

¿Qué hacer cuando los SPC por corriente impresa tradicionales fallan o están fuera de servicio en los Sistemas de Transporte de Hidrocarburos?

What to do when traditional business-stream SPCs fail or are out of service in Hydrocarbon Transportation Systems?

José Luis Rojas Villafranca ¹. 
rojasjlu@gmail.com

Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” (UNEXPO)
Puerto Ordaz, Venezuela.

Recepción: 29-06-2025

Aceptación: 07-07-2025

Publicación: 29-07-2025

Como citar este artículo: Rojas, J. (2025). **¿Qué hacer cuando los SPC por corriente impresa tradicionales fallan o están fuera de servicio en los Sistemas de Transporte de Hidrocarburos?** Aportes. Revista Internacional de Estudios Abiertos, Independientes y Alternativos, 5 (1), pp. 114-139.

¹ Ingeniero de Mantenimiento con Maestría en Gerencia de Seguridad y Confiabilidad Industrial egresado de la Universidad Gran Mariscal de Ayacucho (UGMA). Actualmente es Doctorante en Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Nacional Politécnica “Antonio José de Sucre” (UNEXPO) Vicerrectorado Puerto Ordaz. Es profesor invitado en las cátedras de Gerencia de Seguridad y riesgo (UGMA), y en la Especialización en Corrosión y Protección de Materiales Metálicos de Corrosión de la UNEXPO Vicerrectorado Puerto Ordaz en la cátedra de Protección Electroquímica. Ha sido certificado en NACE (Actualmente AMPP) en Corrosión interna de tuberías y Revestimiento. Cuenta con diecinueve (19) años de experiencia en PDVSA Gas, S.A. filial de PDVSA.

Resumen

Los sistemas de transporte de hidrocarburos, son infraestructuras críticas, pero altamente vulnerables a la corrosión externa. Para combatirla, se ha empleado tradicionalmente la protección catódica por corriente impresa, que convierte la tubería en el cátodo de una celda electroquímica. Sin embargo, estos métodos convencionales, que utilizan unidades rectificadoras y lechos de ánodos enterrados cada 15-20 kilómetros, presentan desventajas como el gran tamaño de los equipos, alta demanda de mantenimiento y vulnerabilidad al hurto de componentes. Una alternativa innovadora y más eficiente son los ánodos flexibles lineales. Esta tecnología proporciona una corriente uniforme y continua, prolongando la vida útil de las tuberías. Su diseño incluye un conductor de cobre de baja resistencia protegido por un recubrimiento polimérico, un coque de alto desempeño para la transferencia de corriente y una cubierta de fibra de polietileno que ofrece resistencia mecánica. Las ventajas clave de los ánodos flexibles lineales incluyen: alta resistencia química, baja resistividad, fácil instalación y una vida útil estimada de más de 20 años. Además, minimizan los efectos de interferencia y garantizan la estabilidad del sistema, posicionándose como una solución superior a los métodos tradicionales para la protección a largo plazo de activos críticos. La tecnología de ánodos flexibles lineales representa un avance significativo en la protección contra la corrosión externa de tuberías. Su diseño compacto, facilidad de instalación, protección uniforme y larga vida útil la posicionan como una alternativa a los métodos tradicionales, ofreciendo una solución robusta y eficiente para la preservación de activos críticos en la industria de hidrocarburos. **Palabras claves:** Protección Catódica, poliducto, ánodo, corrosión.

Abstract

Hydrocarbon transportation systems are critical infrastructures, but highly vulnerable to external corrosion. To combat this problem, impressed current cathodic protection has traditionally been employed, which converts the pipeline into the cathode of an electrochemical cell. However, these conventional methods, which use rectifier units and buried anode beds every 15-20 kilometers, have disadvantages such as large equipment size, high maintenance requirements, and vulnerability to component theft. An innovative and more efficient alternative is linear flexible anodes. This technology provides a uniform and continuous current, extending the life of pipelines. Their design includes a low-resistance copper conductor protected by a polymer coating, a high-performance coke for current transfer, and a polyethylene fiber sheath that provides mechanical strength. The key advantages of linear flexible anodes include high chemical resistance, low resistivity, easy installation, and an estimated lifespan of more than 20 years. Furthermore, they minimize interference effects and ensure system stability, positioning themselves as a superior solution to traditional methods for the long-term protection of critical assets. Linear flexible anode technology represents a significant advance in pipeline protection against external corrosion. Its compact design, ease of installation, uniform protection, and long service life position it as an alternative to traditional methods, offering a robust and efficient solution for the preservation of critical assets in the hydrocarbon industry. **Keywords:** Cathodic Protection, pipeline, anode, corrosion.



Introducción

Por años la respuesta a esta pregunta ha resonado en mis oídos y presente en mis pensamientos, hasta que un día un amigo, ex compañero y ex supervisor me indicó que existía una solución. Me indica que en varios países desarrollados y algunos de América latina se emplean Los *Ánodos Flexibles Lineales*, también llamados *Ánodos "Poliméricos"*, para algunos autores o *Ánodo Polimérico Continuo*, una tecnología relativamente nueva, cuyos primeros pasos se deben a las investigaciones del Dr. Nepman en 1967 para el Instituto de Lawrence Berkeley National Laboratory.

Los sistemas de transporte de hidrocarburos, ya sean gasoductos, oleoductos o poliductos son redes de tuberías, destinado al transporte de hidrocarburos o producto terminados. Los oleoductos se encargan de transporta petróleo crudo, los gasoductos transportan hidrocarburos gaseosos como etano-metano (C1-C2), y los poliductos que transporta variedad de combustible procesado, como: kerosene, naftas, gas oil, líquidos del gas natural, entre otros. Estas infraestructuras son críticas para el transporte y distribución de energía a nivel mundial. Sin embargo, su vulnerabilidad a la corrosión, en especial la externa, representa un riesgo constante de fugas, derrames e incluso explosiones.

