



EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA A LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE

Evaluation of the cathodic protection system to fuel storage tanks

²Carlos Medina*, ¹Fernando Marcial, ^{2,3}Andrés Beltrán, ²Marco Bravo, ²Daniel Chuquín

¹Terminal de Productos Limpios, Riobamba (Ecuador)

²Escuela Superior Politécnica de Chimborazo – Escuela de Ingeniería Química,

³Centro de Energía Alternativas y Ambiente, Grupo de Investigación para el Desarrollo Ambiental y Cambio Climático Riobamba-Ecuador Riobamba (Ecuador).

*carlos.medinas@epoch.edu.ec

Resumen

Se evaluó el sistema de protección catódica aplicado en la base de los tanques de almacenamiento de combustible del terminal de productos limpios de la empresa pública EP PETROECUADOR, localizado en la ciudad de Riobamba, realizada durante los meses de enero y mayo de 2018. Así pues, se evaluó la efectividad del sistema por Corriente Impresa, midiendo el potencial electroquímico y la caída óhmica (IR), mediante la técnica de la interrupción de la corriente (IOP). El espesor de los tanques se midió por ultrasonido y el análisis físico-químico se realizó al suelo para conocer la humedad, índice de plasticidad y corrosividad. Se encontró que el suelo donde se encuentran apoyados los tanques (sobre losas de hormigón armado) es un terreno con una resistividad entre 10 916.15 y 14 363.36 Ω/cm , por lo que tiene una baja corrosividad. El SPC es efectivo ya que presente baja velocidad de corrosión 0.152 mm/año. Con la interrupción de corriente se determinó que el 53% de la base de los tanques de acero revestidas y protegidas catódicamente cumplen con los criterios de protección catódica del acero con polarización de +100 mV., establecido en la Norma NACE Estándar SP 0169-2013.

Palabras clave: Protección catódica, Corrosión, Potencial electroquímico, Resistividad, Polarización

Abstract

The present research has evaluated the cathodic protection system applied to fuel storage tanks base at the Terminal de productos limpios of EP PETROECUADOR public company located in Riobamba. It was evaluated during January and May, 2018. Therefore, it studied the effectiveness of the CPS by printed current which calculates the electrochemical potential and the ohmic drop (IR) by the interruption current technique (ICT). The tanks thickness was rated by ultrasound. In order to know the humidity, plasticity index and corrosivity of the soil we did a physical-chemical analysis. It was founded that the soil where the tanks are supported on (reinforced concrete slabs) has a resistivity of 10 916.15 and 14 363.36 Ω/cm , which shows a low corrosivity. We concluded that the CPS is effective since it has a low corrosion rate of 0.152 mm per year. The ICT found that 53% of the base of steel coated and cathodically protected tanks fulfill the criteria of cathodic protection of steel polarization (+100 mV) that is established in the NACE Prescription Standard SP 0169-2013.

Key words: Cathodic protection, Corrosion, Electrochemical potential, Resistivity, Polarization

Fecha de recepción: 24-04-2019

Fecha de aceptación: 10-06-2019

I. INTRODUCCIÓN

La corrosión es uno de los principales problemas de la industria, que ocasionan

grandes pérdidas económicas dentro del ámbito industrial y está dividido en tres zonas: la cubierta, las paredes y el fondo interior, que se presenta por la existencia de agua de capa o de formación (1). Destacando que la

industria petrolera no se encuentra exenta del fenómeno corrosivo, motivando así, que muchos investigadores realicen estudios para establecer lineamientos efectivos que permitan prevenirla (2). El 30% de fallas en los sistemas de producción y transporte de hidrocarburo, es por la pérdida de una pequeña porción de materiales de sus: tanques, tuberías, empaques, codos y cualquier otro tipo de material metálico que se encuentre en contacto directo con un medio agresivo que como consecuencia produce corrosión (3,4).

