

Monitoreo y control de daño en ductos enterrados utilizando TDR

Ernesto Orduña Reyes

Instituto Mexicano del Petróleo
Eje Central Lázaro Cárdenas No. 152 C.P: 07730
México D.F.
eorduna@imp.mx

Palabras Clave: TDR, corrosión, pH, suelo, ducto.

Resumen: La preocupación por la corrosión en tuberías o ductos enterradas ha ido en aumento con el transcurso del tiempo, debido al envejecimiento de la protección mecánica de los ductos, el cual da como resultado defectos en el recubrimiento, dejando expuesto el metal en suelo corrosivo, en el que se encuentran alojados los ductos. Si no existen niveles de protección catódica adecuados, se propicia el fenómeno de corrosión en estos, originando fallas inesperadas en los ductos, incrementando a su vez los costos de mantenimiento y reparación, así como la disminución en la seguridad durante la operación, tanto para los trabajadores como para las comunidades cercanas a las instalaciones de los ductos.

La técnica de predicción de la corrosión utilizando Reflectómetro en el Dominio del Tiempo (TDR), permite localizar los defectos del recubrimiento en ductos enterrados (los cuales son sitios potenciales de corrosión). Sin embargo, toda esta información adquiere una mayor relevancia, cuando se correlaciona con las condiciones de operación de los sistemas de protección catódica, para poder emitir recomendaciones que conduzcan a la mitigación o erradicación de los problemas de corrosión, aunados a una buena operación de los mismos.

I.- Introducción:

Las características del suelo están determinadas por su composición química y sus propiedades físicas. Para que un suelo sea corrosivo, algunas condiciones deben

cumplirse para que se lleve a cabo una reacción electroquímica: debe haber oxígeno presente (o bacterias anaerobias), humedad y sales solubles del propio suelo.

Los factores más comunes para controlar el nivel de corrosividad de una masa de suelo son: oxígeno, sales disueltas y elementos formadores de ácidos. Las pruebas que en corrosión deben realizarse para evaluar el nivel de agresividad corrosiva del suelo, incluyen la medición del pH, medidas de cloruros y sulfatos, resistividad total, acidez total y el potencial REDOX. Sólidos volátiles y otras especies también son medidos, dependiendo de las aplicaciones específicas.

En el caso del ducto bajo estudio, interesa conocer el nivel de agresividad del suelo, con el propósito de evaluar el riesgo potencial de corrosión que este representa, así como la uniformidad o distribución relativa de las propiedades a lo largo de los ductos y las posibles interferencias presentes en donde hay cruces con otros ductos ajenos a los derecho de vía [1].

El pH es una propiedad química del suelo que tiene un efecto importante en el desarrollo de los seres vivos (incluidos microorganismos y plantas). La lectura de pH se refiere a la concentración de iones hidrógeno activos (H^+) que se da en la interfase líquida del suelo, por la interacción de los componentes sólidos y líquidos. La concentración de iones de hidrógeno es fundamental en los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo.

El valor de pH es el logaritmo del recíproco de la concentración de iones hidrógeno, que se expresa por números positivos del 0 al 14. Tres son las condiciones posibles del pH en el suelo: la acidez, la neutralidad y la alcalinidad.

Debido a que el pH del suelo es medido en una matriz acuosa como agua o una solución de sales diluidas, es dependiente del grado de dilución (relación suelo-dilución). Cuando se mide en agua es importante controlar el agua adicionada, ya que un aumento causará un incremento en pH; por ello es necesario mantener la relación constante y tan baja como sea posible [1].

En suelos contaminados con hidrocarburos la interferencia va a depender de la concentración y tipo de hidrocarburo, se puede producir desde una simple iridiscencia sin afectar la determinación, hasta un impedimento de la determinación por la alta concentración y viscosidad del contaminante.

II.- Suelo, Humedad y pH

El agua es esencial para todos los seres vivos porque en forma molecular participa en varias reacciones metabólicas celulares, actúa como un solvente y portador de nutrimentos desde el suelo hasta las plantas y dentro de ellas. Además, intemperiza las rocas y los minerales, ioniza los macro y micronutrientes que las plantas toman del suelo, y permite que la materia orgánica sea fácilmente biodegradable. El contenido de agua en el suelo puede ser benéfico, pero en algunos casos también perjudicial.

