

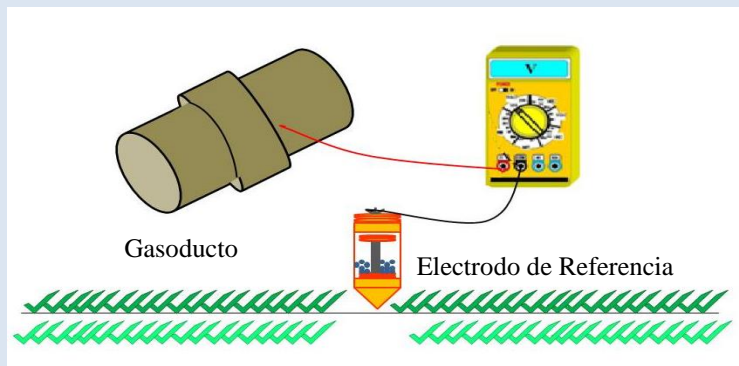
## EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA DE UN GASODUCTO ENTERRADO

*Jazmín del R. Torres Hernández<sup>1</sup>, Ebelia Del Angel Meraz<sup>1\*</sup>, Lucien Veleva<sup>2</sup>*

1: División Académica de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Km.1 Carretera Cunduacán - Jalpa de Méndez, Colonia la Esmeralda, c.p. 86600, Cunduacán, Tabasco, México.

2: CINVESTAV-IPN, Departamento de Física Aplicada Carr. Ant. a Progreso Km.6, Mérida 97319, Yucatán, México.

\*e-mail: [ebelia.delangel@ujat.mx](mailto:ebelia.delangel@ujat.mx)

**RESUMEN**

La evaluación del sistema de protección catódica (PC), aplicada al gasoducto (Samaria-Cumuapa), localizado en los municipios de Centro y Cunduacán (Tabasco, México), el cual transporta gas amargo a una presión de  $40 \text{ kg m}^{-2}$ , fue realizada durante cuatro meses. Las mediciones mensuales de los potenciales de PC del gasoducto, la resistividad y el pH del suelo, fueron llevados a cabo. Los resultados indicaron que en las zonas con vegetación pastizal los suelos presentan una corrosividad moderada. Sin embargo, en las zonas con terrenos bajos y más húmedos, la corrosividad de sus suelos es de un nivel mayor y fueron clasificados como corrosivos. Debido a estas diferencias, se consideró que el gasoducto no fue adecuadamente protegido con el sistema de PC, por lo que presenta corrosión en las zonas con suelos más corrosivos. La evaluación llevó a proponer un nuevo diseño de la PC, con la instalación de camas anódica adicionales de grafito, para extender la vida útil del gasoducto y disminuir los riesgos por una explosión que podría impactar al medioambiente y pérdidas de vidas humanas. Con los cálculos del rediseño se optimizará y mejorará la vida útil de los ductos para reducir el consumo de energía eléctrica, personal técnico, etc.

*Palabras Claves:* suelos, corrosividad, ducto enterrado, protección catódica.

**ASSESSMENT CORROSIVITY SOILS ALONG A PIPELINE BURIED WITH A CATHODIC PROTECTION SYSTEM.****ABSTRACT**

The evaluation of cathodic protection systems (CP), applied on pipeline (Samaria-Cumuapa) located in the municipalities of Centro and Cunduacán (Tabasco, Mexico), which transports sour gas at a pressure of  $40 \text{ kg m}^{-2}$ , was carried out during four months. The monthly measurements of CP potentials of the pipeline, the resistivity and the pH of the soil were carried out. The results indicated that in areas vegetated grassland soils have a moderately corrosivity. However, in areas with low and wettest land, the corrosiveness of the soil is of one higher level and they were classified as corrosive. Because of these differences, it was considered that the pipeline has not been protected properly with CP system, and as consequence it presents corrosion in the areas with more corrosive soils. The evaluation led to propose a new design of the PC, including the installation of additional anodic beds of graphite, in order to extend the life of the pipeline and reduce risks by an explosion that could impact the environment and loss of human life. With calculations redesign is optimize and improve the shelf life of products to reduce power consumption, technical personnel.