La corrosión trae consecuencias desastrosas en los tanques de almacenamiento y líneas industriales de transporte de petróleo (tuberías de gasoductos y oleoductos); las fallas por corrosión como picaduras y perforaciones, debidas al ataque corrosivo del suelo, provocan derrames, fuego o explosiones de los productos transportados y con ello, la contaminación ambiental y pérdidas económicas muy costosas. (5,6)

Las superficies metálicas que se encuentran en un medio corrosivo, actúan como pilas galvánicas. Los tanques de almacenamiento de combustibles cuentan con un SPC para minimizar la velocidad de corrosión del material metálico de construcción, mediante la alteración de su potencial electroquímico espontáneo, con respecto al medio electrolítico corrosivo en el cual se encuentra (7). El suelo que actúa como medio corrosivo, por su humedad, sales y materia orgánica en descomposición, es el electrolito más complejo al cual están expuestos los tanques o las tuberías. Este fenómeno está asociado a las variaciones de temperatura, pH, resistividad, potencial de corrosión, textura y porosidad. Lo que ha provocado una búsqueda extremadamente compleja para su protección intrínseca y el cumplimiento de normativas ambientales para evitar daños que puedan causar filtraciones de petróleo o derivados que contaminen el suelo o sus mantos (8,9).

Los métodos usados en la prevención de la corrosión en suelos pretenden interferir o detener el fenómeno de corrosión, siendo las formas más comunes: el tratamiento del medio ambiente; el aislamiento del metal del medioambiente (protección pasiva), el mejoramiento de la resistencia a la corrosión del material metálico y la protección catódica. Constituyéndose este último en el método más efectivo para el control de la corrosión de estructuras metálicas enterradas o sumergidas (10,11).

En la actualidad se han estudiado varias metodologías de predicción de la corrosión de tanques de almacenamien-

to o de oleoductos de cualquier tipo de subproductos de hidrocarburos, entre estas técnicas están: El mapeo de corriente utilizando un conjunto de electrodos múltiples electroquímicamente integrados, monitoreo de potencial de electrodo (7) aplicados para identificar cambios iniciales en la superficie del metal. Por otro lado están las técnicas de inspección de fugas de flujo magnético que pueden detectar y localizar defectos en la estructura (12). Así mismo están las medidas de potencial sin salida de corriente, con corriente conectada, el potencial con corriente desconectada y despolarizada(13), todas estas técnicas dependerán del material que contenga el tanque o las tuberías y además el ambiente al cual están expuestos.

En el terminal de Productos Limpios Riobamba se evaluó la efectividad del SPC por Corriente Impresa (ICCP), técnica electroquímica más utilizada en los últimos 50 años. Aplicada sobre la base de siete tanques metálicos de acero al carbono (SA36) utilizados para el almacenamiento de combustibles: Gasolina Extra, Gasolina Súper, Diésel Premium e Hidrocarburo Residual (Slop). Estos se encuentran apoyados sobre losas de hormigón, bajo los criterios estandarizados de la Protección Catódica del Acero (14).

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Localización de los sitios del ensayo y caracterización del suelo

Los siete tanques de almacenamiento de 76 600 barriles de combustible (Gasolina Extra, Gasolina Súper y Diésel Premium), del terminal de productos limpios de la filial EP PETROECUADOR, objeto de este estudio, están localizados en la zona centro del Ecuador, provincia de Chimborazo, Cantón Riobamba, en latitud 1°38'37.26"S y longitud 78°45'32.59"O, aproximadamente a 15Km de la Reserva del Nevado Chimborazo; lugar desde donde se distribuye

el combustible en tanqueros y un poliducto de 6" de diámetro y una longitud de 49,64 km al terminal de Ambato.

Se realizaron excavaciones en el suelo a un metro de profundidad junto a los tanques de diésel, tanques de gasolina y un tanque de Slop, para la toma de muestras que fueron caracterizadas mediante análisis de agresividad corrosiva determinando características de: granulometría, límites de plasticidad, contenido de humedad y resistividad (5, 16) Los ensayos granulométricos fueron realizados por tamizado, la plasticidad por el método de Casagrande y límite plástico y la humedad por el método tradicional de secado al horno y expresada en porcentaje. Estos análisis se desarrollaron en el Laboratorio de Control de Calidad de Materiales de la Universidad Nacional de Chimborazo bajo las normas estandarizadas nacionales (INEN) e internacionales (ASTM D y AASHTO).

