	7,01
415	6,8
440	7,12

Resistividad Eléctrica del Suelo

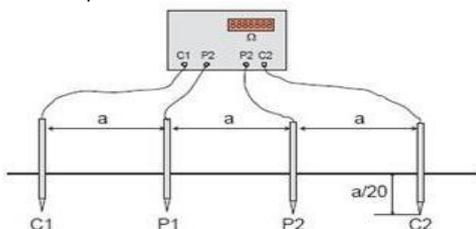
La resistividad del suelo nos indica la tenencia de la corriente a flujo, ya que es un factor preponderante en la selección del SPC a ser instalado, ya que la interpretación del resultado puede llegar a afectar el tipo de sistema y su dimensionamiento, (Suque, 2008).

Este procedimiento que se utiliza para medir la resistividad del suelo es el método de Wenner, más conocido como el de los cuatro pines clavados en el suelo, en línea recta, separados a una misma distancia entre ellos. Esta distancia es igual a la profundidad a la cual se desea conocer la resistividad. La medición de la resistividad se basa en la caída de voltaje entre el par de pines ubicados en la parte central con la corriente que fluye entre los pines de los extremos. En la figura 15, se muestra el medidor de resistividad marca CEM modelo DT- 5300 este equipo es utilizado para esta intención de medir resistividad del suelo, (Suque, 2008)

Figura 15. Medidor de resistividad marca CEM modelo DT-5300.



Figura 16. Esquema de medición de la resistividad del suelo.



En la figura 16, se muestra un esquema para el uso de este mencionado equipo, donde "a" es la distancia entre los pines, mientras que por "C1" y "C2" por donde se inyecta una corriente directa de baja frecuencia, mientras que el potencial que se mide es a través de "P1" y "P2". La resistencia del suelo está dada por la lectura del equipo de medición, por lo cual procedemos a determinar la resistividad del suelo con la siguiente ecuación:

$$\rho = \pi * a * R$$

Dónde:

ρ : resistividad del suelo (ohm*m). a: distancia entre los pines (m).

R: resistencia medida por instrumento (ohm).

En la figura 17, mostraremos el esquema de medición echas en campo de la resistividad del área que se implantara el SPC.

Figura 17. Mediciones de resistividad eléctrica en campo.



En la siguiente tabla 3, se presentan las mediciones hechas en campo en toda el área donde se instalará el SPC, se efectuaron tres mediciones para promediar la resistencia que presenta el área donde están ubicadas las estructuras metálicas enterradas.

Tabla 3. Mediciones Obtenidas de la Resistividad del Suelo.

Mediciones	Longitud "metros"	Lectura ohm	Resistividad Ohm*m
Primera medición	1	10,7	67,230
	2	12,8	160,849
	3	11,3	212,999
	4	10,4	261,380
	5	8,4	263,893
Segunda medición	1	9,8	61,575
	2	7,5	94,247
	3	7,2	135,716
	4	7,7	193,522
	5	7,0	219,911
Tercera medición	1	22,3	140,115
	2	28,1	353,115
	3	18,4	346,831
	4	15,4	387,044
	5	17,7	556,061
Promedio de resistividad (ohm-m)			230,30

Densidad de Corriente

Cuando se tiene una estructura metálica, con el fin de poder suplir la corriente necesaria para que sea protegida catódicamente, la densidad de corriente requerida para lograr la protección adecuada de la superficie de las estructuras metálicas, ya sean desnudas o cubiertas, se requiere conocer la densidad de corriente para cada caso en particular, relacionando la forma de la estructura metálica y las características propias del medio corrosivo en el cual se encuentran las estructuras (Suque, 2008).

Tabla 4. Densidad de Corriente para Protección Catódica para Diferentes Medio Ambientes.

Medio	Densidad de corriente en mA/m ²		
	Acero desnudo	Recubrimiento polietileno extruido o cinta	
		Nuevo	Viejo
Agua de mar enérgicamente aireada	250		
Agua de mar	100		
Fondo de mar	30		
Suelo muy agresivo y húmedo	30	0,02	0,1
Suelo agresivo	20	0,01	0,1
Suelo moderadamente agresivo	10	0,01	0,05
Suelo menos agresivo	5	0,01	0,05
Acero en hormigón	0,5 a 15	-	-

Cálculos de SPC por el Método de Corriente Impresa

Para determinar las dimensiones de un SPC por el método de corriente impresa, requerimos de ciertas identificaciones técnicas que debemos tener en conocimiento, como por ejemplo las siguientes:

- Área a proteger (m²)
- Porcentaje de deterioro del revestimiento (% de daños).
- Densidad de corriente (en mA/m²)
- Vida útil del SPC (números de años).

