

Evaluación de la Distribución de Corrientes y Potenciales Eléctricos en un Sistema de Protección Catódica en Tuberías

Jorge Luis Barrera C. ⁽¹⁾ Julián Peña E. ⁽²⁾

Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción ⁽¹⁾

Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)

Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral

Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador

jolubarr@espol.edu.ec ⁽¹⁾

Ing. Mecánico, Profesor FIMCP-ESPOL, jpena@espol.edu.ec ⁽²⁾

Resumen

El objetivo de este proyecto de tesis se centra en comprobar los beneficios de realizar el diseño de un Sistema Catódico en base a mediciones de campo sobre la estructura a proteger en el caso particular de tuberías enterradas, y de esta manera definir con mayor exactitud demandas de corrientes y distribuciones de potenciales eléctricos para optimizar los recursos en la inversión de un sistema de este tipo. Se describen los fundamentos teóricos que incluyen los criterios científicos y técnicos manejados para luego plantear un Sistema por Corrientes Impresas con ayuda de pruebas de campo preliminares de terreno y estructura, y los resultados de los cálculos pertinentes al problema propuesto. Se evalúa la calidad del revestimiento con gráficas de atenuación y con base a parámetros estandarizados; con esto se plantean los posibles escenarios de ubicación de rectificador y lecho anódico considerando los posibles problemas de interferencia eléctrica. Se concluye acerca de la importancia de las pruebas de campo y como éstas logran optimizar los recursos a emplear por contar con una apreciación real del funcionamiento de un sistema propuesto.

Palabras Claves: *Pruebas de campo, protección catódica, atenuación de potencial, evaluación de recubrimiento en tubería.*

Abstract

The objective of this thesis project is centered in checking the benefits of carrying out the design of a Cathodic System based on field survey on the structure to protect in the case of buried pipes, and this way define with better accuracy currents demands and electric potentials distributions to optimize the resources in the investment of a system. The theoretical foundations described include scientific and technical approaches managed to achieve an Impressed Current System Design with preliminary field tests of soil and structure, and the results from calculations to the proposed problem. The coating quality is evaluated with attenuation graphics and based on standardized parameters; with this indicate the possible scenarios of rectifier and anodes location considering the possible problems of electric interference. We conclude about the field survey importance and how this is able to optimize the resources to have a real appreciation of a proposed system operation.

Keywords: *Field survey, cathodic protection, potential attenuation, pipeline coating evaluation.*

1. Introducción

Una de las mayores causas de fugas en tuberías metálicas enterradas es la corrosión externa, por lo tanto es necesaria la implementación de un sistema de protección adecuado. El uso de recubrimientos protectores en conjunto con protección catódica ha logrado a través de los años un registro de excelente performance en la protección de estructuras incluidas las tuberías enterradas.

Parte del procedimiento para proteger catódicamente a una tubería consiste en la realización de pruebas de campo para evaluar factores de interés en los cálculos intervinientes y que paralelamente complementan la información técnica útil disponible.

La eficiencia del revestimiento aplicada a tuberías es una de las variables de mayor importancia (y a la vez una de las de mayor incertidumbre) en la respuesta del sistema de protección catódica. En el presente trabajo se aprecia la incidencia del recubrimiento externo de una tubería enterrada y otras variables de campo en la distribución de las curvas de atenuación de corrientes y potenciales eléctricos adquiridos con modelos matemáticos.

En el diseño integral de un sistema de protección catódica (SPC), a través de ensayos en campo e información técnica disponible se analiza el comportamiento de los parámetros más relevantes en gráficos de variables involucradas y materiales disponibles en el mercado, la factibilidad de alternativas reales que puedan constituir una solución efectiva a este problema típico de ingeniería.

2. Protección catódica en tuberías enterradas [1, 2, 3]

La Protección Catódica es un método de protección de metales que utiliza corriente eléctrica sobre una superficie que se corroe. Se limita a metales expuestos a un electrolito como suelo, agua o concreto. No funciona en la atmósfera.

Con la aplicación de un sistema de protección catódica en una tubería enterrada, corriente directa es forzada a fluir a lo largo de su superficie para lograr polarizar la estructura, el cual consiste en cambio en el potencial eléctrico en dirección electronegativa y por lo consiguiente disminución en la tasa de corrosión del material.