El exceso de agua en los suelos favorece la lixiviación de sales y de algunos otros compuestos; por lo tanto, el agua es un regulador importante de las actividades físicas, químicas y biológicas en el suelo.

Aunque es recomendable determinar la humedad a la capacidad de campo de los suelos, es decir, la cantidad de humedad que un suelo retiene contra la gravedad, cuando se deja drenar libremente; en algunas ocasiones, cuando se trata de suelos contaminados, por ejemplo con hidrocarburos del petróleo, es difícil llevar a cabo esta medición por la dificultad de rehidratar suelos secos con estas características. Por lo que la medición de humedad se realiza sólo en función del porcentaje de agua que retiene este tipo de suelos.

Categoría	Valor de pH
Fuertemente ácido	< 5.0
Moderadamente ácido	5.1 - 6.5
Neutro	6.6 - 7.3
Medianamente alcalino	7.4 - 8.5
Fuertemente alcalino	8.5

La conductividad eléctrica es la capacidad de una solución acuosa para transportar una corriente eléctrica, que generalmente se expresa en m mhos/cm o en m Siemens/m; Es una propiedad de las soluciones que se encuentra muy relacionada con el tipo y valencia de los iones presentes, sus concentraciones total y relativa, su movilidad, la temperatura del líquido y su contenido de sólidos disueltos. La determinación de la conductividad eléctrica es por lo tanto una forma indirecta de medir la salinidad del agua o extractos de suelo.

De acuerdo con los valores de conductividad eléctrica, pH y porcentaje de sodio intercambiable, los suelos se pueden clasificar en las siguientes categorías:

a) Suelos salinos. Se caracterizan porque su extracto de saturación tiene un valor de conductividad eléctrica igual o superior que 4 mmhos/cm a 25°C y la cantidad de sodio intercambiable es menor de 15%. Por lo general tienen una costra de sales blancas, que pueden ser cloruros, sulfatos y carbonatos de calcio, magnesio y sodio.

b) Suelos sódicos. Presentan un color negro debido a su contenido elevado de sodio. Su porcentaje de sodio intercambiable es mayor que 15, el pH se encuentra entre 8.5 y 10.0, y la conductividad eléctrica está por debajo de 4 mmhos/cm a 25°C.

c) Suelos salino-sódicos. Poseen una conductividad eléctrica de 4 mmhos/cm a 25°C, una concentración de sodio intercambiable de 15% y el pH es variable, comúnmente superior a 8.5.

La conductividad eléctrica se puede complementar con la determinación de Na⁺ o bases intercambiables (K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺,

Na+). Principalmente si los suelos fueron contaminados con aguas congénitas.

La temperatura afecta la conductividad y varía alrededor de 2% por cada grado Celsius. Para esta determinación no se permite la preservación química de las muestras.

En la Fig. 1 y Fig. 2, se presentan los resultados obtenidos de potencial REDOX y de la resistividad de suelo respectivamente. La Fig. 1 presenta los valores de potencial REDOX en función de la distancia, obtenidos en diferentes puntos a lo largo de un trayecto de la tubería, se puede observar que estos presentan una tendencia alta en los valores de potencial REDOX, en todo el Derecho de Vía (DDV). En la grafica están indicadas las fronteras de clasificación de agresividad, en función de los valores REDOX y se observa de manera general que se encuentran en la zona de no susceptibilidad, lo que indica que son potencialmente no susceptibles para la formación de bacterias que propicien la corrosión microbiológica [1].

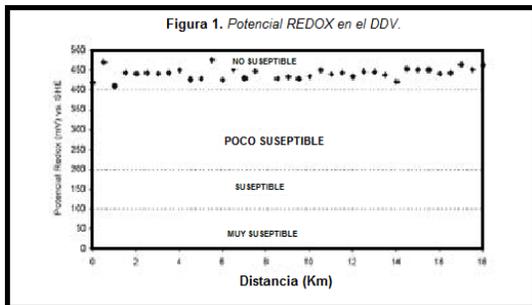


Figura 1: Potencial Redox

La Fig. 2 presenta los valores de resistividad en función de la distancia, obtenidos en diferentes puntos a lo largo del trayecto del ducto en el DDV. Se puede observar que los valores obtenidos, a diferencia de los valores de potencial REDOX, no presentan una tendencia y se encuentran dispersos a lo largo de la trayectoria. En la grafica nuevamente están indicadas las fronteras de clasificación de agresividad, en función de la resistividad del suelo, presentándose la mayoría de los valores, en los intervalos de corrosivo a muy corrosivo.

