

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la
Producción**

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

TESIS DE GRADO

Previo a la Obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Jorge Luis Barrera Cruz

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2011

AGRADECIMIENTO

A mi madre, mi abuela y mi hermana por estar siempre presentes; a mi tío por ser pilar incondicional para poder culminar esta etapa de mis estudios; al Ingeniero Julián Peña, Director de Tesis, por su apoyo invaluable en la misma y a todos los que sembraron semillas de conocimiento en mí.

DEDICATORIA

A mis amigos, por conseguir que disfrute el camino; por haber compartido gratos momentos que recordaré por el resto de mi vida. A todos aquellos que creyeron en mí y piensan que las cosas pueden ser diferentes solo con proponérselo, esto es para ustedes.

Y claro, a ti abuelo... Por siempre,
Cantumito.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Gustavo Guerrero M.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

Ing. Julián Peña E.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Rodrigo Perugachi B.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

JORGE LUIS BARRERA CRUZ

RESUMEN

En la industria, es común encontrar Sistemas de Protección Catódica (SPC) con diseños erróneos, equipos sobredimensionados o que no cumplen con los requerimientos básicos de protección. La ingeniería en esta área generalmente se realiza con documentación técnica teórica para resolver problemas reales, lo que ocasiona altos niveles de incertidumbre en variables determinantes en el funcionamiento de SPC.

El objetivo de esta tesis se centra en comprobar las bondades de realizar el diseño de SPC que se diferencia de los tradicionales al tener la ventaja de realizar mediciones de campo sobre la estructura a proteger, y de esta manera definir con mayor exactitud demandas de corrientes y distribuciones de potenciales eléctricos para optimizar los recursos en la inversión de sistemas de este tipo.

La metodología propuesta combina cálculos teóricos tradicionalmente empleados para la obtención de corrientes de protección, resistencias eléctricas y dimensionamiento de la fuente de poder conjuntamente con resultados de ensayos de campo de agresividad del electrolito y distribución de potenciales sobre la estructura. Se propone un problema típico y con

ayuda de modelos matemáticos se simulan corrientes y potenciales de protección para verificar el cumplimiento de normas y definir parámetros complementarios. Se realiza un contraste entre resultados teóricos y prácticos y se analiza los efectos que puede ocasionar su discordancia.

La evaluación que se describe en este documento analiza la influencia de conexiones entre estructuras por posibles fugas de corriente del SPC. Se presenta procedimientos de los ensayos ejecutados, entre ellos la obtención de la conductancia específica del recubrimiento de una tubería enterrada y el impacto de contar con esta propiedad para lograr un diseño integral. Con las pruebas de campo se cuenta con una apreciación real de la eficiencia del revestimiento y se aprovecha gráficas de corrientes y potenciales eléctricos obtenidas previo a instalación del SPC para emitir criterios preliminares.

En el problema propuesto se muestra las curvas de potenciales con tendencia estable, las cuales manifiestan “buena” calidad del revestimiento. Adicionalmente se define la suficiencia del sistema, se ubica el lecho anódico en una abscisa intermedia con soporte en los resultados obtenidos y se describe las posibles interferencias por corriente directa y alterna a las que suelen estar sometidas estructuras enterradas.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	I
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE PLANOS	XI
INTRODUCCIÓN	1
 CAPÍTULO 1	
1. PROTECCIÓN CATÓDICA EN TUBERÍAS ENTERRADAS	4
1.1 Potenciales Eléctricos.	6
1.2 Pruebas de Campo.	10
1.2.1 Mediciones Previo a la Instalación.	11
1.2.2 Mediciones sin Aplicación de Protección Catódica.	12
1.2.3 Mediciones con Aplicación de Protección Catódica.	13
1.3 Recubrimientos.	14
1.3.1 Efectividad del Recubrimiento en el Control de la Corrosión.	15
1.3.2 Tipos de Recubrimientos.....	16
1.3.3 Otros Recubrimientos en Campo	17
1.4 Atenuación de Corriente.....	18
1.5 Problemas de Interferencia.	23

CAPÍTULO 2

2. DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA EN TUBERÍA ENTERRADA	28
2.1 Determinación de la Agresividad del Suelo.....	29
2.1.1 Resistividad Eléctrica.....	30
2.1.2 Análisis Químico.....	35
2.2 Parámetros Iniciales de Diseño.....	41
2.2.1 Densidad de Corriente.....	41
2.2.2 Área de Protección.....	41
2.2.3 Corriente de Protección.....	42
2.2.4 Sistema de Protección Catódica a Emplear.....	44
2.3 Lecho Anódico a Considerar.....	49
2.4 Cálculo de Resistencias Eléctricas del Circuito de Protección Catódica.....	50
2.5 Selección de Fuente de Poder.....	60

CAPÍTULO 3

3. EVALUACIÓN DEL SISTEMA CATÓDICO EN BASE A RELEVAMIENTO EN CAMPO E INFLUENCIA DE INTERFERENCIA	64
3.1 Mediciones de Campo en Tubería Instalada.....	65
3.1.1 Conductancia Eléctrica del Recubrimiento.....	66
3.1.2 Potenciales Eléctricos Naturales.....	76
3.1.3 Potenciales Eléctricos entre Electrodo.....	78