En la actualidad existe gran variedad de pruebas de campo que además de revelar el nivel de protección de una tubería, sirven también para tener una apreciación más real que contraste las expresiones matemáticas teóricas y proyecte datos más confiables de parámetros influyentes en el diseño de un sistema de protección catódica. Las pruebas sirven como información complementaria para definir con claridad las variables de protección.



Figura 1. Instalación de tuberías

Recubrimientos

El nivel de protección catódica a aplicar depende de la calidad de revestimiento, compatibilidad con la estructura y características de operación, buenas características aislantes, resistencia al desgaste por manipulación y conserva alta resistencia al flujo de corriente.

La eficiencia del recubrimiento obedece a tantos factores que una apreciación teórica podría ser imprecisa sin considerar elementos de campo como manipulación en transporte, almacenamiento, instalación y pruebas específicas. En muchos casos es necesario realizar ensayos de campo para obtener datos reales del estado del revestimiento luego de que la tubería haya sido maniobrada y lastimada.

Las juntas soldadas y otros accesorios deben revestirse en campo con las debidas precauciones para garantizar una adecuada aplicación. En lo concerniente a la protección catódica, juntas con recubrimientos defectuosos o que no cumplen con los requerimientos de aislación eléctrica al medio, serán puntos de fuga de corriente hacia el electrolito, lo que perjudica el buen desempeño del sistema.

Atenuación de corriente

La corriente aplicada y los potenciales eléctricos de la tubería varían a medida que se alejan de la fuente debido al fenómeno de atenuación, que se define como el cambio de voltaje decreciente entre estructura-electrolito producido por la alimentación de corriente directa en una estructura metálica.

Estas fórmulas están gobernadas por los valores relativos de la resistencia longitudinal (r) y la conductancia eléctrica (g). Ambas características determinan la constante de atenuación de la estructura (α), la cual representa la razón de atenuación.

Tabla 1. Ecuaciones de atenuación

Ecuación General	Dónde
$\alpha = \sqrt{r \cdot g}$	α : Constante de atenuación [Adimensional]
$R_G = \frac{L}{g}$	R_G : Resistencia característica [Ω]
$R_{so} = R_G \coth(\alpha x)$	R_{so} : Resistencia de entrada - circuito abierto [Ω]
$I = I_s \cosh(\alpha x) - \frac{E_s}{R_G} \sinh(\alpha x)$	I_s : Corriente de salida de fuente de energía [A]
$E = E_s \cosh(\alpha x) - I_s \sinh(\alpha x)$	E_s : Voltaje de salida de fuente de energía [V]

Adicionalmente se utilizan ecuaciones que representan las soluciones homogéneas de la ecuación diferencial simplificada de segundo orden que sirve de modelo matemático. Las ecuaciones hiperbólicas de la Tabla 1 describen la atenuación que sufren las variables de protección a lo largo una estructura larga.

3. Diseño del sistema de protección catódica en tubería enterrada [4, 5, 6]

Para desarrollar la evaluación, se presenta como caso de estudio una tubería de acero A-36 destinada al transporte de agua potable a temperatura ambiente. El acueducto de 3.2 kilómetros está conformado por 3 tramos con diferentes secciones transversales con 343 uniones soldadas.

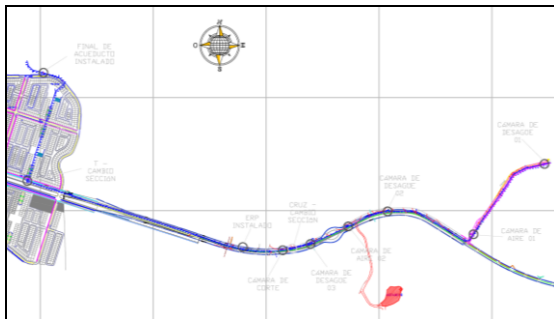


Figura 2. Ubicación de acueducto

Determinación de la agresividad del suelo

Una vez se obtenga la información técnica de partida se procede a realizar las mediciones de campo preliminares en el terreno para tener una noción clara de la agresividad del electrolito y con esto realizar dimensionamientos adecuados de SPC.



Figura 3. Medición de campo sobre electrolito

La **resistividad eléctrica** del suelo es un indicador de la tendencia de la corriente a fluir; un factor preponderante en la selección del sistema catódico a instalar pues la interpretación de sus resultados puede llegar a afectar enormemente al tipo de sistema y su dimensionamiento.