*Keywords:* soils, corrosivity, buried pipeline, cathodic protection.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los materiales metálicos de construcción, una vez expuestos al ambiente de servicio, sufren deterioro irreversible con el paso del tiempo, debido a su interacción fisicoquímica espontánea con el medio ambiente que los rodea [1]. Esta destrucción se debe al fenómeno corrosión electroquímica, cuando el ambiente presenta humedad y este proceso es un factor que determina la vida útil de la estructura metálica. Puesto que es prácticamente imposible eliminar dicho deterioro, la única manera es controlarlo, obteniendo conocimientos de su origen y mecanismo, y a base de ello aplicar métodos de protección adecuados contra la corrosión. Una gran parte de las construcciones metálicas (acueductos, gasoductos, oleoductos, cables metálicos de comunicaciones, tanques, tuberías de agua potable, etc.) están bajo suelo, donde el ambiente agresivo es la tierra, con sus propiedades fisicoquímicas y otros parámetros determinantes, como contaminantes específicos. Por tales razones es muy importante durante el período de diseño de una estructura evaluar la agresividad corrosiva de los suelos en los cuales se expondrá [2,3]. Por lo tanto, es necesario contar con información detallada para prevenir la corrosión en suelos: reconocer el deterioro de la estructura, naturaleza del acero y la severidad del medio ambiente, para diseñar una protección anticorrosiva apropiada [4].

Antes de 1900 se asumía que la corrosión en el suelo es causada por la corriente vagabunda (en inglés *stray current*), una corriente eléctrica que fluye a través de circuitos distintos de los previstos, la cual es responsable de la corrosión de las estructuras metálicas bajo tierra. La gravedad de la corrosión debida a la agresividad del suelo fue reconocida por los EE.UU. en un Congreso en 1910. En este tiempo, The National Bureau of Standards dirigió un estudio de la corrosión causada por la corriente eléctrica vagabunda y recomendó métodos para su mitigación. Después de diez años de extensa investigación se concluyó que la corrosión más severa es resultado de la corriente vagabunda, sin embargo, la corrosión igualmente ocurre bajo circunstancias que excluyen a la corriente vagabunda debido a la agresividad del suelo [5]. La presencia de la corriente vagabunda requiere su atención y ha sido objetivo de estudios [6].

La corrosión en el suelo a veces puede llevar a

consecuencias desastrosas. Por ejemplo, en las líneas industriales de transmisión de petróleo y gas (tuberías de gasoductos y oleoductos), las fallas por corrosión como picaduras y perforaciones, debidas al ataque corrosivo del suelo, usualmente causan derrame, fuego o explosión de los productos que son transportados y con ello la contaminación del medio ambiente, y pérdidas económicas muy costosas. Por lo tanto, es necesario el uso de métodos correctos, para la evaluación y predicción de la agresividad corrosiva del suelo y su capacidad de producir corrosión, de manera que al realizar las mediciones necesarias se puedan prevenir accidentes de grandes consecuencias, tomando medios de protección anticorrosiva apropiados [7]. Desafortunadamente, la agresividad del suelo está influida por varios factores que interactúan de una manera complicada [8]. Las condiciones en la tierra pueden depender fuertemente de las condiciones atmosféricas. A veces el deterioro del metal puede parecer al de una corrosión atmosférica (en suelos rígidos, no muy húmedos), llegando hasta una corrosión de metal totalmente sumergido en agua, cuando la humedad del suelo es muy alta en épocas de lluvias, existencia de ríos subterráneos [9].

Los factores más importantes que controlan los niveles de la agresividad corrosiva del suelo [10,11], que deben ser considerados por los ingenieros durante el periodo de diseño de una estructura subterránea son: tipo y estructura del suelo; contenido de humedad; contenido de oxígeno; resistividad del suelo; concentración de iones solubles (cloruros, sulfatos, nitratos, nitritos); pH (acidez) del suelo; dureza total (contenido de  $\text{CaCO}_3$ ); materia orgánica soluble en agua.