Los tuberías de transporte de hidrocarburos conocidas a nivel mundial por sus siglas en inglés "Pipeline" utilizan como método de control de la corrosión externa, la protección catódica (PC) por corriente impresa, que es una técnica para reducir la velocidad de corrosión de una superficie metálica, convirtiéndolo en el cátodo de una celda electroquímica [1]. La PC se ha convertido en una herramienta fundamental para prevenir la corrosión en estas estructuras, los métodos tradicional de PC está



conformado por Fuente de Corriente Alterna proveniente de banco de transformadores, posteriormente unidad rectificadora, sistemas de distribución de corriente, cajas de positivos (ánodos), negativos (retornos) y lecho de ánodos que pueden ser enterrados de forma horizontal o vertical de ferrosilicios, óxidos mezclados (MMO), polímeros, entre otros, se ubican cada unidad de sistema de protección catódica cada 15 o 20 kilómetros de cobertura efectiva, sin embargo estos sistema tradicionales presentan algunas debilidades como cantidad y tamaño de los equipos, alta tasa de hurto de componentes, alta demanda de mantenimiento.

Los ánodos flexibles lineales emergen como una alternativa innovadora a la protección catódica tradicional. Ofrecen ventajas como su fácil instalación, adaptabilidad a diferentes topografías y menor impacto ambiental, no obstante, aún existe una necesidad de estudios que evalúen su eficacia en la protección de ductos de transporte. El ánodo polimérico continuo o flexible para protección catódica por corriente impresa fue desarrollado hace aproximadamente unos 30 años, cuya principio de funcionamiento y requisitos de instalación están basados en los estudios realizados por Dr. J. Newman. [2]

J. Newman indica que los ánodos deben colocarse de manera que suministren una densidad de corriente uniforme a la superficie del cátodo protegido para mantenerlo dentro de un rango de potencial específico en relación con el medio electrolítico adyacente. El análisis de dos o más cilindros circulares paralelos se lleva a cabo resolviendo la ecuación de Laplace con la densidad de corriente uniforme en el cátodo. La computadora se utiliza para sumar términos en una solución mediante la separación de variables, y los resultados muestran la variación del



potencial y la caída promedio del potencial en función de la distancia de separación. Los gráficos de contorno potencial comparan la extensión de campos eléctricos significativos para uno y dos ánodos. [3] Esta investigación buscar identificar las bases teóricas sobre la protección catódica por ánodos flexibles lineales en tuberías de transporte de hidrocarburos como método de protección sustituto a los sistemas tradicionales. Se espera que esta investigación contribuya a ampliar el conocimiento sobre la protección catódica por ánodos flexibles lineales y proporcionar información valiosa para la selección de estos sistemas, en este tipo de aplicaciones.

Referencias Teóricas

La integridad mecánica de los diferentes activos de una empresa puede ser afectando por corrosión en mayor y menor grado. De acuerdo a la Asociación para la Protección y Rendimiento de los Materiales (AMPP) por sus siglas en inglés indica que el 3,4 % del PIB en mundo involucra los costos por corrosión.

	Costos en la Agricultura (billones USD)	Costos en la Industria (billones USD)	Costo en los Servicios (billones USD)	Costo Total (billones USD)	Costo Total (PIB) (billones USD)	% PIB
Estados Unidos	2.0	303,2	146	451,3	16720	2,70%
India	17,7	20,3	32,3	70,3	1670	4,20%
Región Europea	3,5	40,1	297	701,5	18331	4,80%
Mundo Árabe	13,3	34,2	92,6	140,1	2789	5,00%
China	56,2	192,5	146,2	394,9	9330	4,20%
Rusia	5,4	37,2	41,9	84,5	2113	4,00%
Japón	0,6	45,9	5,1	51,6	5002	1,00%
América Latina y el Caribe	1,5	29,9	27,3	58,6	2302	2,50%
Mundo	52,4	382,5	117,6	552,5	16057	3,40%
GLOBAL	152,7	1446,7	906	2505,4	74314	3,40%

Figura 1. Costos Globales por Corrosión

La corrosión se mitiga con la combinación de una protección anticorrosiva primaria (revestimiento) y una secundaria (protección catódica) [5]. La Protección Catódica, tan explotada con métodos tradicionales de corriente impresa con ánodos discretos (hierro fundido, grafitos, platinos, titanio, MMO, entre otros), presenta puntos de atención en las que lograr el potencial de protección catódica se hace dificultoso o en algunos circunstancias imposible, es en estos casos cuando los ánodos flexibles lineales representa una prescripción adecuada. [6]

En 1807, Sir Humphry Davy, químico e inventor británico descubrió la electrólisis, proceso por el cual una corriente eléctrica separa los componentes de una sustancia química. Este descubrimiento fue fundamental para el desarrollo de la protección catódica, ya que permitió la aplicación de corriente eléctrica a las estructuras metálicas para protegerlas de la corrosión. Davy construyó la primera celda voltaica, una fuente de energía eléctrica continua. Este invento fue crucial para el desarrollo de la protección catódica, ya que proporcionó una fuente de energía práctica para aplicar corriente a las estructuras metálicas sumergidas o enterradas. [7]

El Dr. J. Newman, ingeniero químico e investigador estadounidense de la Universidad de California, realizó importantes contribuciones al desarrollo de los ánodos flexibles. En 1962, el Dr. Newman planteó una teoría que describe el comportamiento de los ánodos porosos. Esta teoría, conocida como la teoría de Newman, es una herramienta fundamental para el diseño y optimización de los ánodos flexibles. El Dr. Newman ha diseñado y desarrollado varios tipos de ánodos flexibles, incluyendo ánodos de malla, ánodos de fibra de carbono y ánodos de película delgada. Estos ánodos se



utilizan en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la electrólisis, la producción de cloro y la protección catódica en el año 1991. [3]

Los sistemas de protección catódica con ánodos flexibles lineales ofrecen una solución innovadora para la protección de tuberías enterradas, tanques y otras estructuras. Estos ánodos proporcionan una corriente de protección catódica más uniforme, lo que se traduce en una mayor vida útil para los activos. (Ver Figura 2).