La resistividad fue determinada mediante el método de Wenner de 4 electrodos, según ASTM G 57-2012 (17). Las barras metálicas de 0,64 cm de diámetro y de 30 cm de longitud, que funcionaron como electrodos, fueron enterrados a una profundidad de 15 cm y a una distancia equidistante de 1 metro. El voltaje enviado entre los electrodos externos, generaron un flujo de corriente, en tanto que las caídas de voltaje entre los electrodos internos fueron medidas con un resistivímetro, marca: PASI Modelo: 16GN., previo su cálculo mediante la ecuación propuesta por Wenner: $\rho(\Omega \cdot \text{cm}) = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R$. Dónde: ρ = Resistividad ($\Omega \cdot \text{cm}$); a = Separación entre los electrodos (cm); R = Resistencia (Ω).

Determinación de Espesores mediante Inspección por Ultrasonido

Para la evaluación de los posibles defectos de los tanques de almacenamiento de combustible se utilizó el medidor de espesores ultrasónico portátil DMS Go,

realizando un barrido del 60% del área total del tanque. Los resultados fueron comparados con los espesores de otras inspecciones, los espesores nominales de construcción y espesores mínimos requeridos por la norma de construcción. Con estos datos se pudo determinar la velocidad de corrosión, relacionando el espesor medido en la última inspección con respecto a los espesores determinados en las mediciones anteriores o a su vez con los valores que tenían en la construcción del tanque, dividido por el tiempo de operación (Ecuación 1) y la vida útil estimada del tanque (ecuación 2) (18,19).

$$V_c = \frac{E_o - E_m}{T} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde: V_c = velocidad de corrosión en mm/año, E_o = espesor de la plancha original o el espesor medido en la inspección anterior, E_m = espesor de plancha medido en mm en la inspección final y T = tiempo de servicio en el lapso considerado, medido en años.

$$V_u = \frac{E_m - E_{\min}}{V_c} \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde: V_u = vida útil estimada, E_m = espesor de plancha medido en mm en la inspección final, E_{\min} = espesor mínimo, en mm, requerido según la norma de construcción utilizada.

Potencial Electroquímico

El potencial electroquímico fue medido en el fondo de los tanques de combustible con un Multímetro Digital Fluke 28 II Interruptor de Corriente Sincronizable ICS 100 GPSA, fundamentado en el procedimiento de formación de polarización por el cual se mide el potencial de corrosión entre la estructura, el electrolito y su polaridad con respecto al electrodo de referencia entre el potencial "apagado" y el potencial de corrosión "resultando la cantidad de formación de polarización"(20).

Evaluación de rectificadores

Las pruebas de alcance de potenciales eléctricos de los rectificadores se realizaron con el sistema de interrupción de la corriente, potencial - off (IOP: "Instant off Potential") de ON/OFF que consistió en apagar un rectificador y medir el potencial de media celda de la estructura de acero inmediatamente después de que la corriente de protección (iCP) se interrumpiese. Para luego determinar el potencial polarizado en ciertos puntos seleccionados de cada rectificador complementándolo con mediciones de Fuerza Electromotriz (FEM), para así conocer si los ánodos de sacrificio empleados en el sistema tienen aún capacidad operativa.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del Suelo

En base a los análisis de granulometría, el suelo de la Zona de Tanques de Almacenamiento de Combustibles se clasificó como del tipo Árido Fino con un contenido de grava del 10% y un 90% de arena (Graf.1).

Además, mediante el cálculo del límite del líquido y plástico (Tabla 1-2), se determinó el índice de plasticidad (12.52%) y así, se pudo afirmar que el suelo caracterizado es un material No Plástico (NP) (21).