Se utiliza el método Wenner (o también llamado de cuatro picas), ampliamente utilizado por los ingenieros en corrosión para obtener este tipo de parámetros en sitio.

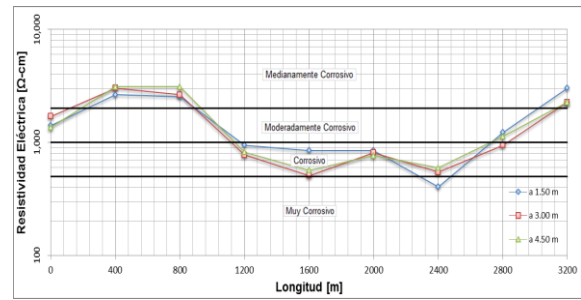


Figura 4. Lecturas de resistividades eléctricas

Se puede apreciar resistividades promedio que caen en el campo corrosivo de acuerdo a normas, mostrando alta tendencia corrosiva del suelo.

Otro factor a considerar en el diseño es el nivel de acidez del electrolito, indicado por el potencial de hidrógeno. Para el caso particular en mención, se puede observar un pH promedio de 7.4, muy cercano a un suelo neutro. Además de comportamiento parejo en las muestras tomadas, por lo que el nivel de hidrógeno en el suelo no constituye un factor agresivo a considerar.

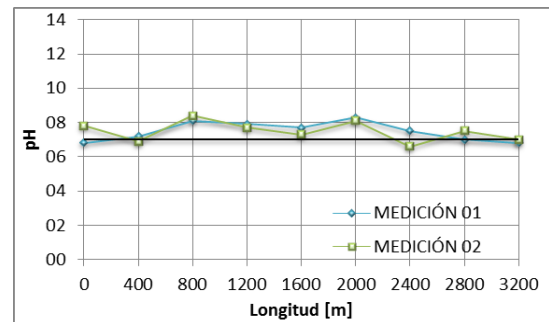


Figura 5. Lecturas de pH

Como complemento se presenta un análisis de suelo que incluye la presencia de cloruros y sulfatos mediante la obtención de muestras y la posterior revisión en un laboratorio especializado.

Tabla 2. Resultados de análisis de suelo.

ABSCISA	IDENTIFICACIÓN	SO ₄ * [ppm]	CL* [ppm]
0+000	MUESTRA 01	590,5	95,2
	MUESTRA 02	57,1	95,2
0+400	MUESTRA 03	28,6	85,7
	MUESTRA 04	42,9	90,5
0+800	MUESTRA 05	71,4	100,0
	MUESTRA 06	66,7	90,5
1+200	MUESTRA 07	81,0	95,2
	MUESTRA 08	38,1	100,0
1+600	MUESTRA 09	76,2	95,2
	MUESTRA 10	119,0	85,7
2+000	MUESTRA 11	52,4	104,8
	MUESTRA 12	71,4	95,2
2+400	MUESTRA 13	81,0	114,3
	MUESTRA 14	123,8	147,6
2+800	MUESTRA 15	109,5	90,5
	MUESTRA 16	33,3	47,6
3+200	MUESTRA 17	66,7	66,7
	MUESTRA 18	42,9	57,1

El análisis de contenidos de cloruros y sulfatos caracteriza al terreno como poco agresivo para la integridad estructural para las tuberías de acero por acción de iones cloruros y sulfatos en base a normas.

Parámetros Iniciales de Diseño

Densidad de corriente.- para estructuras en electrolitos con las condiciones descritas en las pruebas de campo se considera 20 mA/m², que ha ofrecido protección adecuada en casos similares.

Área de protección.- este factor considera posibles daños por transporte, almacenamiento, bajado, tapado y deterioro paulatino de la tubería con el paso del tiempo. Se estima 97% eficiencia teórica del revestimiento de forma preliminar

Corriente de protección.- se calcula la corriente de protección necesaria para lograr el aumento del potencial eléctrico de la tubería y que el sistema cumpla con los criterios de protección

Tabla 3. Cálculo de corriente de protección

Diámetro [mm]	Área Superficial [m ²]	Corriente Requerida [Amp]
1200	5278	5.3
800	3318	3.3
600	1018	1.0
TOTAL		9.6

Sistema de protección catódica a emplear.- para poder cubrir las necesidades de corriente, se propone un SPC por corrientes impresas utilizando ánodos superficiales. Esta decisión fue tomada en función de varios aspectos técnicos tales como: disponibilidad de energía en los diversos sectores, vida útil esperada de los sistemas a implementar, espacio físico disponible y factibilidad económica.