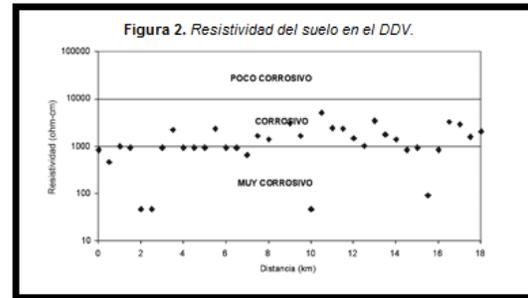


Figura 2: Resistividad del suelo

En la Fig. 3 se muestran los valores de pH a lo largo del DDV, aquí se puede observar que las condiciones no son nada agresivas en términos de acidez y por otra parte se encuentran en un intervalo de neutro a ligeramente alcalino, lo que lleva a que las condiciones del suelo en términos de pH, sean ligeramente corrosivas [1].

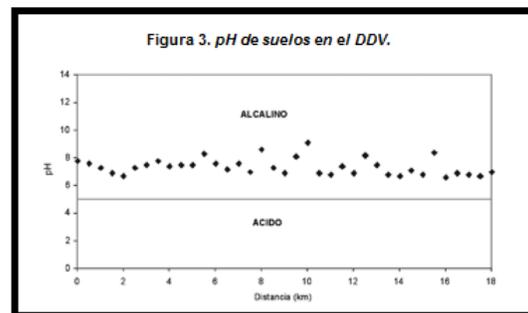


Figura 3: pH a lo largo del DDV

III.- pH y Corrosión

Este modelo matemático que presenta [2], estima el daño causado por corrosión en estructuras enterradas y lo han desarrollado considerando variables físico-químicas del medio ambiente observadas en campo como pH, resistividad, potencial Redox y potencial eléctrico de la interfase suelo estructura metálica. El modelo se basa en el concepto de que una vez dañada la estructura, es irreversible este proceso que evoluciona.

De acuerdo con [2], los parámetros ambientales que exponencialmente contribuyen con el daño de corrosión V_p en un ducto enterrado son pH, q , E_{Redox} y E_{S-d} .

$$v_p = C_0 \exp[-(q_1 \text{pH} + q_2 \rho + q_3 E_{\text{Redox}} + q_4 E_{s-d})]$$

Donde:

C_0 es un factor de escala

$q_1 - q_4$ son constantes relacionadas al medio ambiente

Hay que tomar en cuenta que en esta ecuación no se considera ningún recubrimiento en el ducto, si no solamente el metal del ducto expuesto y en contacto directo con el suelo

La tabla siguiente hace referencia a una base de datos mexicana, la cual incluye daños en ductos de gas de PEMEX, esta fue creada en el año 2006 y fue de una colección de más de 152 mediciones de máxima profundidad y mediciones de parámetros ambientales. Estos parámetros comprenden valores de pH en el rango de 4 a 8, resistividad de 2 a 221 Ωm , potencial de protección catódica de 610 a 1995 mV/Cu/CuSO₄, y valores de ERedox de 10 a 380 mV/SHE.

Pit depth (mm)	pH	ρ (Ωm)	E_{Redox} (mV/SHE)	E_{s-p} (V/Cu/CuSO ₄)
1				
-0.45	1.0			
-0.19	-0.30	1.0		
-0.10	-0.31	0.32	1.0	
0.23	-0.07	-0.13	-0.06	1.0

Tabla 1: Correlación entre factores

Podemos ver en la tabla 1 que existe una gran correlación, lo que indica una gran dependencia de daño con el pH del suelo donde tiene un valor de -0.45 [2].

IV.- Humedad y TDR

Toda estructura metálica enterrada en un suelo, presenta un potencial electroquímico en su superficie exterior.