3.2 Evaluación del Recubrimiento Externo de la Tubería.....	79
3.2.1 Análisis de Atenuación	83
3.2.2 Extrapolación de Resultados.	91
3.3 Planteamiento de Escenarios de Instalación del Sistema Catódico.	98
3.4 Influencia de Corrientes de Interferencia.....	103
3.5 Descripción Técnica del Diseño.	107
CAPÍTULO 4	
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	113
APÉNDICES	
BIBLIOGRAFÍA	

ABREVIATURAS

A	Amperio
a	Distancia entre pines
AC	Corriente Alterna
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWG	American Wire Gauge
cm	Centímetros
Corr	Corrosión
cosh	Coseno Hiperbólico
CSE	Electrodo de Cobre/Sulfato de Cobre
DC	Corriente Directa
Dc	Densidad de Corriente
DC	Direct Current - Corriente Directa
dr	Diámetro de la columna de relleno
E	Voltaje - Potencial Eléctrico
e	Espesor de la tubería
ERP	Electrodo de Referencia Permanente
Fig	Figura
G	Conductancia específica
g	Conductancia por unidad de longitud
I	Intensidad de Corriente
IR	Caída de Voltaje por Resistencia
Kg	Kilogramos
kg	Kilogramos
km	Kilómetros
m	Metros
m ²	Metros Cuadrados
mA	Miliamperios
mm	Milímetros
MMO	Mezcla de Óxidos Metálicos
mV	Milivoltios
N	Número de Ánodos
NACE	National Association of Corrosion Engineers
PC	Protección Catódica
pH	Potencial de Hidrógeno
pk	Punto kilométrico
plg	Pulgadas
PMP	Poste de Medición de Potenciales
R	Resistencia
r	Resistencia longitudinal
s	Segundos
sinh	Seno Hiperbólico
SPC	Sistema de Protección Catódica
V	Voltios

SIMBOLOGÍA

α	Constante de atenuación
ρ	Resistividad eléctrica
Ω	Óhmios
$\Omega\text{-cm}$	Óhmios-centímetros
Ω/m	Óhmios por metro
μS	Micro Siemens
$\mu\text{S}/\text{m}^2$	Micro Siemens por metro cuadrado
ΔI	Variación de corriente
ΔE	Variación de voltaje
ε	Eficiencia del Revestimiento

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.	Instalación de Tuberías.....	5
Figura 1.2.	Medición de Potenciales Eléctricos en Tuberías.....	7
Figura 1.3.	Caídas Óhmicas en un Circuito.....	8
Figura 1.4	Resistencias en la Distribución Ideal de Corrientes en un SPC.....	18
Figura 1.5.	Resistencias entre Estructura – Electrolito.....	20
Figura 1.6	Efectos de la Constante de Atenuación en la Distribución de Potenciales.....	21
Figura 1.7.	Efectos del Tiempo de Polarización en el Perfil de Atenuación de la Estructura.....	22
Figura 1.8.	Corrientes de Interferencia entre Tuberías.....	24
Figura 1.9.	Ampollamiento del Recubrimiento.....	26
Figura 1.10.	Variación de Voltaje en Zonas de Ingreso y Salida de Corriente.....	27
Figura 2.1.	Medición de Resistividades Eléctricas del Suelo – Método Wenner.....	31
Figura 2.2.	Resistividades Eléctricas del Suelo.....	33
Figura 2.3.	Medición de Potenciales entre CSE y Electrodo de Antimonio.....	36
Figura 2.4.	Nivel de pH del Suelo.....	37
Figura 2.5.	Muestra para Análisis de Suelo.....	39
Figura 2.6.	Instalación Típica de Ánodos de Sacrificio en Tuberías.....	45
Figura 2.7.	Instalación Típica de Ánodos Superficiales por Corrientes Impresas.....	46
Figura 2.8.	Circuito del Sistema de Protección Catódica para Tuberías Enterradas.....	51
Figura 3.1.	Instalación del Acueducto.....	65
Figura 3.2.	Prueba de Conductancia Eléctrica del Recubrimiento.....	67
Figura 3.3.	Distribución de Potenciales en Prueba de Conductancia Eléctrica del Recubrimiento.....	70
Figura 3.4.	Distribución de Potenciales en Prueba de Conductancia Eléctrica del Recubrimiento en Función del Área Superficial.....	71
Figura 3.5.	Medición de Potenciales Eléctricos.....	78
Figura 3.6.	Distribución Actual de Potenciales Eléctricos en Acueducto.....	86
Figura 3.7.	Distribución Actual de Corriente en el Acueducto.....	89
Figura 3.8.	Distribución de Potenciales Eléctricos en Función de la Calidad del Recubrimiento.....	92
Figura 3.9.	Distribución de Corriente en Función de la Calidad del Recubrimiento.....	95