LÍMITE LÍQUIDO						
Nº de golpes	Cápsula	Peso cápsula (g)	Peso cápsula + suelo húmedo (g)	Peso cápsula + suelo seco (g)	% Humedad	Promedio % Humedad
38	M2	16.00	33.10	30.20	20.42	28.27
	B4	18.30	33.00	29.10	36.11	
26	G3	18.40	28.10	25.80	31.08	30.85
	5h	18.40	31.20	28.20	30.61	
16	D3	18.40	36.40	31.80	34.33	33.96
	C8	18.30	35.00	30.80	33.60	
5	A4	17.20	31.70	27.60	39.42	38.26

Tabla 1: Límite Líquido.

LÍMITE PLÁSTICO					
Cápsula	Peso cápsula (g)	Peso cápsula + suelo húmedo (g)	Peso cápsula + suelo seco (g)	% Humedad	Promedio % Humedad
M2	18.00	19.00	18.80	25.00	34.72
B3	17.50	18.80	18.40	44.44	

Tabla 2: Límite Plástico

La resistividad del suelo, indicada en la tabla 3, tuvo un valor promedio de 12 500 Ω/cm. Por lo tanto, se puede decir que este suelo es poco corrosivo (17).

Sin embargo, se encuentra dentro de los límites del grado de corrosividad en función de la resistividad del suelo, entonces se justifica que debe mantenerse la Protección Catódica. Además, la muestra del suelo presento un 23,09% de humedad promedio.

Zona	Inten-sidad (A)	Vol-taje (V)	Resistividad $\dot{A} = 2\pi a \frac{V}{I}$ (Ω-cm)	
1 Tanques de Gasolina (Extra, Súper)	0.05	0.57	10 916.15	Muy poco corrosivo
2 Tanques de Diésel	0.07	0.93	12 721.83	Muy poco corrosivo
3 Tanque Slop	0.02	0.30	14 363.36	Muy poco corrosivo

Tabla 2: Resistividad del Suelo del Terminal de Productos Limpios Riobamba

Inspección Ultrasonica mediante Medición de Espesores

La medición de espesores en el fondo de los tanques se realizó con la finalidad de conocer el estado actual de los mismos, calculando la velocidad de corrosión y a la vez redecir la vida útil de los tanques.

Con los datos de espesores tomados (Tabla 4), se puede observar que los Tanques de almacenamiento presentan una velocidad de corrosión promedio de aproximadamente 0.152 mm/año.

Este valor es superior al establecido en el criterio de la Norma API 653 correspondiente a 0.025 mm/año, por tal motivo, es aconsejable que la próxima inspección de espesores se la ejecute en un periodo no mayor a 2 años.

Por otro lado, el valor promedio de vida útil estimada de los tanques es de 17.13 años, mismo que se aproxima al valor estimado por el proyecto (20 años), garantizando de esta manera el abastecimiento de la demanda de productos limpios o derivados del petróleo hasta el año 2030.

ANÁLISIS DE ESPESORES y CAMBIO DE POLARIZACIÓN				
TANQUE	Vc* (mm/año)	Vu* (años)	PSA* (mV)	Criterios de Protección Catódica del Acero
01 Gasolina Extra	0.099	20.8	94	No cumple
02 Gasolina Extra	0.13	16.8	100	Cumple
03 Gasolina Súper	0.181	13.7	122	Cumple
04 Gasolina Súper	0.178	18.6	110	Cumple
05 Diésel	0.122	18.3	57	No cumple
06 Diésel	0.163	16.2	54	No cumple
07 Slop	0.19	15.5	100	Cumple

Tabla 4: Resumen de cálculos realizados en los tanques.

* Velocidad de Corrosión = Vc; Vida Útil Estimada = Vu; Cambio de Polarización = PSA.