Para la estimación del contenido de agua en el suelo, uno de los métodos más extendidos es la utilización del TDR (Time Domain Reflectometry), que estima el contenido en agua mediante la medida de la permitividad dieléctrica relativa aparente del suelo (ϵ_{ra}), que está directamente relacionada con el agua del suelo.

El contenido de agua en el suelo es un parámetro esencial para el estudio de los procesos hidrológicos. El TDR se presenta como un método de medición electromagnético (EM) indirecto, no destructivo, que permite la medición en tiempo real, así como la automatización de las lecturas en varias sondas simultáneamente mediante un multiplexor. En los pasados 30 años, el TDR se ha usado para la medida del contenido en humedad en muchas escalas y bajo un amplio rango de condiciones [3].

El principio de funcionamiento del TDR para estimar el contenido de agua en un suelo está basado en la diferente permitividad dieléctrica relativa del agua (80 a 20°C), un valor muy superior a la de los materiales del suelo: 2 a 5 para suelos orgánicos, 3 a 7 para compuestos minerales, 1 para el aire; el valor de la permitividad dieléctrica puede estimarse a partir de una medida del tiempo de viaje una señal EM, que se propaga a lo largo de una línea de transmisión dentro de un medio [3].

La frecuencia de medida efectiva para el TDR es aproximadamente 1 GHz, en estas frecuencias la parte real de la permitividad dieléctrica relativa (ϵ_r'), está más afectada por el contenido en agua que la parte imaginaria de la permitividad dieléctrica relativa (ϵ_r''). Además ϵ_r' es casi independiente en las frecuencias utilizadas por el TDR. La mayoría de los equipos de TDR lanza un pulso de voltaje de ascenso rápido (tiempo de ascenso < 200 ps) a lo largo de una línea de transmisión en el suelo, y el pulso electromagnético viaja una distancia hasta el final de la guía y regresa, esto permite la determinación de la permitividad dieléctrica relativa aparente (ϵ_{ra}) a partir del tiempo del viaje de ida y conocida la longitud eléctrica de la sonda.

$$\epsilon_{ra} = \left(\frac{ct_s}{L_e}\right)^2$$

Donde: c es la velocidad de la luz en el vacío; t_s es el tiempo de viaje (tiempo de viaje de ida); y L_e es la longitud eléctrica de la sonda.

$$\epsilon_{ra} = \frac{\mu \epsilon_r'}{2} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \left[\frac{\epsilon_r'' + (\sigma_0 / \omega \epsilon_0)}{\epsilon_r'} \right]^2} \right\}$$

Donde: μ es la permeabilidad magnética del medio relativa al vacío, la mayoría de suelos no son magnéticos, así que μ es igual a uno; σ_0 es conductividad eléctrica directa en $S\ m^{-1}$; ω es la frecuencia angular en $rad\ s^{-1}$; y ϵ_0 es la permitividad del vacío en F/m.

Las mayoría de las aplicaciones del TDR hasta la fecha asumen que

$$\left[\frac{\epsilon_r'' + (\sigma_0 / \omega \epsilon_0)}{\epsilon_r'} \right] \ll 1,$$

, dado que $\epsilon_{ra} \approx \epsilon_r'$.

Esta asunción permite la determinación del contenido en agua sin previo conocimiento de la conductividad eléctrica para suelos no salinos que tengan un contenido en arcilla inferior al 50% [3].

La alta permitividad dieléctrica del agua, con respecto a los valores del aire y del suelo seco, produce que el valor ϵ_{ra} tenga una gran dependencia del contenido de agua. Relaciones empíricas entre ϵ_{ra} y el contenido volumétrico de agua se han determinado para un amplio rango de suelos, cuando el suelo tiene una textura gruesa o media, la relación empírica es normalmente empleada para estimar el contenido de agua partir de las medidas de permitividad [3].

La inserción de las guías de TDR en un suelo pedregoso es muy difícil, siendo muy complicado mantener el paralelismo entre las mismas, este trabajo señala, que la divergencia de las guías provoca problemas en la correcta identificación del final de la guía en la onda y la convergencia de las guías reduce el volumen de suelo muestreado.