Corriente Requerida

Determinaremos la corriente que se requiere en el SPC por corriente impresa por medio de la siguiente ecuación.

$$I \text{ requerida} = A_p * D \text{ corriente} * (1 - e)$$

Dónde:

I requerida: corriente que se requiere para todo el SPC (A).

A_p: Área total que se desea proteger.

D corriente: densidad de corriente (A/m²).

e: eficiencia del recubrimiento (este valor oscila entre 0 y 1).

Como las estructuras metálicas enterradas, en su exterior no están recubiertas totalmente, procedemos a determinar la corriente que se desea para todo el sistema (Suque, 2008).

El rango de densidad recomendada para este tipo de estructuras y condiciones geológicas es de 5x10⁻³ a 10x10⁻³ A/m². Para nuestro diseño se consideró el número más alto dentro de este rango, dada la experiencia y para tener cierta holgura con lo que respecta a un cálculo más conservador, según recomendación (Suque, 2008).

Y se obtiene el siguiente valor:

$$I \text{ requerida} = 10.098 \text{ m}^2 * (10 * 10^{-3}) \text{ A/m}^2 * (1 - 0)$$

$$I \text{ requerida} = 90,88 \text{ A}$$

En la ingeniería como buen principio de práctica para obtener una mayor seguridad en el SPC por corriente impresa se multiplica este valor por un factor de seguridad para de esta manera cubrir con la totalidad del área que se desea proteger (Suque, 2008).

$$I \text{ requerida} = 90,88 \text{ A} * 1.2$$

$$I \text{ requerida} = 109,05 \text{ A}$$

Luego de obtener la corriente total del sistema, se puede dimensionar la cantidad de ánodos que requiere el SPC por corriente impresa.

El material anódico que emplearemos en el diseño para cubrir las satisfacciones del sistema es de Titanio activado o recubierto de mezcla de óxidos de metales nobles (Ti- MMO), este nos garantiza un buen rendimiento para nuestro sistema y se puede garantizar en base a la experiencia en campo por medio de las mediciones para diferentes sistemas y medios donde operan. Estos ánodos tendrán conductor #8 AWG cada uno de ellos que estarán conectado a la caja de distribución que estará ubicada en la superficie del lecho de ánodos verticales (Suque, 2008).

Tabla 5. Características Técnicas de los Ánodos Titanio Activado o Recubierto de Mezcla de Óxidos de Metales.

MARCA DE LOS ÁNODOS WWI PROCAT, S.L		
Característica técnica	Valor	Unidad de medida
Diámetro	0,03	m
Corriente de drenaje	4	A
Longitud	1,50	m
Peso	0,45	Kg
Vida útil	20	años

Figura 18. Ánodos de Titanio activado o recubierto de mezcla de óxidos de metales.



Ya conocido el ánodo que se empleará en nuestro SPC por corriente impresa, procedemos a determinar la cantidad de ánodos que se emplearán, para lo cual utilizamos la capacidad de drenaje de corriente de los ánodos que se muestra en la tabla 5, de característica técnica del ánodo (Suque, 2008).

Números de Ánodos

Calculamos la cantidad de ánodos con la siguiente ecuación:

$$N_{\text{ánodo}} = \frac{I_{\text{requerida}}}{I_{\text{drenaje/ánodo}}}$$

$$N_{\text{ánodo}} = \frac{109,05 \text{ A}}{4 \text{ A/ánodo}}$$

$$N_{\text{ánodo}} = 27,26 \text{ ánodos}$$

La cantidad de ánodos que se obtuvo es de 28, por lo cual debemos colocar cuatro lechos de ánodos verticales para una adecuada distribución de corriente en toda el área que se va a proteger.

Ya obtenida la corriente requerida de 109,05 y el número de lechos de ánodos verticales (N_{lecho}) podemos determinar, la corriente que se requiere parcial del sistema.

$$I_{\text{sistema}} = \frac{I_{\text{requerida}}}{N_{\text{lechos}}}$$

$$I_{\text{sistema}} = \frac{109,05 \text{ A}}{4}$$

$$I_{\text{sistema}} = 27,26 \text{ A}$$

Área Activa de la Superficie (m²)

La descarga de corriente entre la interface zona activa-tierra del SPC por corriente impresa de lechos de ánodos verticales, es de 1,7 A/m², para de esta manera prevenir los gases (Suque, 2008).