Cálculo de resistencias eléctricas del circuito de protección catódica.- con el cálculo de las resistencias se completa los requerimientos de energía para el sistema propuesto en lo concerniente al dimensionamiento del rectificador. A continuación se muestran los resultados fruto de procesamiento iterativo de datos hasta llegar a la solución apropiada.

Tabla 4. Cálculos de resistencias

Resistencia	Ecuación	Resultado
Lecho Anódico a Tierra Remota	$R_{gb, re} = \frac{\rho}{2\pi NL} \left(\log \frac{8L}{d} - 1 + \frac{2L}{S} (2.3 \log 0.656N) \right)$	0.545 Ω
Tubería a recubrimiento	$R_{s, re1} = \rho_{cu} \sum_{i=1}^3 \frac{L_i}{A_i}$	0.037 Ω
Recubrimiento a electrolito	$R_{s, re2} = \frac{r_c}{A_s}$	1.468 Ω
Cables en el Sistema Propuesto	$R_c = r_{dc} L$	0.256 Ω
Resistencia total del circuito de protección catódica		2.306 Ω

Requerimiento de voltaje.- el sistema debe proveer suficiente voltaje para mantener el nivel de corriente requerido a lo largo de la estructura que se encuentre en contacto con el electrolito. En sistemas de corrientes impresas el voltaje aplicado a la estructura es igual al voltaje de salida del rectificador menos la diferencia de potenciales naturales entre el material de la tubería y los ánodos, comúnmente denominado contra-voltaje y generalmente asumido como 2 voltios para los cálculos.

Por lo tanto, considerando un incremento por factor de seguridad de un 25% para satisfacer los requerimientos del SPC planteado en la tubería se selecciona un equipo con 12 amperios y 30 voltios de salida.

3. Evaluación del sistema catódico en base a relevamiento en campo e influencia de interferencia [7, 8]

Cuando la estructura es enterrada previo a la elaboración de la ingeniería de la protección catódica, es posible realizar en campo pruebas adicionales. La utilidad de dichas mediciones se direcciona principalmente al conocimiento del estado del revestimiento, las tendencias de distribución de potenciales eléctricos y corriente de protección, la incidencia de corrientes parásitas y requerimientos de corriente.



Figura 6. Medición de campo sobre estructura

Medición de conductancia eléctrica

Esta propiedad puede variar a lo largo de la tubería debido a la resistividad promedio del suelo, nivel de polarización y factores del recubrimiento como tipo, edad, espesor, nivel de daño e inspecciones de calidad durante la instalación de la tubería. Se utiliza el método de atenuación del potencial eléctrico, una de las opciones propuestas por el estándar NACE TM0102 para obtener un valor promedio.

El ensayo consiste en registrar lecturas de potenciales eléctricos sobre la estructura en puntos espaciados a partir de una fuente de energía que le suministra corriente. El sistema conecta el terminal negativo de una fuente, un interruptor de corriente en serie y posteriormente a la tubería; mientras que el terminal positivo se conecta a una estructura metálica clavada en el electrolito que hace las veces de ánodo en el sistema.

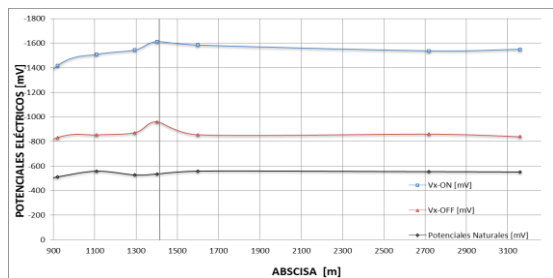


Figura 7. Lecturas de prueba de conductancia del revestimiento y potenciales naturales.

Potenciales eléctricos naturales

Se tomaron lecturas de potenciales eléctricos naturales de la estructura con la ayuda de un electrodo de referencia portátil.

Esta prueba es ampliamente utilizada en toda estructura que se encuentra en el electrolito pues representa una base técnica útil en múltiples temas relacionados a la corrosión de la misma. Es un indicador que puede servir para conocer el estado actual de la tubería, confirmar la conformidad de uno de los criterios de protección, detectar posibles interferencias, entre otros. Los resultados se presentan en la Tabla 7, junto a la prueba de conductancia del recubrimiento.