Los métodos generales para la prevención de la corrosión en suelos consisten en interferir de alguna manera el fenómeno de la corrosión y detener su desarrollo. Las formas más comunes de prevención del fenómeno corrosión [12] son: a) tratamiento del medio ambiente; b) mejoramiento de la resistencia a la corrosión del material metálico; c) protección catódica; d) aislamiento del metal del medioambiente (protección pasiva).

La protección catódica es uno de los métodos más efectivos para el control de la corrosión de tuberías enterradas o sumergidas [13-16]. Cualquier ducto o estructura, debe protegerse catódicamente en toda su longitud, de acuerdo con los criterios establecidos, a menos que se tenga un estudio

técnico que indique que puede utilizarse otro tipo de protección adicional al recubrimiento dieléctrico [17].

En México, en el Estado de Tabasco (Golfo de México), que forma parte del clima tropical húmedo, el suelo se caracteriza por ser de tipo Gleysoles y Fluvisoles [18,19] y estos tienen gran capacidad para retener agua. En los últimos años en forma muy intensiva se construyen obras subterráneas, entre las cuales se destacan las instalaciones de ductos de compañías petroleras que transportan hidrocarburos. Por otro lado, debido a las específicas del suelo y la existencia de pozos de petróleo en esta región, es muy importante la realización de un estudio detallado sobre la agresividad corrosiva del suelo, ya que la vida útil de algunas estructuras metálicas subterráneas es corta debido a la corrosión. Un adecuado sistema de PC puede disminuir en un 96,3%, el efecto corrosivo del electrolito [6].

No se han realizado estudios de este tipo en el Estado de Tabasco y sin duda, sería muy valioso para los constructores y diseñadores de proyectos estructurales. El presente trabajo tiene por objeto evaluar el sistema de protección de ductos para el transporte de gas amargo, que fueron enterrados en el año de 1978, para lo cual se realizaron estudios a lo largo de 4 km de una tubería enterrada en Samaria-Cumuapa, localizada en la carretera Villahermosa-Cárdenas y en la Ranchería Cumuapa sección San Eligio, ubicada en los municipios de Centro y Cunduacán, del Estado de Tabasco en México, con el fin de optimizar su sistema de protección anticorrosiva con un diseño adicional de protección catódica..

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

### 2.1 Localización de los sitios del ensayo y caracterización del suelo

El gasoducto, objetivo de este estudio, está localizado al sur del Estado de Tabasco de México, en el paralelo derecho de vía de la Carretera Villahermosa – Cárdenas, con latitud de origen del gasoducto 18°00'01.64''N, 93°05'37.62''O y con latitud final de 17°58'33.58''N, 93°07'49.78''O, a 51,53 km del Golfo de México. Esta zona se ubica en los poblados de Samaria y la Ranchería Cumuapa (Sección San Eligio) y abarca los municipios de Centro y Cunduacán de Tabasco. Esta área geográfica es de clase 1 y 2, de acuerdo a

la clasificación de Norma NFR-047-PEMEX (2007) [17], lo que significa que depende del número de viviendas destinadas a ocupación humana dentro del área unitaria, la cual es de 1,6 km de longitud por 0,40 km de ancho; la clase 1 es de 10 viviendas máximas y clase 2 es de 46 viviendas. La región es importante para el estado, debido a la compleja red de tuberías de transporte de hidrocarburos que se localizan en la sección del derecho de vía, por lo que se ha elegido para realizar el presente estudio. El sistema de protección catódica (PC) fue construido y puesto en operación en el año 1978, y ha sufrido deterioros de forma natural y por la mano del hombre, por lo que fue necesario hacer una revalidación de la ingeniería de diseño del sistema de su protección anticorrosiva, motivo sustancial de este trabajo, el cual comprende las consideraciones descritas en la Tabla 1, como requisitos de la norma NFR-047-PEMEX (2007) [17].