Por lo cual utilizaremos la siguiente ecuación:

$$A_{\text{SEA}} = \frac{I_{\text{sistema}}}{D_{\text{máxima descarga}}}$$

Dónde:

A_{SEA} : Área superficial externa activa (m²).

I_{sistema} : Corriente del sistema (A).

$D_{\text{máxima descarga}}$: Densidad máxima de corriente de descarga en zona activa-tierra (1,7 A/m²).

$$A_{\text{SEA}} = \frac{27,26 \text{ A}}{1,7 \text{ A/m}^2}$$

$$A_{\text{SEA}} = 16,03 \text{ m}^2$$

Por lo que se va a considerar una perforación de 0,30 metros de diámetro (12 pulgadas), en la cual se albergarán los ánodos del sistema.

Ya determinada el área activa de la superficie procedemos a realizar el cálculo de la longitud de esta misma zona por medio de la siguiente ecuación:

$$L_{SA} = \frac{A_{SEA}}{\pi * d}$$

Dónde:

L_{SA} : longitud de la zona activa (m).

d : Diámetro de perforación (m).

$$L_{SA} = \frac{16,03 \text{ m}^2}{\pi * 0,30 \text{ m}}$$

$$L_{SA} = 17,01 \text{ m}$$

Luego determinamos el centro de los ánodos. Lo podemos obtener de la siguiente manera:

$$Es = \frac{L_{sa}}{N_{\text{ánodos por lecho}}}$$

Dónde:

Es : Espacio entre el centro del ánodo (m).

N ánodos por lecho: Numero de ánodos por lecho (7 ánodos por lecho para una cantidad de 28 ya fijo).

$$Es = \frac{17,01 \text{ m}}{7}$$

$$Es = 2,42 \text{ m}$$

Como lo indica la norma PDV HA-201 la perforación se debe realizar de 60 metros, para tener una dispersión de corriente adecuada para cubrir toda el área y así proteger todas las estructuras metálicas enterradas (PDVSA, 2005).

Con los datos obtenidos medidos de la resistividad eléctrica del suelo del área que se va a proteger procedemos a calcular:

Resistencia del Circuito

Para determinar la resistencia del circuito debemos determinar las siguientes resistencias:

$$R_{\text{circuito}} = R_{\text{ánodo}} + R_{\text{cable}} + R_{\text{estructura}}$$

Dónde:

R ánodo: Resistencia del ánodo vertical-electrolito (ohm).

R cable: Resistencia total de los cables positivos y negativo (ohm).

R estructura: Resistencia de la estructura (ohm).

Procedemos a calcular la resistencia del ánodo con la ecuación de Dwight, tomando en cuenta la distancia desde el ánodo hasta la zona activa de las estructuras metálicas enterradas (Suque, 2008).

Resistencia Ánodo Vertical- Electrolito (ohm)

$$R_{\text{ánodo}} = \frac{0.00521 * \rho}{\pi L_{SA}} \left(\ln \left(\frac{8 * L_{SA}}{d} \right) - 1 \right) \text{ (ec. de Dwight)}$$

Dónde:

R ánodo: Resistencia ánodo vertical- electrolito (en ohm).

ρ : Resistividad del suelo (ohm-m).

LSA: Longitud zona activa (m).

d: Diámetro de la perforación (m).

Con los datos ya obtenidos procedemos a realizar los cálculos y logramos tener el siguiente resultado:

$$R \text{ ánodo} = \frac{0,00521 * 230,30 \text{ ohm} * \text{m}}{\pi * 17,01 \text{ m}} \left(\ln \left(\frac{8 * 17,01 \text{ m}}{0,30 \text{ m}} \right) - 1 \right) \text{ (ec. de Dwight)}$$

$$R \text{ ánodo} = 0,137 \text{ ohm}$$

Resistencia Total de los Cables

Para obtener la resistencia eléctrica del conductor que se aplicará en el SPC procedemos a verificar la tabla 6, que nos indica las propiedades de diferentes conductores.

$$R_{\text{conductor}} = R_{\text{conductor ánodos}} + R_{\text{conductor positivo}} + R_{\text{conductor negativo}}$$

$R_{\text{conductor ánodos}}$: resistencia de todos los cables de los 7 ánodos del lecho vertical (ohm).