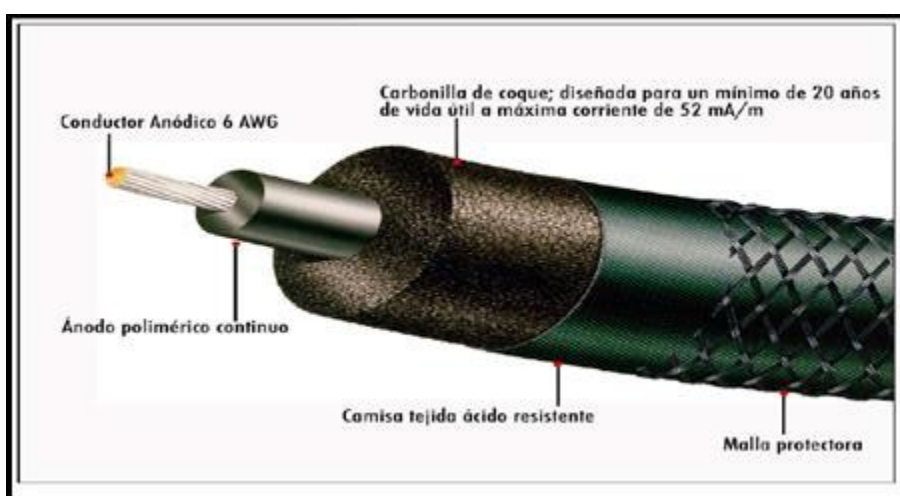


Figura 2. Ánodo Polimérico continuo

Los ánodos flexibles lineales poseen un coque de alto desempeño que facilita la transferencia de corriente al suelo y una chaqueta de seguridad de coque que lo protege de daños mecánicos. Finalmente, una cubierta de fibra de polietileno que le brinda resistencia a los esfuerzos mecánicos del medio. Las ventajas de los ánodos flexibles lineales incluyen: corriente de protección uniforme; prolongada vida útil de los activos; alta resistencia química: resistencia a las condiciones agresivas del suelo; baja resistividad: facilita la transferencia de corriente; resistencia mecánica y soporta los esfuerzos del terreno. [5]



Esta tecnología ofrece una vida útil estimada de más de 20 años, garantizando la protección contra la corrosión externa en corredores de tuberías. Los ánodos lineales suministran una protección catódica constante a la estructura del acero, con una salida de corriente uniforme que elimina las fluctuaciones. Además, minimiza los efectos de interferencia, proporciona baja resistencia para descargas de voltajes y sus circuitos largos y continuos garantizan estabilidad e integridad de los sistemas. Los ánodos flexibles lineales son fabricados por varios proveedores (americanos; asiáticos y europeos), los cuales están disponibles con diferentes tipos de drenajes de corriente.

Los sistemas de transporte de tuberías representan las arterias o medios empleados para el transporte de hidrocarburos tales como: crudo, metano, gasolina, nafta, líquidos del gas natural (LGN), entre otros. De acuerdo a lo establecido en el código de construcción, operación y mantenimiento ASME B31.4 “Pipelines Transportation Systems for Liquids and Slurries” [8] todas las tuberías enterradas que transportan hidrocarburos líquidos, deben ser protegidas contra la corrosión externa. Es ese sentido, para cumplir con lo indicado a la norma descrita, los sistemas de tuberías fueron diseñados para ser protegido con sistemas de protección catódica por corriente impresa tradicionales, con ánodos de sacrificio de hierro-silicio-cromo, los sistemas de protección catódica tradicionales conllevan un alto consumo de energía debido a la necesidad de bancos de transformadores, rectificadores y sistemas de distribución de corriente (SDC). Que se puede hacer cuando por hurtos o robos de componentes los sistemas de protección catódica no están disponibles, sin mencionar el aumento significativo de mantenimiento reactivo por corrección de fugas, es allí



donde la implementación de ánodos flexibles paralelos a las tuberías surge como una alternativa para aplicar protección catódica, aunado a que se tiene evidencia de su aplicación en Estados Unidos, Europa, Asia y otros. Entre sus ventajas destacan su eficacia en suelos de alta resistividad y entornos con interferencia eléctrica de otras estructuras o tuberías enterradas. [9, 10].

Los ánodos flexibles ofrecen mayor eficiencia que los tradicionales, requiriendo menor cantidad de corriente para su funcionamiento [11]. Esto permite minimizar el tamaño de los rectificadores, posibilitando su instalación en postes de alumbrado, lo que a su vez reduce el riesgo de hurto y vandalismo.

Metodología

Se realizó una investigación documental, sobre los diferentes estudios e investigaciones sobre la aplicación de ánodos flexibles lineales como sistema de protección catódica en estructuras enterradas o sumergidas:

Los primeros estudios documentados fueron en el año 1991, Newman J., realizó una investigación técnica denominado “Protección Catódica con Cilindros Paralelos”. El artículo analiza el caso de dos o más cilindros circulares paralelos como cátodos. Para lograr la distribución de corriente deseada, se resuelve la ecuación de Laplace considerando una densidad de corriente uniforme sobre el cátodo [3]. Los métodos de investigación aplicado fue Descriptivo de campo. En las conclusiones señala que la protección catódica es una técnica para prevenir la corrosión electroquímica de metales. Funciona forzando al metal a comportarse como un cátodo en una celda electroquímica, suprimiendo así las



reacciones anódicas de corrosión. Además indica que la colocación adecuada de los ánodos (electrodos de sacrificio) es crucial para proporcionar una densidad de corriente uniforme en la superficie del cátodo (metal protegido). Esto mantiene el potencial del cátodo dentro de un rango específico para evitar la corrosión.