Para definir el término suelo podemos adoptar la siguiente definición: "Suelo representa todo tipo de material terroso, desde un relleno de desperdicio hasta areniscas parcialmente cementadas o lutitas suaves. De esta definición quedan excluidas las rocas sanas, ígneas o metamórficas y los sedimentos altamente cementados, que no se ablanden o desintegren rápidamente por acción de la intemperie" [20]. La relación que guarda la estructura del suelo y la corrosión del acero enterrado en él, depende de su permeabilidad a la humedad y al oxígeno, la cual es determinada por la distribución y tamaño de sus partículas. Por ejemplo, para suelos con una textura ordinaria, como arenas y gravas, la circulación del aire es relativamente libre y de este modo la velocidad de corrosión puede ser semejante a la de un metal expuesto directamente a la atmósfera.

### 2.2 Potenciales medidos a lo largo del ducto

La toma de potenciales se realizó usando como electrodo de referencia Cu/CuSO<sub>4</sub> con un multímetro digital de impedancia de entrada de 10 MΩ, exactitud de ±1 porcentaje +1, sensibilidad de 2V y resolución de 0,0001V. El polo positivo del multímetro se conectó al poste y el polo negativo se conectó al electrodo de referencia.

### 2.3 Resistividad y pH del suelo en el sitio de estudio.

El comportamiento de algunos parámetros

meteorológicos durante el estudio fueron los siguientes [21]: Precipitación pluvial en el rango de 158,7 a 255,5 mm; la temperatura media fue de 28,8 a 34,5°C y la humedad relativa del aire fluctuó en el rango de 75 al 90%.

La resistividad del suelo fue evaluada con el método de Wenner de 4 electrodos, según ASTM G 57 -2012 [22], utilizando el equipo Nilsson Modelo 400 4-Pin Soil Resistence Meter. Este equipo puede medir resistividades en un rango de 0,01 Ω hasta 1,1 mΩ, e induce una corriente eléctrica al suelo a través de 2 electrodos opuestos. Los barras de acero de 0,45 cm de diámetro y de 30 cm de longitud, fueron enterrados a una profundidad de 15 cm y a una distancia de 1,60 m a cada 500 m a lo largo de los 4 km de la tubería, lo que permitió obtener una información y visión muy completa al respecto de la variación de la resistividad del suelo a lo largo del gasoducto. En base a los valores obtenidos, las

muestras de suelo se clasificaron de acuerdo a la Tabla 2 [22].

La determinación del potencial de hidrógeno (pH), se realizó según el procedimiento descrito en la norma ISO 10390-2005, el procedimiento consistió en tomar una muestra de 100 gramos del suelo y disolverlo en 100 mililitros de agua; luego, mezclar vigorosamente durante 10 minutos, introducir el electrodo de pH y esperar a que se estabilice la lectura.

### 2.4 Inspección de rectificadores

Las pruebas de alcance de potenciales eléctricos de los rectificadores se realizaron con el sistema de ON/OFF que consistió en apagar un rectificador y evaluar los que estaban en función, esto fue aplicado para cada rectificador de acuerdo a la norma NFR-047-PEMEX (2007) [17].

**Tabla 1.** Información necesaria para el diseño o rediseño de un sistema de protección catódica según la norma NFR-047-PEMEX (2007).

<i>Datos</i>	
Fecha de construcción: Enero 1978	Tipo y calidad del recubrimiento anticorrosivo dieléctrico: alquitrán de hulla
Cruces encamisados: no se detectaron cruces de encamisados.	Posibles fuentes de interferencia: torres de conducción eléctrica de CFE cercanas al derecho de vía.
Especificaciones de la tubería, conexiones y otros accesorios: API-5L-X52	Condiciones especiales del ambiente: periodos de humectación constante durante todo el año.
Instalaciones adyacentes, cruces entre tuberías interconexiones: tuberías adyacentes diversos diámetro	eAccesibilidad a las áreas de trabajo: Accesible
Aislamientos eléctricos y puentes eléctricos: existen dispositivos de aislamiento eléctrico y no cuentan con puentes eléctricos a otras estructuras.	Factibilidad de aislamiento eléctrico de las estructuras vecinas: no comparte corriente con otras estructuras.
Uso y ocupación del suelo: en su mayoría el suelo es de uso agrícola.	Pruebas de requerimiento de corriente y número total de puntos de drenaje: dos requerimientos y dos puntos de drenaje de corriente.
Perfil de resistividad del suelo: la resistividad del suelo tiene un rango de poco corrosivo a corrosivo.	Estadística de fallas de la tubería y perfil de potenciales: no se tiene la estadística de fallas disponible y el perfil de potenciales.
Característica del rectificador	Monofásica de media onda
Corriente aplicada	-0,850 V
Característica de la cama anódica.	3 camas anódica con ánodos galvánicos.