$R_{\text{conductor positivo}}$: resistencia del conductor que alimenta desde lecho hasta el transformador/rectificador (ohm).

$R_{\text{conductor negativo}}$: Resistencia del conductor que se conecta desde la estructura metálica hasta el transformador/rectificador (ohm).

Calibre de conductor AWG	Resistencia del conducto x 10-3 (ohm/m)	Capacidad de corriente del conductor (A)
18	21,4	5
16	13,4	10
14	8,45	15
12	5,32	20
10	3,342	30
8	2,102	40
6	1,322	55
4	0,8315	70
1	0,4147	110
1/0	0,3288	125
2/0	0,2608	145
3/0	0,2069	165
4/0	0,1640	195

La resistencia de todos los cables de los 7 ánodos del lecho vertical nos da el siguiente resultado:

$$R_{\text{conductor ánodo}} = \frac{R_{\text{conductor}} * L_{\text{conductor}}}{N_{\text{and.lecho}}}$$

$R_{\text{conductor}}$: Resistencia del conductor #8 AWG (ohm*m).

$L_{\text{conductor}}$: distancia promedio de los conductores de los ánodos (m).

Ya teniendo determinada la profundidad máxima (60 metros), que nos indica la norma PDVSA HA-201 para

introducción de los ánodos, se asume un valor de 45 metros como longitud promedio de cables en los lechos de ánodos verticales (PDVSA, 2005).

$$R_{\text{conductor anodo}} = \frac{(2,102 * 10^{-3} \text{ ohm/m}) * 45 \text{ m}}{7}$$

$$R_{\text{conductor anodo}} = 0,013 \text{ ohm}$$

Para determinar la resistencia del conductor que alimenta desde lecho hasta el transformador/rectificador se la obtiene de la siguiente manera:

Teniendo en cuenta el sitio de ubicación del transformador/rectificador hasta los lechos de los ánodos verticales se tiene una distancia promedio de 120 metros.

$$R_{\text{conductor positivo}} = R_{CP} * L_{CP}$$

RCP: Resistencia del conductor positivo #1/0 AWG (ohm*m).

LCP: Distancia del conductor que conecta el lecho hasta el transformador/rectificador (ohm).

$$R_{\text{conductor positivo}} = (0,3288 * 10^{-3} \text{ ohm/m}) * 120 \text{ m}$$

$$R_{\text{conductor positivo}} = 0,039 \text{ ohm}$$

Luego procedemos a calcular resistencia del conductor que se conecta desde la estructura metálica hasta el transformador/rectificador con la siguiente ecuación:

$$R_{\text{conductor negativo}} = R_{CN} * L_{CN}$$

RCN: Resistencia del conductor negativo #1/0 AWG (ohm/m).

LCN: Distancia del conductor que conecta el lecho hasta el transformador/rectificador (ohm).

Teniendo en cuenta el sitio de ubicación ideal del transformador/rectificador hasta las estructuras metálicas, se tiene una distancia promedio de 98,30 metros, aplicando el mismo tipo de conductor como el anterior:

$$R_{\text{conductor negativo}} = (0,3288 * 10^{-3} \text{ ohm/m}) * 98,30 \text{ m}$$

$$R_{\text{conductor positivo}} = 0,032 \text{ ohm}$$

Habiendo determinado todas las resistencias de los conductores, procedemos a sumar todo el resultado y nos da el siguiente valor:

$$R_{\text{cable}} = R_{\text{cable positivo}} + R_{\text{cable negativo}} + R_{\text{conductor del anodo}}$$

$$R_{\text{cable}} = 0,039 \text{ ohm} + 0,032 \text{ ohm} + 0,013 \text{ ohm}$$

$$R_{\text{cable}} = 0,084 \text{ ohm}$$

Para la resistencia de la estructura metálicas resulta un valor asumido que se recomienda a usar de 0.30 ohm. Y podemos determinar la resistencia del circuito ya habiendo determinado todas las variables (Suque, 2008).

Y procedemos a realizar los cálculos obteniendo el siguiente resultado:

$$R_{\text{circuito}} = R_{\text{anodo}} + R_{\text{cable}} + R_{\text{estructura}}$$

$$R_{\text{circuito}} = 0,137 \text{ ohm} + 0,084 \text{ ohm} + 0,30 \text{ ohm}$$

$$R_{\text{circuito}} = 0,521 \text{ ohm}$$

Voltaje del Sistema

Se determina el voltaje del sistema para dimensionar y seleccionar el transformador/rectificador, que se debe emplear en el SPC por corriente impresa (Suque, 2008).