De igual manera, Albuquerque O. y Bracco R. elaboraron un estudio técnico denominado “*Ánodo Polimerico Continuo*”. Para tal fin recurrió a métodos de investigación aplicados de carácter Descriptivo de Campo. Entre las Limitaciones conllevó a considerar que las aplicaciones más importantes en ductos son en líneas de transmisión atendiendo a las diferencias de diámetro que en general existen con relación a las de distribución. En los casos que ameriten el uso de dos o más líneas de APC 1500, las distancias mínimas entre ánodo y tubería se reducen sensiblemente. Como la «variable de ajuste» depende principalmente del diámetro de tubería, la distancia entre esta y el APC 1500. Una vez adoptada la densidad de corriente en función de las resistividades máxima, media y mínima para el segmento a proteger, se calcula la necesidad de corriente en función de la superficie involucrada y por tanto la corriente a entregar al mismo. Indicando en sus conclusiones que los ánodos poliméricos fueron desarrollados hace unos 30 años, contando con la teoría de funcionamiento y de requisitos de instalación basada en estudios del Dr. J.Newman, las cuales se adecuarán a las características de cada proyecto particular. Obviamente, cada caso tendrá una necesidad distinta de corriente para el logro de su protección catódica (protección anticorrosiva secundaria) en función del diámetro de tubería involucrado y del estado del revestimiento y su conductividad (protección catódica primaria);



considerando que por su capacidad de erogación de corriente este tipo de ánodo es indicado para casos especiales o ductos pobremente revestidos o desnudos, se desarrollará este trabajo para esta última situación y siendo que además, fue incluido en la norma internacional ISO- 15589-part. 1 con la recomendación de uso en suelos de alta resistividad, se pondrá especial énfasis en presentar la «variable de ajuste» que permita discernir acerca de la calidad de la protección a lograr. Se señala que la Protección catódica por APC puede emplearse en alta resistividad de suelo. Rehabilitación de tuberías con revestimiento pobre. Protección catódica de tuberías desnudas. Eliminación de interferencias. Protección catódica de tanques apoyados en el suelo (AST) [5].

Pham B.Q., Olabisi O. y otros, realizaron un artículo científico denominado “*Ánodos Poliméricos para Rehabilitación de Tuberías*”. El método de investigación realizado fue de Campo y Correlacional. Dentro sus conclusiones señala que los cables de ánodo polimérico prácticamente no sufrieron deterioro cuando se probaron durante 12 meses al límite de resistencia recomendado por el fabricante del ánodo; es decir, el nivel máximo de corriente del ánodo de 16 mA/pie lineal y una temperatura de 60 °C. No hubo un consumo significativo de ninguno de los cables de ánodo polimérico. Los ánodos estaban en excelentes condiciones y parecían nuevos después de la exposición en el laboratorio. El cambio en la conductividad de las muestras analizadas después del período de prueba de 12 meses es insignificante y no hay cambios significativos en el contenido de carbono de las muestras analizadas. Los cables de ánodo polimérico pueden proteger eficazmente tuberías enterradas que tienen revestimientos gravemente degradados en suelos de Arabia Saudita. El uso



de resistencias en los segmentos del cable del ánodo permitió equilibrar la salida de corriente de los sistemas de ánodo. Los cables de ánodo polimérico pre-empaquetados que contienen 2,2 kg de cisco de coque/metro de relleno podrían tener una vida útil de más de 20 años, si se operan a niveles de corriente de ánodo de menos de 16 mA/pie lineal y a temperaturas inferiores a 60 °C. Los cables de ánodo polimérico proporcionan una mejor distribución de la corriente y reducen la corriente CP excesiva requisitos, así como reducir la interferencia CP. [10]

LaxK., realizó un estudio técnico denominado “*Aplicación de protección catódica en bajos severos interferencia de corrientes parasitas y verificación de la eficacia*”. El método de investigación aplicada fue Exploratoria y Correlacional. Entre las limitaciones del estudio está focalizado en la evaluación de interferencia en la protección catódica, y como se ha obtenido buenos resultados con ánodos flexibles lineales. Dentro de las conclusiones relevantes de la investigación, se señala que los ánodos lineales pueden proporcionar una protección catódica eficaz donde otros sistemas no pueden siquiera ser considerado. Las probetas de resistencia eléctrica proporcionan evidencia de que la corrosión se reduce a límites aceptables, o eliminarse por completo. Esto es más confiable que analizar potenciales y proyecciones. En situaciones de corriente perdida, utilice siempre los mejores equipos y componentes porque las consecuencias de una falla son graves y la adaptación es imposible. El sistema instalado era muy diferente del sistema de diseño original pero a pesar de todos los cambios en la construcción, el sistema ha funcionado eficazmente. Sería bueno afirmar que funcionó gracias a la experiencia, la diligencia y las cualidades excepcionales del equipo de diseño e instalación. [12]



Javia S., realizó un artículo científico denominado *“Tanque de almacenamiento sobre el suelo: estudio de caso de un ánodo lineal. Aspectos basados en el diseño y la instalación del sistema de protección catódica en un tanque de nueva construcción y un tanque existente”* Los materiales de Protección catódica que se encuentran dentro de los cimientos del tanque deben ser de la más alta calidad comprobada. La vida de la protección catódica debe considerarse 50 años. El sistema de corriente impresa que utiliza ánodo lineal MMO con cables conductores conectados de fábrica proporciona una vida útil del ánodo mucho más larga, reduce en gran medida el riesgo de instalación y garantiza un proceso de instalación más seguro y protege la estructura para una vida más larga, para tanques envejecidos que no tengan revestimiento y con PC deteriorado o sin PC se puede ser previsto de un sistema de protección catódica por corriente impresa para reducir una mayor corrosión [13]. El método de investigación empleado fue Exploratorio de Campo. Entre las limitaciones del estudio fue realizado en tanques de almacenamiento de productos, el nuevo diseño para proteger los fondos de los tanques es un sistema de Ánodos lineales MMO de anillos paralelos o concéntricos con cables de cola conectados de fábrica. El diseño de tipo "cuadrícula" y lineal "paralelo/concéntrico" y la aplicación de ánodos lineales para tanques envejecidos con perforación direccional (HDD). En el cual se concluye que sólo existe una posibilidad de proporcionar un sistema CP para la placa inferior del tanque, en cualquier momento, ya sea para un sistema ICCP nuevo o para un sistema ICCP modernizado, es recomendable proporcionar corrientes de Protección Catódica considerando la densidad de corriente de la superficie desnuda.[13]