Protección catódica de la base de los tanques de acero para almacenamiento de combustibles

El Gráfico 1 muestra el principio de la protección catódica mediante un diagrama termodinámico potencial-pH. Basados en el criterio del cambio en la polarización de +/- 100 mV y en función del electrodo de referencia Cu/CuSO₄. Se puede afirmar que todos los tanques se encuentran protegidos contra la corrosión, ya que los potenciales OFF alcanzados satisfacen las condiciones de inmunidad; a excepción de los Tanques ATNK - 04 00 05 y ATNK - 04 00 06 utilizados para el almacenamiento de Diésel cuyos potenciales OFF medidos fueron de 0.47 y 0.49 V respectivamente. Sin embargo, este problema se lo puede solucionar aumentando la salida de corriente de protección de los rectificadores que interfieren en dichas estructuras. De 40 A, se puede incrementar hasta cerca de tres veces (90 A) la corriente de protección inicial aplicada, obteniéndose de esta manera una mejor respuesta en los resultados y los potenciales anómalos registrados.

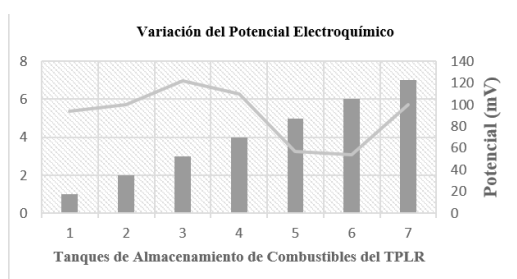


Gráfico 1. Variación del Potencial Electroquímico de 7 tanques respecto al Criterio de Protección Catódica del Acero +/- 100 mV (Cambio de Polarización).

Evaluación de rectificadores

Para la evaluación de los rectificadores se realizaron mediciones de fuerza electro motriz (FEM) que permitieron reconocer la capacidad operativa de los ánodos de sacrificio. La FEM promedio dio un valor aproximado de 1685 Mv (Tabla 5), demostrando que los ánodos seleccionados para la protección catódica de los tanques tiene excelente resistencia a la acidez y un elevado drenaje de corriente con una baja tasa de consumo en comparación con los sistemas tradicionales.

TANQUE	FEM (mV)
01 Gasolina Extra	1871
02 Gasolina Extra	1970
03 Gasolina Súper	1860
04 Gasolina Súper	1805
05 Diésel	1200
06 Diésel	1324
07 Slop	1765
MEDIA	1685

Tabla 2: Resistividad del Suelo del Terminal de Productos Limpios Riobamba

IV. CONCLUSIONES

La evaluación del sistema de protección catódica por corriente impresa en los tanques de almacenamiento de combustibles del Terminal de Productos Limpios de Riobamba, mediante la técnica de interrupción de la corriente determina que la mayoría de los tanques cumplen con el criterio de polarización de +100 mV, a excepción de los tanques de Diésel cuyo potencial promedio es 56 mV aproximadamente. Sin embargo, teniendo en consideración dicha excepción se puede concluir que el SPC es efectivo en la mayoría de los tanques. Para ello, se realizó un diagnóstico del estado actual de los tanques, midiendo el espesor en el fondo de dichas estructuras por

inspección ultrasónica. Con una velocidad de corrosión (0.152 mm/año) y el tiempo de vida útil (17.3 años) muy cerca de la norma. Mediante análisis físico-químico, se supo que el suelo presenta un índice de agresividad relativamente bajo (Resistividad promedio de 12 500 Ω /cm) conociendo que es un suelo árido fino con una humedad de 23,09% y un índice de plasticidad de 12,52%. Sin embargo, este problema se solucionó aumentando la

salida de corriente de protección (ICP) de los rectificadores/transformadores (R/T) que interfieren en dichas estructuras. De 40 A, se incrementó hasta 90 A la corriente de protección inicial aplicada, obteniéndose de esta manera una mejor respuesta en los resultados y los potenciales anómalos registrados.