Para lo cual se calcula el voltaje con la siguiente ecuación:

$$V_{\text{sistema}} = I_{\text{requerida}} * R_{\text{circuito}} + 2$$

Dónde:

V sistema: Voltaje del sistema (V).

R circuito: Resistencia del circuito (ohm).

I requerida: Corriente requerida (A).

$$V_{\text{sistema}} = 109,05 \text{ A} * 0,521 \text{ ohm} + 2$$

$$V_{\text{sistema}} = 56,81 \text{ V.}$$

Determinación del Transformador/Rectificador

Obtenida la corriente total del sistema y conociendo la tensión del sistema se puede determinar los KVA del mismo, con la siguiente expresión:

$$P_{T/R} = U_2 * I_2 * \sqrt{3}$$

Dónde:

PT/R: Potencia del transformador/rectificador (KVA).

U2: Voltaje de salida del transformador/rectificador (V).

$$P_{T/R} = 60 \text{ VDC} * 109,05 \text{ A} * \sqrt{3}$$

$$P_{T/R} = 12 \text{ KVA}$$

Ya que los transformadores están estandarizados, en el comercio no hay transformadores/rectificadores de 12 KVA trifásico, se determina la compra de uno, de 30 KVA de potencia.

Determinado el voltaje y la corriente requerida para nuestro SPC por corriente impresa, podemos determinar el transformador/rectificador con las siguientes características.

Tabla 7. Características Técnicas del Transformador/Rectificador Determinado para Nuestro SPC por Corriente Impresa

Características técnicas	
Voltaje de alimentación trifásica (U ₁)	480 V
potencia del transformador	30 KVA
Salida de voltaje (DC), (U ₂)	60 VDC
Salida de corriente (DC), (I ₂)	109,05 A
Material de la carcasa	Chapas de acero galvanizado en caliente y pintada
Rigidez dieléctrica del y transformador	Menor a 5 KV
Grado de protección	IP 55
Frecuencia	60 Hz

Tubería Rígida Metálica

Se determina el diámetro de la tubería metálica rígida, considerando el área total de los conductores, más el diámetro del ánodo de corriente impresa, con la siguiente expresión:

$$D_{TMR} = A_{COND.} + D_{\text{Ánodo}}$$

Dónde:

DTMR: Diámetro de tubería metálica rígida ACOND: Área del conductor

D Ánodo: Diámetro del conductor

Para obtener el área de los conductores que conectan a los ánodos SPC por corriente procedemos a verificar la tabla 8, que nos indica las áreas de los diferentes conductores.

Tabla 8. Tabla de equivalencias: AWG - milimétricas.

AWG	Diam. mm	Área mm ²
1	7.35	42.40
2	6.54	33.60
3	5.86	27.00
4	5.19	21.20
5	4.62	16.80
6	4.11	13.30
7	3.67	10.60
8	3.26	8.35
9	2.91	6.62
10	2.59	5.27
11	2.30	4.15
12	2.05	3.31
13	1.83	2.63
14	1.63	2.08
15	1.45	1.65

$$D_{TMR} = (7 * 8,35 \text{ mm}^2) + 706,5 \text{ mm}^2$$

$$D_{TMR} = 764,95 \text{ mm}^2$$

$$D_{TMR} = 1,18 \text{ pulg}^2$$

$$R_{TMR} = \sqrt{\frac{1,18}{3,14}}$$

$$R_{TMR} = 0,61$$

$$D_{TMR} = 0,61 * 2$$

$$D_{TMR} = 1.22 \text{ pulg}$$

Se determina utilizar una tubería de 3 pulg, para garantizar el espacio libre que recomiendan las normas.

$$D_{TMR} = 3 \text{ pulg.}$$

Coque de Relleno

El coque de relleno es de petróleo calcinado, con una resistencia específica 0,2 ohm*cm a 150 PSI – y una Densidad aparente media 0,8 kg/m. Con una granulometría de 3 a 5 mm, con el objetivo de disminuir el desgaste del ánodo debido a que la salida de corriente y su transmisión en el relleno tiene una parte electrónica (no iónica) con lo cual el desgaste del ánodo es menor, cuanto mayor sea la calidad del relleno.