Tremolada S. y Martinelli G., presentaron un trabajo de investigación denominado “*Aplicación de ánodos flexibles lineales en lechos profundos verticales*”. La investigación empleó el método de investigación Exploratorio de Campo. El estudio se limitó a detallar la instalación de ánodos lineales en lechos verticales profundos para sistema de protección catódica en tuberías de distribución de gas, se emplearon ánodos de titanio de MMO, en un pozo de 61 m de profundidad en Italia. En el documento indica que se han instalados ánodos flexibles lineales en diferentes proyectos al norte de Italia y en una planta de Química en la ciudad de Milán. Concluyendo que el ánodo lineal flexible, si se diseña correctamente, puede ser una solución eficaz para el reemplazo de ánodos existentes en lechos de pozos profundos. La instalación del sistema anódico lineal flexible fue rápida y sencilla sin el uso de herramientas especiales. El voltaje promedio de la celda y la base de tierra fueron inicialmente más bajos que los experimentados con el sistema anódico anterior y permanecieron estables durante la prueba. Seleccionando este sistema desde el principio es posible diseñar nuevos lechos de pozo con diámetro de pozo y profundidad de perforación reducidos. [14]

Aoyama T.; Kawayoke T. y otros realizaron un artículo científico denominado “*Nueva técnica de instalación de ánodo lineal para protección catódica-Prueba y Proyecto*”. Los autores señalaron que el estudio fue aplicado de sistema de protección catódica en cabillas de refuerzo de puentes pretensados de concreto en la Prefectura Ishikawa en Japón, con ánodos flexibles lineales con rectificador remoto para tal fin, usaron el método de investigación realizado fue Exploratorio y de Campo. En las conclusiones del estudio indican que en cuanto a la reducción de costos,



este ánodo lineal a base de titanio para protección catódica ha permitido una reducción del 15% en comparación con el método convencional, en virtud de una mejor posición de ajuste de los ánodos, el número de tiras de ánodos para una sola ranura y el ancho de las tiras de ánodos, manteniendo al mismo tiempo el efecto preventivo de oxidación adecuado. [9]

Attarchi M., Ormellese M. y otros, realizaron un artículo científico denominado “*Simulación de ánodo lineal-tubo catódico Sistema de Protección: Primario y Secundario Análisis de distribución actual y potencial*”. Con el fin de aumentar su rendimiento, vida útil y producción actual, tanto de ellos podrían instalarse con coque pre-ensado. Los ánodos de un sistema de Protección Catódica, como un ánodo lineal, deben instalarse en una posición adecuada que pueda permitir una buena distribución de corriente, un gradiente de potencial adecuado en la superficie de cátodo, evitando tanto la subprotección como la sobreprotección condición. La distribución potencial en la superficie de la tubería es estrictamente relacionados con la posición del ánodo con respecto a la zona protegida del tubo [15]. El tipo de investigación realizada fue Documental. Entre las limitaciones del estudio fue aplicado a sistemas de protección catódica por ánodos lineales, aplicación la simulaciones, indica que los ánodos flexibles lineales se basan en la Ley de Ohm y ecuaciones de Laplace's para los potenciales de campo. En las conclusiones del estudio se evidencia ánodo lineal a lo largo de la longitud de la tubería. Los ánodos lineales podrían proporcionar una salida de corriente bastante baja, aunque es suficiente para tuberías con revestimiento cerrado en la mayoría de los casos. Los ánodos lineales normalmente están hechos de polímeros conductores o titanio recubierto con óxido metálico mixto (Ti-



MMO). Lineal tiene muchas ventajas para tuberías dentro de la planta o tuberías calientes enterradas en suelo congelado y tubería de corta distancia con revestimiento deficiente por el otro lado, no es una buena opción para tuberías largas a través del país con un revestimiento de alta calidad.

Liu, W., Chang R. y otros, presentaron un trabajo titulado “*Análisis de falla en un sistema de protección catódica por ánodos flexibles en una Estación*”; para tal fin se apoyó en el método de investigación exploratorio de tipo correlacionar. Entre las limitaciones principales de este estudio fue aplicado en una estación de tuberías integradas por cinco (5) circuitos de tuberías diámetro de tubería de 0,6 m y una longitud de tubería de entre 705 y 953 m, el sistema de protección catódica fue diseñado el año 2012, tiene ánodos flexibles MMO /Ti denominado como ánodos flexibles, cuenta con rectificadores con ajuste automático de potencial. En sus conclusiones señala; que en la en la mayoría de los casos, los lechos de tierra de ánodos flexibles podría obtener una distribución potencial uniforme y una buena protección. Sin embargo, en el proceso de operación, también existen condiciones de falla como rotura del cuerpo del ánodo o del cable, cortocircuito electrónico entre ánodo y tuberías y otras situaciones, lo que resulta en una protección deficiente, factores importantes durante la instalación de ánodos flexibles, que las principales razones de las fallas del sistema de protección catódica por ánodos flexibles fue el cortocircuito electrónico entre el área local del ánodo flexible y la tubería enterrada y la rotura parcial del ánodo flexible [16].