Potenciales eléctricos entre electrodos

Otro punto de análisis son las posibles corrientes parásitas o vagabundas que puedan afectar a una estructura. Para verificar la incidencia de corriente alterna a la estructura, se tomaron lecturas de potenciales eléctricos sobre la línea del acueducto entre dos CSE balanceados cuyos resultados no mostraron fuerte influencia de otras estructuras.

3.1 Análisis de atenuación

Los resultados en las curvas varían en función de la corriente otorgada por la fuente de poder del sistema. Como se evidencia en la figura 9, el potencial de la tubería presenta una tendencia lineal los primeros 1500 metros para luego disminuir la variación de potenciales y empezar a equilibrarse por debajo de los -900 mV. En poco más de 3000 metros se registra disminución de cerca de 200 mV en el potencial de la tubería instalada, lo cual es relativamente aceptable considerando que la sección de la tubería y por lo que la relación área-longitud son grandes.

Se puede apreciar que la estructura puede ser protegida en toda su extensión por una fuente de energía que cumpla con los requerimientos descritos anteriormente.

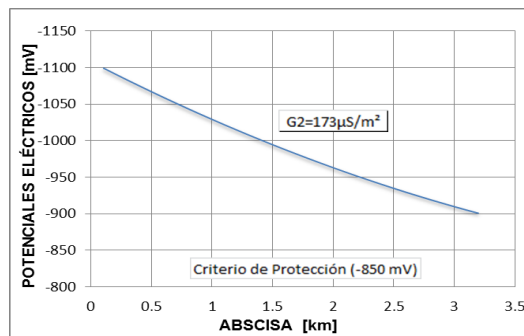


Figura 8. Distribución de potenciales del acueducto

Si bien la variable que indica el nivel de protección de una estructura es el potencial eléctrico, otro parámetro de interés es la corriente necesaria para que se alcancen los potenciales deseados. Con la prueba de conductancia del recubrimiento se tuvo un valor de corriente de protección que se encuentra dentro de los rangos de diseño. Así mismo, la densidad de corriente asumida de 20 mA/m² ha sido apropiada para llegar a niveles de protección.

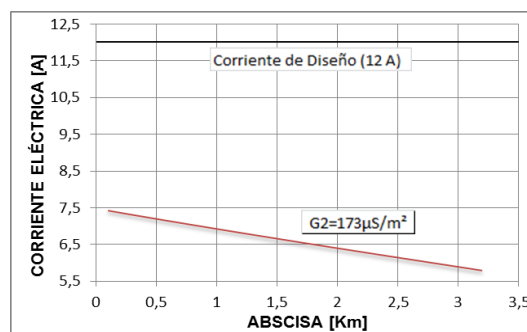


Figura 9. Distribución de corrientes del acueducto.

Con respecto a la corriente que circula en la tubería (figura 9) inicialmente manifiesta una pendiente similar a los potenciales eléctricos, ésta continúa disminuyendo sensiblemente claramente acercándose a cero conforme avanza.

Se puede aprovechar las gráficas mostradas a manera de simulación de la respuesta de la estructura enterrada a la instalación de un sistema de protección por corrientes impresas. Sin duda esto conlleva a grandes beneficios para evaluar el diseño del SPC planteado; es por esto que a continuación se realiza un análisis comparativo entre ambos.

Resultados teóricos versus prácticos

Se contrastan los resultados obtenidos con los cálculos teóricos del revestimiento y los experimentales de mediciones in situ a la estructura, calculando las variables involucradas con las expresiones correspondientes. A continuación, en la Tabla 5 se detallan los resultados.

Tabla 5. Ecuaciones de atenuación

DESCRIPCIÓN	RESULTADO TEÓRICO	RESULTADO PRÁCTICO
Calidad del Recubrimiento	Excelente	Buena
Conductancia Específica, G	71 $\mu\text{S}/\text{m}^2$	173 $\mu\text{S}/\text{m}^2$
Conductancia de la Tubería, g	0.681 S	1.66 S
Constante de atenuación, α	0.049	0.077

Los resultados prácticos exhiben similitud con los cálculos preliminares. Es de esperarse que el recubrimiento no se encuentre en excelentes condiciones pues en muchas ocasiones los trabajos de campo deterioran el mismo incluso antes de ser enterrada la tubería. Gracias a las pruebas de campo, se ha podido respaldar lo diseñado en papel.