El volumen del relleno de Coque que se utiliza para el SPC por corriente impresa se calcula de la siguiente manera:

$$V_{RC} = \pi * r^2 * h$$

Dónde:

VRC: Volumen del relleno de coque.

r²: Radio del tubo.

h: Altura o longitud del tubo.

$$V_{RC} = 3.141592 * (0,0762 \text{ m})^2 * 6 \text{ m}$$

$$V_{RC} = 1,436 \text{ m}^3$$

Obtenido el volumen del tubo de PVC de 6 pulg de diámetro y de una longitud de 6 metros, restamos el volumen del tubo rígido metálico, y multiplicamos por la cantidad de tubos donde se empleará el relleno de coque de petróleo, obteniendo el siguiente resultado:

$$V_{RC} = (1,436 \text{ m}^3 - 0,00424 \text{ m}^3) * 7$$

$$V_{RC} = 10,022 \text{ m}^3$$

La cantidad obtenida de volumen de coque de petróleo solo es para un lecho de ánodo vertical del SPC por corriente impresa, para obtener la cantidad total de volumen de coque de petróleo que se requiere para todo el sistema tenemos que multiplicamos para 4, que es la cantidad de lechos que tiene el diseño de SPC por corriente impresa.

$$V_{RC} = 10,022 \text{ m}^3 * 4$$

$$V_{RC} = 40.09 \text{ m}^3$$

Equipos y Materiales para el SPC por Corriente Impresa

En la siguiente tabla presentaremos la descripción de cada equipo y materiales que se emplean en el SPC por corriente impresa:

Tabla 9. Lista de Equipos y Materiales para el SPC por Corriente Impresa.

Item	Descripción	Cantidad	Unidad
1	Transformador/rectificador 60 V –120 A – 30 KVA.	1	Unid.
2	Cajas de distribución del rectificador.	1	Unid.
3	Cajas de conexiones de distribución de lecho de ánodos.	4	Unid.
4	Longitud cable positivo # 1/0 AWG.	410	m
5	Longitud cable negativo # 1/0 AWG.	220	m
6	Ánodo tubular TI-MMO, 8 A, 1,15" x 60" Longitud 70 m cable positivo #8 AWG.	4	Unid.

7	Ánodo tubular TI-MMO, 8 A, 1,15" x 60" Longitud 68 m cable positivo #8 AWG.	4	Unid.
8	Ánodo tubular TI-MMO, 8 A, 1,15" x 60" Longitud 60 m cable positivo #8 AWG.	4	Unid.
9	Ánodo tubular TI-MMO, 8 A, 1,15" x 60" Longitud 56 m cable positivo #8 AWG.	4	Unid.
10	Ánodo tubular TI-MMO, 8 A, 1,15" x 60" Longitud 51 m cable positivo #8 AWG.	4	Unid.
11	Ánodo tubular TI-MMO, 8 A, 1,15" x 60" Longitud 47 m cable positivo #8 AWG.	4	Unid.
12	Ánodo tubular TI-MMO, 8 A, 1,15" x 60" Longitud 42 m cable positivo #8 AWG.	4	Unid.
13	Terminales de conexión para cable negativo #1/0 AWG.	3	Unid.
14	Tubería galvanizada de 1 1/2" de diámetro en cedula 40 y Norma X.	620	m
15	Tubería galvanizada de 4" de diámetro en cedula 40 y Norma X.	40	m
16	Tramo de casing liso 6" x 20".	30	m
17	Tubería pvc ranurada de 1 1/2" x 20".	50	m
18	Tubería pvc lisa para ventilación de 1 1/2" x 20"	70	m
19	Centralizador de ánodos	80	Unid.
20	Relleno tipo ventanico para sello	30	m ³
21	Coque de petróleo calcinado	40,09	m ³
22	Cubierta de pvc 6"	4	Unid.

Planos de Construcción del SPC

Los planos que se diseñaron para la construcción del SPC por corriente impresa son los siguientes:

Sistema de Protección Catódica _ Planta. _ Anexo # 1. Diagrama Unifilar General. _ Anexo # 2.

Sistema de Lechos de Ánodos Verticales_ Detalle. _ Anexo # 3.

Caja de Distribución de Cables Positivos y Negativos_ Detalle. _ Anexo # 4. Conexión de Cable Negativo en Estructura Metálica_ Detalle. _ Anexo # 5.

Los planos de construcción del SPC por corriente impresa se presentan en físico en la sección anexos.

Presupuesto del SPC por Corriente Impresa

Se plantean costos referenciales de proveedores de materiales y equipos de protección catódica que existen. A continuación, se detallan los costos de cada equipo y material incluyendo mano de obra del proyecto:

Tabla 10. Presupuesto del SPC por Corriente Impresa.