**Tabla 2.** Agresividad corrosiva en función a la resistividad.

Suelo	Resistividad
Corrosividad	$\rho$ ( $\Omega$ -cm)
Altamente corrosivo	0-1000
Corrosivos	1001-5000
Poco corrosivo	5001-10000
Muy poco corrosivo	10000 en adelante

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 Potenciales medidos a lo largo del ducto protegido con protección catódica (PC)

La Tabla 3, presenta un resumen de los valores de los potenciales de PC medidos en los diferentes puntos de interés a lo largo del ducto con el electrodo de referencia de Cu/CuSO<sub>4</sub>, durante el periodo de 4 meses. Como se puede observar, en los diferentes puntos (km) el potencial aplicado tiene diferentes valores en el intervalo de -0,821 V hasta -1,425 V (desviación estándar de 0,518), mientras que en algunas ocasiones se encontraba por debajo del valor -0,850 V que se requiere para la PC. Por otro lado, los valores medidos (Tabla 3) en varios puntos (km) alcanzan voltajes de 1,000, lo que conlleva a una fuerte evolución del gas de hidrógeno (H<sub>2</sub>) y su incorporación en la superficie del acero de la tubería (fragilidad por hidrógeno), que es un proceso muy peligroso y con consecuencia de pérdida de propiedades mecánicas y desarrollo de micro-grietas en el gasoducto. En la Tabla 4 se muestran los resultados de la inspección del rectificador A ubicados en el km 0+000, rectificador B ubicado en el km 1+500 y el rectificador C ubicados en el km 0+000, donde indica que el rectificador del km 4+000 (C) es el que proporciona mayor eficiencia.

#### 3.2 Resistividad del suelo

La resistividad del suelo (R) al paso de la corriente eléctrica es el parámetro más utilizado para determinar la agresividad corrosiva del suelo. La R está relacionada con tres términos en la ecuación siguiente:

$$R = \rho \cdot l/A \quad (1)$$

donde  $\rho$  es la resistencia específica del suelo particular,  $l$  es la longitud del camino eléctrico medido y  $A$  es el área de la sección transversal de los electrodos-pines.

**Tabla 3.** Valores del potencial de PC aplicado al gasoducto.

Valores de potenciales medidos (V) con electrodo de referencia de Cu/CuSO <sub>4</sub>				
km	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre
0+000	-0,997	-1,002	-0,960	-0,826
1+500	-1,322	-1,31	-0,862	-1,31
4+000	-1,425	-0,821	-1,01	-1,01

**Tabla 4.** Inspecciones del rectificador ON/OFF.

	Rectif. ON	Rectif. A: OFF	Rectif. B: OFF	Rectif. C: OFF
Potencial tubo/suelo	A: -0,997 B: -1,322 C: -1,425	A: 0,826 B: -1,310 C: -1,010	A: 0,960 B: -0,862 C: -1,010	A: 1,002 B: -1,310 C: -0,821
Eficiencia de cama anódica V/I	A: 0,609 B: 0,605 C: 0,727	A: 0 B: 0,609 C: 0,725	A: 0,664 B: 0 C: 0,734	A: 0,614 B: 0,601 C: 0

La resistividad indica la probable corrosividad del suelo y sus valores dependen de la cantidad de agua (humedad) que contienen las capas del suelo y sus tipos (arena, grava, limo, arcilla y materia orgánica o combinaciones de estos). Una homogeneidad vertical en los suelos no existe. Por lo tanto, siempre el suelo se considera como no uniforme y formado de diferentes capas.