Resultados

De acuerdo a la revisión documental, es factible utilizar los ánodos flexibles lineales, en diferentes aplicaciones de sistemas de protección catódica desde fondos de tanques hasta sistemas de transporte de hidrocarburos. Los sistemas de transporte de tuberías representan las arterias o medios empleados para el transporte de hidrocarburos tales como: crudo, metano, gasolina, nafta, líquidos del gas natural (LGN), entre otros.

De acuerdo a lo establecido en los códigos de construcción, operación y mantenimiento de los sistemas de transporte de hidrocarburos (ASME B31.4 y B 31.8) todas las tuberías enterradas que transportan hidrocarburos líquidos, deben ser protegidas contra la corrosión externa. Es ese sentido, para cumplir con lo indicado a la norma descrita, los sistemas de tuberías son diseñados para ser protegido con sistemas de protección catódica por corriente impresa tradicionales, con ánodos de sacrificio de hierro-silicio-cromo, los sistemas de protección catódica tradicionales conllevan un alto consumo de energía debido a la necesidad de bancos de transformadores, rectificadores y sistemas de distribución de corriente (SDC).

Debido a hurto y robo de sus componentes, en muchos países de Latinoamérica, incluyendo a Venezuela que tiene más de 5.000 Km de líneas de transporte de hidrocarburos, los niveles de protección catódica contemplados originalmente en el diseño se encuentran en servicio, esto ha ocasionado el incremento de fallas por corrosión externa (fugas), incremento en los costos de mantenimiento correctivo (cortes y empalmes, colocación de envoltantes de refuerzo tipo B y rehabilitación de revestimiento), además de una baja confiabilidad operativa de las tuberías. La implementación de ánodos flexibles paralelos a las tuberías no



se ha empleado en el país, más se tiene evidencia de su aplicación en Estados Unidos, Europa, Asia y otros. Entre sus ventajas destacan su eficacia en suelos de alta resistividad y entornos con interferencia eléctrica de otras estructuras o tuberías enterradas. [9, 10]

Los ánodos flexibles ofrecen mayor eficiencia que los tradicionales, requiriendo menor cantidad de corriente para su funcionamiento [11]. Esto permite minimizar el tamaño de los rectificadores, posibilitando su instalación en postes de alumbrado, lo que a su vez reduce el riesgo de hurto y vandalismo. En vista de la problemática actual con la corrosión que presentan los diferentes sistema de transporte en Latinoamérica, con especial énfasis en Venezuela. La eficacia de la protección catódica por ánodos flexibles lineales, esperándose que el proyecto tenga un alto impacto positivo para la industria petrolera venezolana en general, al prolongar la vida útil de las líneas de transporte (gasoductos, oleoductos y poliductos), reducir los costos de mantenimiento, reparación, reducción del riesgos de fugas, derrames, incendio, explosiones y afectaciones al ambiente.

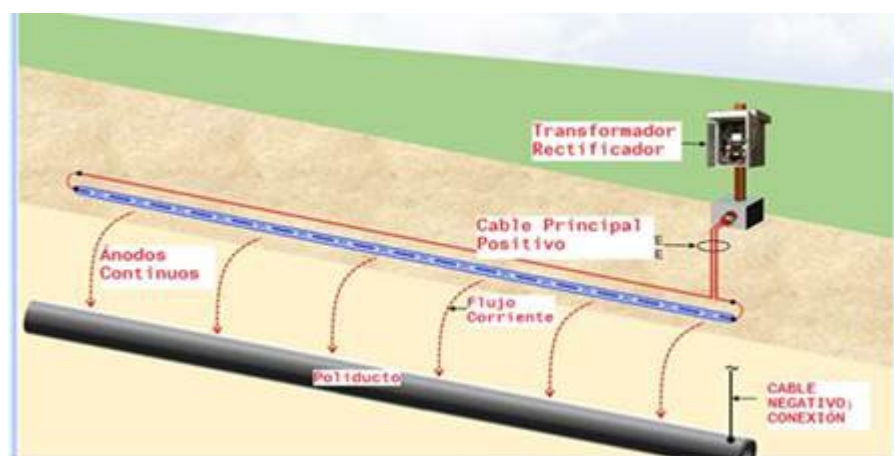


Figura 3. Protección Catódica por Corriente Impresa con ánodos flexibles lineales.



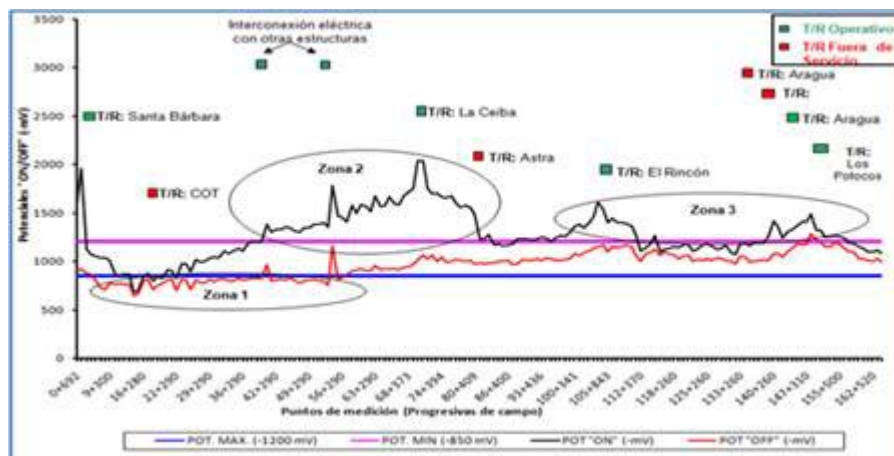


Figura 4. Potenciales con SPC de ánodos tradicionales.

Existe evidencia de la aplicación de ánodos flexibles lineales en diferentes campos, desde sistemas de transporte, fondos de tanques hasta acero de refuerzo en puentes. En algunos caso con una reducción del 15% de los costos en comparación con los sistemas tradicionales [9]. Muchos de los suelos en Venezuela presentan alta resistividad, con los situados al Norte del Estado Monagas, no obstante los ánodos flexibles lineales pueden ser empleados para esto tipo de suelo.