3.2 Extrapolación de resultados

La calidad del recubrimiento va a disminuir con los años por la formación de puntos calientes, generando zonas con alta conductancia eléctrica. A continuación se muestra la tendencia de las curvas de potenciales eléctricos con el tiempo en función de la calidad del recubrimiento.

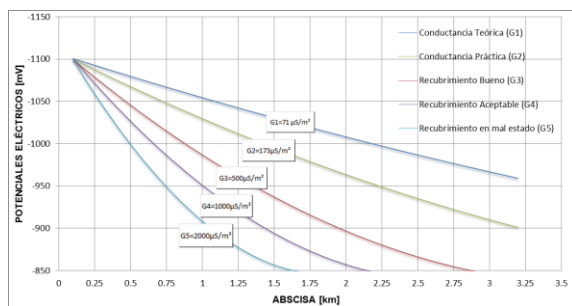


Figura 10. Distribución de potenciales eléctricos en función de la calidad del recubrimiento

Para los cálculos teóricos y prácticos las dos primeras curvas describen una disminución prudential y equilibrada que garantiza la protección de la totalidad de la estructura con una sola fuente de poder. A partir del límite del recubrimiento bueno, con una conductancia de $500 \mu\text{S}/\text{m}^2$, los potenciales se reducen por debajo del límite condicionado para un buen funcionamiento de un SPC. Cuando la curva de atenuación de potenciales no pueden mantenerse en el rango del criterio de los -850 mV , independientemente de que tan potente sea la fuente o la cantidad de dispersores que se utilicen en el SPC, no se podrá cubrir toda la estructura con un solo sistema.

Existe aumento de la descarga diferencial de corriente a lo largo de la tubería ya que ésta se escapa por los puntos calientes de la estructura, que son de mayor trascendencia en revestimientos de baja calidad.

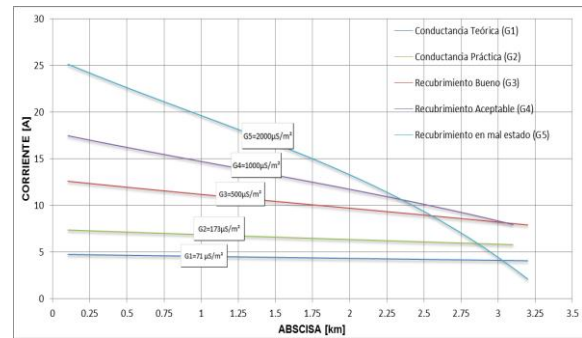


Figura 11. Distribución de corrientes en función de la calidad del recubrimiento

Las fallas en términos de área expuesta se relacionan directamente con la calidad del revestimiento, para requerir 25 amperios de corriente en la protección de una tubería con conductancia eléctrica de $2000 \mu\text{S}/\text{m}^2$, ésta debería de tener un área expuesta de aproximadamente 288 m^2 . Si se considera que existen 343 uniones soldadas y que cada una puede tener un área de trabajo de soldadura promedio de 0.750 m^2 , se tendrían más de 250 m^2 . Por esto es de gran importancia contar con buen revestimiento en juntas y evidencias de su correcta instalación.

3.3 Planteamiento de Escenarios de Instalación del Sistema Catódico

Cuando se dan buenas distribuciones de corrientes y potenciales en la tubería se tiene la ventaja de proteger grandes distancias sin que ocurran caídas de potenciales por debajo de los criterios de protección.

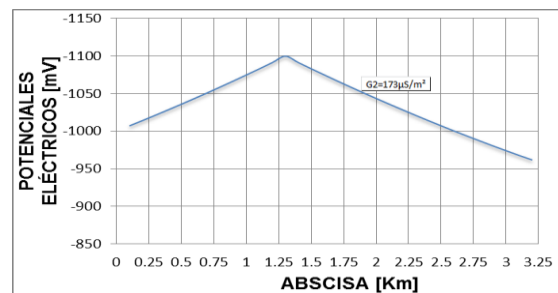


Figura 12. Distribución de potenciales eléctricos en función de la calidad del recubrimiento

Con las curvas obtenidas, la ubicación del rectificador dependerá netamente de variables de instalación en sitio. Se selecciona un punto intermedio de la tubería del problema y se grafica la distribución de potenciales para verificar el nivel de protección.