Item	Descripción de equipos y materiales	Cantidad	Unidad	Consto Unitario \$	Costo total \$
1	Transformador/rectificador 60 V – 120 A	1	Unid.	15.500,00	15.500,00
2	Cajas de distribución del rectificar.	1	Unid.	510,00	510,00
3	Cajas de conexiones de distribución de lecho de ánodos.	4	Unid.	750,00	3.000,00
4	Longitud cable positivo # 1/0 AWG.	410	m	16,00	6.560,00
5	Longitud cable negativo # 1/0 AWG.	220	m	16,00	3.520,00
6	Ánodo tubular TI-MMO, 8 A, 1,15" x 60" Longitud 70 m cable positivo #8 AWG.	4	Unid.	730,20	2.920,80
7	Ánodo tubular TI-MMO, 8 A, 1,15" x 60" Longitud 68 m cable positivo #8 AWG.	4	Unid.	722,60	2.890,40
8	Ánodo tubular TI-MMO, 8 A, 1,15" x 60" Longitud 60 m cable positivo #8 AWG.	4	Unid.	712,48	2.849,92
9	Ánodo tubular TI-MMO, 8 A, 1,15" x 60" Longitud 56 m cable positivo #8 AWG.	4	Unid.	702,65	2.810,60
10	Ánodo tubular TI-MMO, 8 A, 1,15" x 60" Longitud 51 m cable positivo #8 AWG	4	Unid.	693,470	2.773,88

11	Ánodo tubular TI-MMO, 8 A, 1,15" x 60" Longitud 47 m cable positivo #8 AWG.	4	Unid.	683,89	2.735,56
12	Ánodo tubular TI-MMO, 8 A, 1,15" x 60" Longitud 42 m cable positivo #8 AWG.	4	Unid.	670,23	2.680,92
13	Terminales de conexión para cable negativo #1/0 AWG.	3	Unid.	3,46	10,38
14	Tubería galvanizada de 1 ^{1/2} " de diámetro en cedula 40 y Norma X.	620	m	8,50	5.270,00
15	Tubería galvanizada de 4" de diámetro en cedula 40 y Norma X.	40	m	27,32	1.092,80
16	Tramo de casing liso 6" x 20".	30	m	210,3	6.309,00
17	Tubería pvc ranurada de 1 ^{1/2} " x 20".	50	m	15,64	782,00
18	Tubería pvc lisa para ventilación de 1 ^{1/2} " x 20"	70	m	15,47	1.082,90
19	Centralizador de ánodos.	80	Unid.	41,21	3.296,80
20	Relleno tipo ventanico para sello.	968,41	kg	1,30	1.258,93
21	Coque de petróleo calcinado.	40,09	m ³	389,35	15.609,04
22	Cubierta de pvc 6".	4	Unid.	28,63	114,52
23	Mano de Obra				40.500,00
				TOTAL SIN IVA	\$ 124.078,45
				14 % IVA	\$ 17.370,98
				COSTO TOTAL DEL PROYECTO DE SPC POR CORRIENTE IMPRESA	\$ 141.449,43

Análisis y Evaluación

La selección del tipo de protección catódica para usar en las estructuras metálicas enterradas depende de consideraciones técnicas y económicas, además de analizar las ventajas y desventajas de los sistemas de protección catódica.

El método que es recomendable para la protección de las estructuras metálicas enterradas, es el del SPC por Corriente Impresa, permitiendo el control de problemas que se puedan presentar por corrientes parásitas o vagabundas.

La resistencia de un lecho de ánodos depende mucho de la resistencia del terreno, de las dimensiones y forma de los ánodos y del lecho.

Después de calcular el sistema por el métodos de SPC por corriente impresa, y conociendo los resultados obtenidos, se pudo diseñar y determinar el costo del proyecto para su implementación teniendo en consideración que es el método más idóneo que se puede emplear en esta área a proteger, ya que el método de SPC por ánodos galvánico no da una estabilidad al sistema, mientras tanto el método de SPC por corriente impresa, nos da una mayor protección, seguridad, estabilidad y garantiza la vida útil de las estructuras metálicas enterradas, por ende resulta muy confiable ya que nos brinda un constante flujo de corriente que garantiza al sistema la protección en la totalidad de las estructuras metálicas enterradas por el tiempo para el que está diseñado.