Discusión

Los sistemas de protección catódica con ánodos flexibles lineales ofrecen una solución innovadora para la protección de tuberías enterradas, tanques y otras estructuras. Estos ánodos proporcionan una corriente de protección catódica uniforme, lo que se traduce en una mayor vida útil para los activos.

Su diseño se basa en un conductor de cobre de baja resistencia que asegura el flujo adecuado de la corriente. A su vez, este conductor está protegido por un recubrimiento polimérico resistente a los ataques químicos del suelo. Además, el ánodo flexible lineal posee un coque de alto desempeño



que facilita la transferencia de corriente al suelo y una chaqueta de seguridad de coque que lo protege de daños mecánicos. Finalmente, una cubierta de fibra de polietileno que le brinda resistencia a los esfuerzos mecánicos del medio. Las ventajas de los ánodos flexibles lineales incluyen: Corriente de protección uniforme: Prolonga la vida útil de los activos. Alta resistencia química: Soporta las condiciones agresivas del suelo. Baja resistividad: Facilita la transferencia de corriente. Resistencia mecánica: Soporta los esfuerzos del terreno. [17]

Esta tecnología ofrece una vida útil estimada de más de 20 años, garantizando la protección contra la corrosión externa en corredores de tuberías. Los ánodos lineales suministran una protección catódica constante a la estructura del acero, con una salida de corriente uniforme que elimina las fluctuaciones. Además, minimiza los efectos de interferencia, proporciona baja resistencia para descargar voltajes y sus circuitos largos y continuos garantizan estabilidad e integridad de los sistemas. El pre-empaque con coque facilita la instalación y el drenaje de corriente de protección. La tecnología de ánodos flexibles lineales se presenta como una alternativa innovadora y eficiente para la protección contra la corrosión en diversas estructuras, existe varios fabricantes (americanos; asiáticos y europeos) de este tipo ánodos son diseñados con diferentes capacidades de drenajes de corriente. Su larga vida útil, su protección constante, su facilidad de instalación y su capacidad para minimizar las interferencias la convierten en una opción atractiva para la protección de activos a largo plazo. [2, 5, 13, 14, 15]

En cuanto a la reducción de costos, este ánodo lineal a base de titanio para protección catódica ha permitido una reducción del 15% en comparación



con el método convencional, en virtud de una mejor posición de ajuste de los ánodos, el número de tiras de ánodos para una sola ranura y el ancho de las tiras de ánodos, manteniendo al mismo tiempo el efecto preventivo de oxidación adecuado [9].

Entre las ventajas que ofrece los ánodos flexibles lineales con respecto a los métodos tradicionales están:

- Vida útil de más de 20 años.
- Mejor Distribución de corriente.
- Minimiza los efectos de interferencia.
- Garantiza estabilidad e integridad de las tuberías Operación con bajos niveles de voltaje.
- Rectificadores compactos.
- No se requieren Sistema de Distribución de Corriente.
- Potenciales de protección equilibrados.
- Menor probabilidad de hurto y robo de componentes.
- Reduce el riesgo de incendios y explosiones.

Conclusiones

Los ánodos flexibles irrumpen como una alternativa innovadora en la protección catódica, reemplazando a los métodos tradicionales. Su diseño flexible les permite adaptarse a la topografía del suelo de la estructura a proteger, incrementando significativamente el área de protección optimizando la distribución de la corriente. Esta mayor eficiencia se traduce en un menor consumo de energía, menores costos operativos y una vida útil más prolongada.



La protección catódica por corriente impresa se utiliza en Venezuela desde el año 1940, sin embargo la implementación de ánodos flexibles paralelos a las tuberías es una innovación reciente. Los ánodos flexibles ofrecen mayor eficiencia que los tradicionales, minimizando el tamaño de los rectificadores, posibilitando su instalación en postes eléctricos, que a su vez reduce los riesgos de hurto y vandalismo de los sistemas de protección catódica por corriente impresa.

Los ánodos flexibles lineales son una opción técnica disponible, cuando se desea brindar protección catódica a los sistemas de transporte, y la opción de los métodos tradicionales no están disponibles.

La protección catódica mediante ánodos flexibles lineales es una técnica altamente efectiva para prevenir la corrosión electroquímica. Los estudios de Newman (1991), Albuquerque y Bracco (2000), y Attarchi, Ormellese y otros (2020) resaltan que estos ánodos proporcionan una densidad de corriente uniforme en toda la superficie del metal protegido. Esta uniformidad es crucial para evitar zonas de sobreprotección o subprotección, un desafío común en los sistemas de ánodos de punto tradicionales.

Los ánodos flexibles lineales demuestran ser una solución versátil para diversas aplicaciones. Son particularmente adecuados para la rehabilitación de tuberías con recubrimientos degradados o desnudos, así como para suelos de alta resistividad, tal como lo señalan Albuquerque y Bracco (2000) y Pham, Olabisi y otros (2018). Su uso se ha extendido a la protección de fondos de tanques de almacenamiento y a la eliminación de interferencias de corrientes parásitas, demostrando su adaptabilidad en escenarios complejos.



Aoyama, Kawayoke y otros (2016) demuestran que la implementación de ánodos flexibles lineales puede resultar en una reducción de costos de hasta un 15% en comparación con métodos convencionales, debido a la optimización de su instalación. Tremolada y Martinelli (2016) confirman que la instalación es más rápida y sencilla, incluso en aplicaciones complejas como lechos verticales profundos, al no requerir herramientas especializadas.