Referencias

1. Adames Montero, Y., & Casas Vázquez, M., & Harriett, J., & Rizo Alvarez I. Soluciones alternativas para la protección interior de tanques. *Rev CENIC Ciencias Químicas*. 2010;41:1–11.
2. Sowards JW, Mansfield E. Corrosion of copper and steel alloys in a simulated underground storage-tank sump environment containing acid-producing bacteria. *Corros Sci*. 2014;87:460–71.
3. Armendáriz-Puente L-MA-PM-H, Orozco-Ramos J-M. Efecto de microorganismos en la corrosión de acero SAE 1080. *Perfiles*. 2017;1(17):25–31.
4. Carlos A. Melgarejo P. Iffmmsnrc. Study of the Corrosion Rate of an AISI-SAE 1020 Steel in a System Brine-oil-CO₂-H₂S by Using a Rotating Cylinder Electrode (ECR) and a Loop. *Sci Tech*. 2007;Año XIII,:151–6.
5. Baboian R, Scully JR, Dean SWJ. Corrosion Tests and Standards. *Corrosion Tests and Standards : Application and Interpretation*. 2005.
6. ASTM. Standard Guide for Calculating and Reporting Measures of Precision Using Data from Interlaboratory Wear or Erosion Tests 1. *Astm*. 2015;
7. Wang K, Varela FB, Tan MY. The effect of electrode surface area on corrosion initiation monitoring of X65 steel in soil. *Corros Sci [Internet]*. 2019;152(February):218–25. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.03.019>
8. Bu Y, Chen Z, Ao J, Hou J, Sun M. Study of the photoelectrochemical cathodic protection mechanism for steel based on the SrTiO₃-TiO₂ composite. *J Alloys Compd*. 2018;731:1214–24.
9. Lei J, Shao Q, Wang X, Wei Q, Yang L, Li H, et al. ZnFe₂O₄/TiO₂ nanocomposite films for photocathodic protection of 304 stainless steel under visible light. *Mater Res Bull [Internet]*. 2017;95:253–60. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.materresbull.2017.07.048>
10. Samboni N, Carvajal E, Escobar JC. Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Ing e Investig*. 2007;27(3):172–81.
11. Jazmín del R. Torres Hernández, Ebelia Del Angel Meraz LV. Evaluación de un sistema de protección catódica de un gasoducto enterrado. *Rev Latinoam Metal y Mater*. 2017;37(1):19–26.
12. Law DW, Nicholls P, Christodoulou C. Residual protection of steel following suspension of Impressed Current Cathodic Protection system on a wharf structure. *Constr Build Mater [Internet]*. 2019;210:48–55. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.135>
13. Bahadori A. Monitoring Cathodic Protection Systems. *Cathodic Corrosion Protection Systems*. 2014. 203–251 p.
14. Dobruchowska E, Gilewicz A, Warcholinski B, Libralesso L, Batory D, Szparaga L, et al. Al-Mn based coatings deposited by cathodic arc evaporation for corrosion protection of AISI 4140 alloy steel. *Surf Coatings Technol [Internet]*. 2019;362(November 2018):345–54. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.02.014>
15. Koefoed O. The direct interpretation of resistivity observations made with a wenner electrode configuration. *Geophys Prospect*. 1966;
16. Li Q, Zeng D, An M. Elevating the photo-generated cathodic protection of corrosion product

- layers on electrogalvanized steel through nano-electrodeposition. Chem Phys Lett [Internet]. 2019;722(November 2018):1–5. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2019.02.030>
17. Method ST. Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method 1. Current. 2001;
18. Meas Y. Técnicas electroquímicas para la medición de la velocidad de corrosión. Línea] Dispon En <Http//Depa Pquim Unam Mx/> 2003;
19. Criado M, Fajardo S, Valdez B, Bastidas JM. Aspectos cinéticos de la corrosión y fenómenos de pasividad. In: Corrosión y preservación de la infraestructura industrial. 2013.
20. NACE Standard TM. Measurement Techniques Related to Criteria for Cathodic Protection of Underground Storage Tank Systems. 2012 p. 1–29.
21. Haigh S. Consistency of the casagrande liquid limit test. Geotech Test J. 2016;