Para proteger estructuras metálicas enterradas por el método de SPC por corriente impresa, la corriente continua se generará mediante un transformador/rectificador a cuyo polo negativo se conecta la estructura y al polo positivo los lechos de ánodos verticales permanentes, conectados en paralelo.

CONCLUSIONES

Que el SPC por corriente impresa es la técnica más eficiente para proteger las estructuras metálicas enterradas, previstas con el proyecto, conforme al cálculo realizado en el área real de las estructuras.

El lecho de ánodos verticales es el idóneo, para no tener una interferencia en las estructuras cercanas que no están conectadas al SPC por corriente impresa, comparada con el otro sistema de ánodos galvánicos o sacrificio.

El SPC está diseñado para un funcionamiento constante de durabilidad de 20 años de vida útil, cumpliendo los criterios de diseño que indica la norma PDVSA-HA 201 y con las características técnicas de los equipos y materiales implantados.

El costo del proyecto e instalación del SPC por corriente impresa se compensa con la protección adecuada y garantizando la vida útil de las estructuras metálicas enterradas.

REFERENCIAS

- Ahmed, S., Orth, V., Foley, M., Kottas, K., & Teodoriu, C. (2021). Designing in-house cathodic protection system to assess the long-term integrity of natural gas pipelines. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 94, 104116.
- Barrera, C. (2011). Evaluación de la Distribución de Corrientes y Potenciales Eléctricos en un Sistema de Protección Catódica en Tuberías. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/19201/1/TESIS%20-%20JORGE%20LUIS%20BARRERA%20CRUZ.pdf>
- Brichau, F. R. A. N. K., & Deconinck, J. (1994). A numerical model for cathodic protection of buried pipes. *Corrosion*, 50(01).
- Cantor, R. J., & Pinzón, C. N. (1995). Programa para el diseño de sistemas de protección catódica con ánodos de sacrificio. Obtenido de: <http://sistemamid.com/download.php?a=602>. df
- Cui, G., Li, Z., Yang, C., & Wei, X. (2015). Study on the interference corrosion of cathodic protection system. *Corrosion Reviews*, 33(5), 233-247.
- Girón, C. (2005). Protección catódica y su aplicación en tanques de almacenamiento de productos petroleros en plantas Guatemaltecas. Obtenido de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0975_Q.pdf
- Giudice, C., & Pereyra, A. (s.f.). Protección catódica con ánodos galvánicos.
- Kamp, R., & Director, E. (2005). An Overview of environmental and other impacts of the Potential DKRW LNG plant/pipeline and Arizona Clean Fuels refinery in Tacna, Arizona with oil port and pipeline. *Report for Proyecto Fronterizo de Educacion Ambiental Playas de Tijuana, Baja California*.
- Lechtman, H. (1976). A metallurgical site survey in the Peruvian Andes. *Journal of Field Archaeology*, 3(1), 1-42.
- Ley, T., & Reynolds, D. (2006, May). Pulling and towing of pipelines and bundles. In *Offshore Technology Conference*. OnePetro.
- Orazem, M. E., Esteban, J. M., Kennelley, K. J., & Degerstedt, R. M. (1997). Mathematical models for cathodic protection of an underground pipeline with coating holidays: part 2—case studies of parallel anode cathodic protection systems. *Corrosion*, 53(6), 427-436.
- Ortiz, C. A. (2013). Aplicación del método de protección catódica a una aducción de la Ciudad Universitaria de Caracas.
- Patiño, A. (1990). Estudio para la aplicación de protección catódica en tuberías metálicas de acueductos o poliductos.
- PDVSA. (2005). Criterios de diseño para sistemas de protección catódica.
- Popov, B. N., & Kumaraguru, S. P. (2005). Cathodic protection of pipelines. In *Handbook of environmental degradation of materials* (pp. 503-521). William Andrew Publishing.
- Silva Atoche, A. (2015). Diseño, instalación y puesta en marcha del sistema de protección catódica con ánodos galvánicos continuos en una estación CITYGATE.
- Suque, C. (2008). Diseño del sistema de protección catódica por ánodos profundos para un bosque de tanques de almacenamiento de Combustible.
- Tilurbina Alter, Luis Liesa Mestres, Francisco Iribarren Laco, José Ignacio. (2003). CORROSIÓN Y PROTECCIÓN. Barcelona: Barcelona: UPC.
- Torres Hernández, J. D. R., Meraz, E. D. A., & Veleza, L. (2017). Evaluación de un sistema de protección catódica de un gasoducto enterrado. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 37(1), 19-26.