La Tabla 5 presenta los valores de la resistividad del suelo, obtenidos en campo en los puntos de estudio a lo largo del gasoducto, y la agresividad corrosiva de los suelos asignada en base de las clasificaciones dadas en la Tabla 2. Las zonas con vegetación pastizal fueron suelos poco corrosivos de potenciales menos negativos, mientras que los terrenos húmedos en zonas bajas, mostraron mayor corrosividad, debido a una menor resistividad del suelo en estos sitios, que da la posibilidad para el desarrollo del proceso de corrosión con una mayor velocidad con desviación estándar de 1,616. De esta manera, si el gasoducto no ha sido protegido

adecuadamente con PC (potenciales menores del establecido o muy negativos) el gasoducto se

corroe y/o está predispuesto a fragilidad y microgrietas.

**Tabla 5.** Valores de resistividad ( $\rho$ ) del suelo obtenidos en diferentes puntos (km) a lo largo de los 4 km del gasoducto.

<i>Valores medidos de resistividad de suelo</i>			
Puntos (km)	Resistividad $\rho$ ( $\Omega$ . cm)	Observaciones del tipo de terreno	Corrosividad del suelo basada en el valor de $\rho$
0,000	3,806	Terreno húmedo, zona baja	Corrosivo
0,500	6,704	Zona con vegetación pastizal	Poco corrosivo
1,000	6,480	Zona con vegetación pastizal	Poco corrosivo
1,500	3,648	Terreno húmedo, zona baja	Corrosivo
2,000	8,991	Zona con vegetación pastizal	Poco corrosivo
2,500	7,892	Zona con vegetación pastizal	Poco corrosivo
3,000	5,988	Zona con vegetación pastizal	Poco corrosivo
3,500	3,896	Terreno húmedo, zona baja	Corrosivo
4,000	3,862	Terreno húmedo, zona baja	Corrosivo

### 3.3 pH del suelo

La Tabla 6 presenta los valores de pH medidos en los puntos de interés a lo largo de 4 km del ducto protegido con PC. Estos puntos tienen características presentadas en la Tabla 5: parte de ellos son zonas con vegetación pastizal, mientras los otros son terrenos húmedos (zonas bajas). De acuerdo al pH del suelo (Tabla 6), obtenido en los diferentes sitios de medición, se puede notar que los terrenos húmedos (zonas bajas) presentan valores de  $4,62 \pm 0,3$  ligeramente ácidos. Sin embargo, las zonas con vegetación pastizal tienen suelos con mayor pH (menos ácido) con incertidumbre de  $4,68 \pm 0,4$ , lo que hace estos sitios menos corrosivos o con corrosividad moderada (Tabla 5).

### 3.4 Rediseño del sistema de protección catódica (PC)

Los resultados obtenidos (Tabla 5) para los valores de potenciales, resistividad del suelo y pH de éste en los sitios que fueron caracterizados a lo largo de 4 km del gasoducto, permitió detectar las zonas con mayor riesgo para la corrosión y tomar medidas. Por ejemplo, se decidió instalar camas anódicas, utilizando como material relleno de

grafito o carbón de coque pulverizado, para una mejor distribución de la corriente catódica, proveniente del sistema de PC a lo largo del gasoducto en los terrenos húmedos y las zonas bajas, que fueron clasificados como suelos corrosivos. El nuevo diseño de PC, de acuerdo al procedimiento de la norma NRF- 047-PEMEX (2007), tiene como objetivo comprometerse con una vida útil de 20 años, considerando el uso de un número mayor de 18 ánodos. Cada uno de los ánodos tendrá una superficie de  $0,200 \text{ m}^2$  con masa anódica de 15 kg, para proteger un área total del ducto de  $958,188 \text{ m}^2$ , aplicando una corriente catódica de 13,175 A, la que sería un equivalente a un potencial catódico de  $-0,850 \text{ V}$ . Según el nuevo diseño a cada 3 m deberá instalarse un ánodo y de esta forma el aumento del número de ánodos favorecería una mejor distribución del potencial catódico a lo largo del ducto. El tipo de aislamiento de los cables anódicos y catódicos deberá ser de doble forro de polietileno negro de alta masa molecular, con el cual se alcanzará un aislamiento mínimo de 600 V, con una cubierta de PVC negra.