A pesar de sus ventajas, es fundamental un diseño e instalación cuidadosos. El estudio de falla de Liu, Chang y otros (2021) identifica que las principales causas de fallas en los sistemas de ánodos flexibles son el cortocircuito electrónico y la rotura del ánodo. Esto subraya la importancia de usar materiales de la más alta calidad y un proceso de instalación riguroso para asegurar la integridad y la eficacia a largo plazo del sistema. Además, Attarchi, Ormellese y otros (2020) sugieren que los ánodos lineales no siempre son la mejor opción para tuberías largas con recubrimientos de alta calidad, destacando la necesidad de un análisis de diseño específico para cada proyecto.

Referencias

1. Bianchetti R., “Peabody’s Control of Pipeline Corrosion” NACE International Second Edition, Houston, Texas, USA, 2001.
2. Albuquerque O., Bracco R. “Ánodo Polimérico Continuo”. Cotep, 9a Conferencia Internacional sobre Tecnología de Equipamentos, 12-17 Junio de 2007, Salvador Bahia. [En línea]. Disponible en: <http://powerlamsa.com/pdfs/anodeflex/Anodo%20Polimerico%2>



[0Continuo-O.D_Albuquerque-R.Bracco-COTEQ226-2007-Brasil.pdf](#).

(Accedido: 21-feb-2024).

3. J. Newman. "Cathodic Protection with Parallel Cylinders", Lawrence Berkeley National Laboratory. Journal of the Electrochemical Society, 138(12), pp 3-23 feb, 1991 (Accedido: 15-jul.-2023).[On line].Disponible en: <https://escholarship.org/uc/item/1d27n37h>
4. NACE International. "International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study" (2016) pp 93-109. Disponible en: <https://Impacto.nace.org.2016>.
5. Bracco R. O., "Protección Catódica: El Ánodo Polimérico Continuo", Instituto del Gas y el Petróleo, Conferencia Internacional sobre Tecnología del Equipamento, Salvador Bahia. Brasil, feb, 2007 (Accedido: 17-jul.-2023).[En línea].Disponible en: http://powerlamsa.com/pdfs/anodeflex/Anodo%2520Polimerico%2520Continuo-O.D_Albuquerque-R.Bracco-COTEQ226-2007-
6. Albuquerque O., Bracco R. "Ánodo Polimérico Continuo". Cotep, 9a Conferencia Internacional sobre Tecnología de Equipamentos, 12-17 Junio de 2007, Salvador Bahia. [En línea]. Disponible en: http://powerlamsa.com/pdfs/anodeflex/Anodo%20Polimerico%20Continuo-O.D_Albuquerque-R.Bracco-COTEQ226-2007-Brasil.pdf. (Accedido: 21-feb-2024).
7. Beackmann, W von, W Schwenk and Prinz W "Handbook of Cathodic Corrosion Protection", Elsevier, Houston, Texas, USA, 1997.
8. ASME, "Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries," ASME B31.4-2022, New York, NY, USA: ASME, 2022.



9. Aoyama T., Kowayoke T., Osada M., Dan T., Nakamura H. "New Installation Technique of Linear Anode for Cathodic Protection -Test and Project", Mitsubishi Construction co., ltd. Prefecture Ishikawa. Japon. pp 6-10, 2019. Accessed: 02-abr-2024. [On line]. Disponible en: <http://www.claisse.info/Proceedings.htm>.
10. Pham B.Q., Olabisi O., Al-Zubail S.A, Boah J.K., Lewis A.L., Al-Rasheed A.H. y Al-Jabran A.A.. "Polymeric Anodes for Pipeline Rehabilitation". NACE, 9th Middle East Corrosion Conference and Exhibition, 2014. [On line]. https://www.researchgate.net/profile/Olagoke-Olabisi/publication/279716395_Polymeric_Anodes_for_Pipeline_Rehabilitation/links/55983d7308ae5d8f3933f0ca/Polymeric-Anodes-for-Pipeline-Rehabilitation.pdf
11. Al-Otaibi M, "The Application of BEASY Software to Simulate Cathodic Protection of Pipelines and Storage Tanks", the university of british columbia, Vancouver, Canadá, tesis de grado no publicada para maestria, 2010. Accessed: 02-abr-2024. [On line]. Disponible en: Accessed: 02-abr-2024. [On line]. Disponible en: <http://www.claisse.info/Proceedings.htm>.
12. Lax K. C. "Application Of Cathodic Protection Under Severe Stray Current Interference And Verification Of The Effectiveness", FICorr, Ceocor, Lexemburgo, 2014. Accessed: 21-feb-2025. [On line]. Disponible en: https://ceocor.lu/download/2014_weimar/2014-LAX-Stray-current-avoidance-using-linear-anodes-and-electrical-resistance-probe-data-a-case-study.pdf.



13. Javia S. “Above Ground Storage Tank – Case Study of a Linear anode based cathodic protection system design and installation aspects on a new construction tank and existing tank.”, paper No. 14, Concor2018, Jaipur, India, 2018. Accessed: 21-feb-2025. [On line]. Disponible en: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912105006>.
14. Tremolada. S. Martinelli G., “Application in deep vertical groundbeds of linear flexible anodes”, Conferencia Web, 05006 2019. Corrosion in the Oil & Gas Industry 2019. Accessed: 05-may-2024. [On line]. Disponible en: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912105006>.
15. Attarchi M., Ormellese M., Brenna A, “Simulation of Linear Anode-Pipe Cathodic Protection System: Primary and Secondary Current and Potential Distribution Analysis”, CorrosionJournal.org, vol. 75, no. 9, sept, 2019. Accessed: 15-jun-2024. [On line]. Disponible en: <https://doi.org/10.5006/3113>.
16. Liu W, Chang R, Li X, Du Y. Liu J. “Failure Analyses on a Flexible Anode Cathodic Protection System in a Station”, RevistaTecnológicaMaterials, pp. 1-18, 2024. Accessed: 30-ju-2024. 17,291. [On line]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ma17020291>.
- [17] Ahmad Z. <<Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control >>, Elsevier, frist edition 2006.