Influencia de Corrientes de Interferencia

A efecto de descartar la posibilidad de tensiones inducidas electromagnéticamente por corriente directa y alterna que pudiesen eventualmente generar riesgos

por corrosión se toma en consideración las lecturas entre electrodos. Los resultados manifestaron potenciales eléctricos estable y dentro de los rangos reglamentarios en estructuras nuevas en la estructura.

4. Conclusiones

1. Con las pruebas de campo se optimizan los recursos en la implementación de SPC. Se cuenta con una apreciación real de la eficiencia del revestimiento y con esto se evita sobredimensionamiento de rectificadores y dispersores.
2. Las gráficas de corrientes y potenciales eléctricos obtenidas previo a instalación del sistema de protección, son herramientas útiles para emitir criterios preliminares sobre diversos temas relacionados con protección catódica y evaluar su comportamiento responde a la necesidad de conseguir diseños fiables e integrales.
3. Mediante mediciones de campo, se puede determinar de manera confiable variables como la conductancia específica del revestimiento. Tal es el caso del problema propuesto con valores en el orden de $244 \mu\text{S}/\text{m}^2$ en terrenos con resistividades eléctricas de $1000 \Omega - \text{cm}$, lo cual revela "buena" calidad del revestimiento del acueducto. Prueba de esto se tiene en las distribuciones de potenciales con tendencia estable.
4. La corriente de protección del SPC obtenida en cálculos teóricos es fácilmente verificada mediante evaluación de curvas de atenuación. Se comprueba la selección correcta de características técnicas del rectificador pues satisface el requerimiento inicial de corriente de 4 amperios para el funcionamiento del sistema y cubre aumentos de demanda a medida que el revestimiento se desgaste.
5. Los modelos matemáticos empleados complementan la evaluación del SPC. Con ayuda de ecuaciones hiperbólicas se pudo simular potenciales de protección, verificar el cumplimiento de criterios normados y definir la ubicación del rectificador.
6. La interferencia eléctrica sobre otras estructuras incide en la ubicación de los lechos anódicos. Éstos se sitúan en puntos con mayor remotividad, distantes de sectores donde estructuras ajenas al sistema puedan afectar su funcionamiento.

5. Recomendaciones

1. Cuando se tenga mayores tramos a proteger, profundizar investigaciones con pruebas en diferentes electrolitos empleando dos o más

fuentes de poder temporales para sistemas por corrientes impresas.

2. Prestar atención en las conexiones y demás salidas radiales de las tuberías pues es precisamente en estos tramos donde no se encuentra aplicado el mismo sistema de recubrimientos y puede ocasionar fuga de corriente.
3. En las pruebas de conductancia del revestimiento se debe tener cuidado en la selección de puntos a medir potenciales y evitar tomar lecturas junto a la fuente. La distancia entre puntos de medición debe ser tal que exista variación apreciable en los potenciales.
4. Monitorear trimestral los potenciales eléctricos en los postes de medición, a más de pruebas periódicas que indiquen el estado del recubrimiento basado en normas y estándares de referencia.
5. Mantener registros estadísticos de inspecciones y reparaciones realizadas, controlar del nivel de atenuación de los potenciales eléctricos y procesamiento de datos. En caso de existir disminución en potenciales de protección, se debe planificar acciones predictivas.

6. Bibliografía

- [1] ASTM G57-07 – Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method.
- [2] Handbook of Cathodic Corrosion Protection – Theory and Practice of Electromechanical Protection Processes, Third Edition. W. von Baekmann, W. Schwenk, and W. Prinz, 1997.
- [3] NACE International Training & Certification – Cathodic Protection Designer Course Manual – CP Level 3, 2005.
- [4] NACE Standard Practice 0169-2007 – Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems.
- [5] NACE Standard Test Method 0102-2007 – Measurement of Protective Coating Electrical Conductance on Underground Pipelines.
- [6] NACE Standard Test Method 0497-2007 – Measurement Techniques Related to Criteria for Cathodic Protection on Underground or Submerged Metallic Systems.
- [7] "Peabody's Control of Pipeline Corrosion", Second Edition. A.W. Peabody, Editadopor R.L. Biancheti, 2001.
- [8] "Pipe Line Corrosion and Cathodic Protection", Third Edition. Marshall E. Parker, Edward G. Peattie, 1999.