La Figura 1 muestra un esquema del diseño propuesto de PC para el gasoducto estudiado: la conexión de los ánodos de grafito a los rectificadores; las dos camas anódicas compuestas

de 9 ánodos de grafito con conexión al centro de aluminotermia con impregnación de cera microcristalina, la que inhibirá la penetración de humedad, evitando la descomposición mecánica y química de los ánodos.

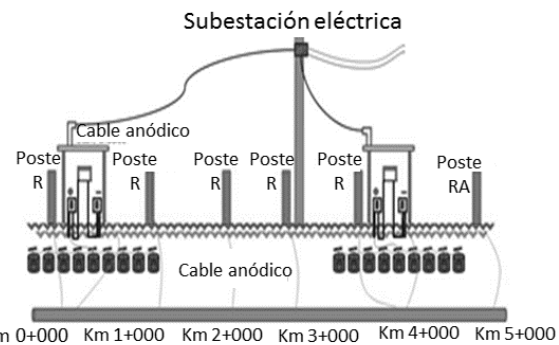
**Tabla 6.** Valores del pH de los suelos en los sitios de estudio.

Puntos (km)	pH
0,000	4,62
0,500	4,68
1,000	4,71
1,500	4,92
2,000	5,03
2,500	4,75
3,000	5,12
3,500	4,97
4,000	4,61

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio es conveniente colocar dos rectificadores,

que se ubicarán en el km 0,000 y km 4,000 con capacidad de 380 V cada uno, con alimentación trifásico de onda completa (4 diodos), que proporcionará una eficiencia de 96,5% por cada rectificador. La capacidad del transformador deberá ser de 13,921 kV y este será controlado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) de México.

Para calcular el área que se desea proteger, se requieren datos de los siguientes cálculos (Tabla 7) usando las ecuaciones de la norma NFR-047-PEMEX (2007) [17].



**Figura 1.** Propuesta de diseño para protección catódica por corriente impresa del gasoducto Samaria-Cumuapa.

**Tabla 7.** Cálculos necesarios para el rediseño de protección catódica.

Ecuaciones de protección catódica		
Corriente necesaria	$I = A^B * I_d$	I: 13,175 A
Masa anódica	$W = I * \text{Años}$	W: 263,501
Numero de ánodos	$N = W / \text{masa del ánodo}$	N: 18
Voltaje de corriente directa	$V = R_t I$ $R_t = R_h$	V=243,633
Resistencia del ánodo en posición horizontal	$R_h = \frac{0.015p}{L} 2.3 \log \frac{4L^2 + 4L \sqrt{S^2 + L^2}}{dS} + \frac{S}{L} - \frac{\sqrt{S^2 + L^2}}{L} - 1$	Rh=10,878Ω
Capacidad del transformador	$C = \frac{I}{V \sqrt{1000}}$	C=3,210 kV A

Los postes tipo R serán ubicados en los kilómetros: 0,000, 1,00, 2,000, 3,000, 4,000 y un poste tipo RA en el km 5,00, de acuerdo a lo establecido de la norma NRF-047 –PEMEX (2007). En el diseño

antiguo solo se encontraban 3 postes tipo R y 1 poste tipo RA.

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio indican que el suelo, a lo largo del gasoducto en el Estado de Tabasco (Tabasco, México), presenta diferentes agresividades corrosivas, debido a las específicas de las zonas. En los suelos con vegetación pastizal los potenciales catódicos aplicados por la PC fueron menos negativos y el suelo presenta una mayor resistividad (5,99 – 8,99  $\Omega$ .cm), los suelos tuvieron menor resistividad (3,81 – 3,90  $\Omega$ .cm), los potenciales registrados del gasoducto fueron más negativos (posibilidad para fragilidad por hidrógeno en la tubería) y la corrosividad de estos sitios fue clasificada como corrosiva, una nivel mayor que la de los pastizales. Debido a estas diferencias, se consideró que el gasoducto no ha sido protegido adecuadamente con PC. En conclusión se llevó a la instalación de camas anódicas adicionales con relleno de grafito, con el objetivo extender la vida útil del ducto con PC y disminuir los riesgos por una explosión que podría impactar al medio ambiente y pérdidas de vidas humanas.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por las facilidades para realizar este proyecto.