Los objetivos de este trabajo son el diseño de un conector flexible de guías que permita la fácil conexión a las guías instaladas en campo en un suelo pedregoso a un TDR cuando estas no éstas no están totalmente paralelas, la calibración de los valores del factor de corrección del tiempo de viaje de la señal (t_0) que tiene en cuenta el viaje de la

señal en el conector flexible de las guías y la longitud eléctrica de las guías (L_e); y el desarrollo de un programa para analizar la onda obtenida con el TDR [3].

V.- TDR y Corrosión

V.1 En base a la ecuación presentada por en la parte 3 de este documento [2].

$$v_p = C_0 \exp[-(q_1 pH + q_2 \rho + q_3 E_{Redox} + q_4 E_{S-d})]$$

Y sabiendo que existe una gran correlación, lo que indica una gran dependencia de daño con el pH del suelo y que toda estructura metálica enterrada en un suelo, presenta un potencial electroquímico en su superficie exterior.

La utilización del TDR (Time Domain Reflectometry), para estimar el contenido de agua en el suelo es un parámetro esencial para el estudio de los procesos hidrológicos. El TDR siendo un método de medición electromagnético (EM) indirecto, no destructivo, que permite la medición en tiempo real, así como la automatización de las lecturas en varias sondas simultáneamente.

Estableceremos un método a un en proceso de desarrollo que relaciona directamente las mediciones del TDR con la corrosión en ductos enterrados, sabiendo que a lo largo de muchas tuberías de transporte de hidrocarburos se conoce desde hace tiempo la composición del suelo por donde atraviesa esta tubería, tal como, salinidad, pH, resistividad, potencial Redox y potencial eléctrico de la interfase suelo estructura metálica, y en base a esta información elaboramos un programa de cómputo (aún en desarrollo) que nos estima el daño en corrosión de acuerdo a la cantidad de humedad contenida en el suelo.

La figura 5 muestra una gráfica hipotética del resultado de combinar una base de datos reales, con mediciones hechas con el TDR para determinación de humedad

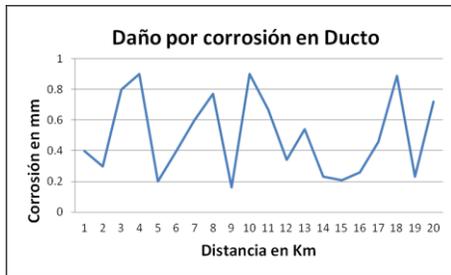


Figura 5: Daño por corrosión

V.2 Además aprovechar las bondades del TDR que trabaja con el mismo principio del radar, las ondas electromagnéticas que se generan en el TDR pueden viajar cientos o miles de metros, dependiendo de las condiciones ambientales del suelo en el que se encuentre enterrado el ducto, y usando el ducto y su recubrimiento de aislamiento como una guía de onda, se envía un pulso de energía transmitido a través de este, cuando el pulso de energía alcanza el fin de la sección del ducto en prueba, parte o toda la energía del pulso es reflejada hacia el instrumento y puede detecta una falla a lo largo de este. La figura 6 muestra el material aislante que mantiene separados los conductores llamado dieléctrico y la impedancia de los conductores es determinada por el espaciado entre ellos y el tipo de dieléctrico usado

En la figura 7 se muestra el TDR identificando cambios en la impedancia del ducto que pueden ser causados por una variedad de circunstancias, incluyendo daños en este, ingreso de agua, mala instalación, cualquier defecto de fabricación e incluso fugas y tomas clandestinas.



Figura 6: Impedancia entre conductores



Figura 7: Detección de daño por cambio de impedancia

V.3 Utilizando las dos técnicas para el aprovechamiento de un TDR en ductos enterrados (secciones 5.1 y 5.2) determinación de corrosión y daño al ducto podemos robustecer la predicción de daños en el ducto sin cometer falsas alarmas.

En la actualidad las pérdidas económicas originadas por daños y corrosión en ductos de hidrocarburo es alarmante. La protección del ducto contra tales sucesos, representa el mayor desafío para los Organismos operativos. Muchos ductos atraviesan terreno lejano, donde la vigilancia visual es difícil, o áreas densamente pobladas, donde la consecuencia de una falla puede ser catastrófica. Mientras algunas técnicas de inspección, pueden usarse para identificar el deterioro en ductos para transporte de hidrocarburos, otras no sirven.