#### 6. REFERENCIAS

- [1]. Raichev R, Veleva L, Corrosión de metales y degradación de materiales, Baja California, (México) ltd., 2009, p. 89-95.
- [2]. Veleva L, Ceh W, Corrosividad de metales en suelos: Agresividad corrosiva del suelo 3ra Ed. (México) Ltd, 2005, p. 119-132.
- [3]. Veleva L, Soils and Corrosion in Corrosion Tests and Standards: Application and Interpretation. 4ta Ed. D.F (México) Ltd., 2009, p. 387-404.
- [4]. Medina R, La corrosión y protección catódica como método de control en oleoductos, gasoductos, tanques de almacenamiento y tuberías en general 3rd. ed. México: Ltd., 2007. p. 23-53.
- [5]. Randy H, Polym. Sci. B: Polym. Phys. 2003; 17(2), 159-174.
- [6]. Vera, E. Villarreal, J. y Paquevera, J. "Procesos de corrosión debido a corrientes alternas inducidas". Revista de Metalurgia, 1996; 32, (5): 287-292.
- [7]. Annual Book of ASTM Standards, 4ta. Ed. Mexico: Wear and Erosion; Ltd., 2003, (Cap.3).
- [8]. Chaker V, Corrosion Testing in Soil - Past, Present, and Future, in Corrosion Testing and Evaluation: Silver Anniversary, ASTM STP 1000, R. Baboian and S. W. Dean, Eds., D. L.
- [9]. Sastri S, "Corrosion prevention and protection". London Jhon Wiley, 2da ed. Wiley 2007, p 100-106
- [10]. Richard E, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 2010; 5 (115): 373-392
- [11]. Norma ASTM STP 1013 Statistical Analysis of Soil Characteristics to Predict Mean Time to Corrosion Failure of Underground Metallic Structures, in Effect of Soil Characteristics on Corrosion, Philadelphia (EE.UU.): 1989.
- [12]. Deflorian L, Bonora P, "Influence of photo-oxidative degradation on the water barrier and corrosion protection properties of polyester paints", Corrosion Science, 1996, 38 (10): 1697-1708.
- [13]. NACE, International –Cathodic Protection Technician Course Manual, systems de protection cathodic. National Association of Corrosion Engineers, 2006, p. 75-78.
- [14]. Lazo A, Rehabilitación y mantenimiento a los sistemas de protección catódica y protección interior de los ductos, Manual de Capacitación Instituto Mexicano del Petróleo, 2007, p.17-19.
- [15]. González et al. Relación entre la protección catódica y el diagnóstico de DCVG, Boletín IIE, Julio-Septiembre, 2007; p. 109-116.
- [16]. Velázquez et al, Polym. Sci. B: Polym. Phys, 2011; 47 (3): 244-261.
- [17]. NFR-047-PEMEX, Diseño, instalación y mantenimiento de los sistemas de protección catódica, México: Norma de referencia vigente, 2007.
- [18]. Gutiérrez C, Zavala J, Polym. Sci. B: Polym. Phys. 2003; 20, (2): 101-111.
- [19]. Palma D, Cisneros D, Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco, 2000; 1 (2): 32-41.
- [20]. Frederick S, Manual de Ingeniero Civil, 4a Edición, McGraw Hill, (México): 2001, p. 5-55.
- [21]. Izquierdo R, Quintero M, Atlas de riesgo del municipio centro, Secretaria de Desarrollo Social y Ayuntamiento Municipal 1ra Edición., 2009, p. 10-12.
- [22]. ASTM G 57- 06, Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode, 2012, p. 6-9.