La técnica de detección y localización de daños por corrosión utilizando TDR en ductos, permite que la detección sea casi inmediata, dado que podría detectar a tiempo pequeñas cantidades de fuga de hidrocarburos, en consecuencia no habría grandes riegos para la población, medioambiente y pérdidas económicas[18],[19],[20].

VI.- Conclusiones

El material propuesto en este trabajo permite la utilización de un Reflectómetro en el Dominio del Tiempo (TDR), para la determinación directa de la corrosión, a través de un programa de cómputo (aún se encuentra en fase de desarrollo), para ductos enterrados de cualquier tipo, aun que el enfoque se hace en forma directa a ductos de transportación de hidrocarburos, se toman en cuenta factores directos que intervienen en la relación ducto y los componentes del suelo donde va enterrado, cuya información se encuentra ya registrada y almacenada en bases de datos.

Además esta técnica se puede conjugar con otras técnicas que utilizan el TDR como guía de onda, para la determinación de daño en las paredes del ducto y conjugando ambas técnicas permite detectar a tiempo pequeñas cantidades de fuga de hidrocarburos, producidas por daños en el ducto, instalación impropia, cualquier defecto de fabricación e incluso fugas y tomas clandestinas, en así evitaríamos riegos para la población, medioambiente y pérdidas económicas.

Referencias:

[1] Miguel A, Gonzalez N, Jose Ma. Malo T, Rosalba Chavarria M and Pablo Duran E. "Relación entre la protección catódica y el diagnóstico de DCVG", Boletín IIE, julio-septiembre del 2007.

[2] J.L. Alamilla, M.A. Espinosa-Medina, E. Sosa, "Modelling steel corrosion damage in soil environment", Corrosion Science 51, pp 2628–2638, ELSEVIER, 2009.

[3] F.J. Souto Jorge, J. Dafonte Dafonte, M. Escariz Viña, "Diseño y calibración aire-agua de un conector de guías de TDR para medida de lapermittividad dieléctrica en suelos pedregosos", Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VIII, 2007.

[4] API Publication 1149, "Pipeline Variable Uncertainties and Their Effects on Leak Detect ability", 1st Edition November 1993.

[5] API Publication 1158, "Analysis of DOT Reportable Incidents for Hazardous Liquid Pipelines, 1986 Through 1996", January, 1999.

[6] Department of the army U.S. Army Corps of Engineers, "Leak Detection" Public Works Technical Bulletin 420-49-36, 15 June 2001.

[7] API 1155. "Evaluation Methodology for Software Based Leak Detection Systems". February 1995.

[8] API RP1110, "Pressure Testing Liquids Pipelines", 2003.

[9] ASME B 31.4, "Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids", 2002.

[10] PEMEX Boletín, "Siniestro ocurrido en el oleoducto de 30" de diámetro Nuevo Teapa-Venta de Carpio, en San Martín Texmelucan", Puebla México, January 2011.

[11] PEMEX Boletín, "Combate al mercado ilícito de combustibles", México, August 2012.

[12] TraceTek ®, "TT5000 TraceTek fuel-sensing cable", Tyco Thermal Controls Bulletin LLC H54785 1/05, 2005.

[13] Public works technical bulletin 420-49-36, "Leak Detection". June 2001.

[14] API Publication 1113, "Developing a Pipeline Supervisory Control Center", 3rd Edition, February 2000.

[15] API Publication 1164, "Pipeline SCADA Security", 1st Edition, September 2004.

[16] API Recommended Practice 1162, "Public Awareness Programs for Pipeline" October, 2001.

[17] API Publication 1130, "Computational Pipeline Monitoring", 2nd Edition, November 2002.

[18] E.Orduña-Reyes and R. Téllez-García, "Cable sensor para la Detección y Localización de Tomas Clandestinas en Ductos". Mexican Petroleum Congress, Veracruz Mexico, June 2009.

[19] E.Orduña-Reyes and R. Téllez-García. "Sistema de Detección y Localización de Fugas de Hidrocarburos en Ductos". Patent granted by the Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI), June 2012.

[20] E. Orduña-Reyes and R. Téllez-García. "Sistema de detección y localización de Tomas Clandestinas en Ductos de Transportación de Hidrocarburos". Patent granted by the Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI), June 2012.