Figura 3.10. Conductancia del Revestimiento FBE en Función del Porcentaje del Área Expuesta.....	97
Figura 3.11. Distribución de Potenciales Eléctricos con Alimentación en Abscisa Seleccionada.....	102
Figura 3.12. Distribución de Voltaje a Tierra Remota.....	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Características Técnicas del Acueducto.....	28
Tabla 2.	Lecturas de Resistencias y Resistividades Eléctricas – Método Wenner.....	32
Tabla 3.	Clasificación de Resistividades Eléctricas.....	35
Tabla 4.	Lecturas de pH.....	37
Tabla 5.	Resultados de Análisis de Suelo.....	40
Tabla 6.	Guía para Revisión de Datos de Análisis de Suelo.....	40
Tabla 7.	Cálculo de Corriente de Protección.....	42
Tabla 8.	Características del Lecho Anódico.....	50
Tabla 9.	Resistencia Específica del Recubrimiento en Función de su Calidad.....	56
Tabla 10.	Características Técnicas de los Cables Estandarizados.....	58
Tabla 11.	Lecturas de Potenciales en Prueba de Conductancia Eléctrica del Recubrimiento.....	69
Tabla 12.	Lecturas de Potenciales Naturales.....	77
Tabla 13.	Lecturas de Potenciales entre CSE.....	79
Tabla 14.	Conductancia Específica del Recubrimiento para Suelos de 1000 Ω – cm.....	83
Tabla 15.	Fórmulas de Atenuación de Corriente.....	84
Tabla 16.	Datos Teóricos vs. Prácticos.....	91
Tabla 17.	Ítems del Sistema de Protección Catódica.....	110

ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1. Ubicación de Cámaras en Acueducto
- PLANO 2. Detalle de Instalación del Lecho Anódico
- PLANO 3. Detalle de Poste de Medición

INTRODUCCIÓN

En el país se ejecutan continuamente obras que involucran tuberías enterradas debido principalmente a ser exportadores de petróleo y sus derivados. Así mismo, los nuevos proyectos de transporte de gas licuado de petróleo y expansión horizontal de la población que conlleva a la creación de nuevas líneas de alcantarillado y agua potable, se suman al sinnúmero de proyectos relacionadas con ductos y tuberías que requieren protección apropiada contra la corrosión, no solo para incrementar su vida útil sino también para evitar fallas que pueden llegar a ser catastróficas.

El uso de recubrimientos protectores en conjunto con protección catódica ha logrado a través de los años un registro de excelente desempeño en la protección de tuberías enterradas. Dentro de las variables de campo implicadas, la eficiencia del revestimiento es una de las de mayor trascendencia y a la vez una de las de mayor incertidumbre en la respuesta del SPC. En el presente trabajo se muestra la influencia del recubrimiento externo de una tubería enterrada y otras variables de campo con ecuaciones hiperbólicas que describen el fenómeno de atenuación en estructuras metálicas largas sujetas a protección catódica.

Hoy en día, organizaciones especializadas publican ocasionalmente casos de evaluación de distribuciones de potenciales donde ha existido fallas en estructuras por no mitigar correctamente la corrosión y se requiere peritaje, pero existen pocos artículos que demuestran su empleo en la etapa de diseño por no tener acogida debido a la creencia de la alta complejidad en dichas curvas y baja confiabilidad en los resultados que se obtienen. De la misma manera, la utilización de software de diseño asistido por computador que incluye análisis de atenuación de corrientes y potenciales es escasa en la industria. Las compañías que brindan el servicio en América Latina no ofrecen precios asequibles para difundir su utilización ni explotan los beneficios que se pueden obtener con esta herramienta computacional.

La implementación de ensayos sobre estructuras complementa la información técnica útil disponible para evaluar factores de interés intervinientes en la toma de decisión de diseño e instalación de SPC. La importancia de crear vínculos entre teoría y práctica, surge debido a la necesidad de integrar con pruebas de campo la evaluación de parámetros relevantes definidos de manera imprecisa en papel junto a la factibilidad de alternativas reales que puedan constituir una solución efectiva a este problema de ingeniería. Para lograr lo expuesto, el desarrollo de esta tesis abarca principalmente lo siguiente:

En el Capítulo 1 se describe los fundamentos teóricos que encierran los principios de funcionamiento de SPC, teoría de revestimientos y su impacto en las variables de diseño. Se presenta además criterios científicos y técnicos manejados en interferencia eléctrica entre estructuras metálicas.

En el Capítulo 2 se plantea un sistema por Corrientes Impresas con detalle en mediciones de campo preliminares del terreno y cálculos concernientes al problema propuesto. Se incluye selección y dimensionamiento de los componentes principales del sistema planteado.

En el Capítulo 3 se expone las mediciones de campo realizadas sobre una tubería enterrada y posteriormente se evalúa la calidad del revestimiento para conocer la atenuación de corriente y los gradientes de potenciales eléctricos. Se verifica las consideraciones iniciales de diseño, ubicación del lecho anódico y se plantean los posibles escenarios de interferencia eléctrica, seguidos de un análisis de su influencia.

Finalmente, en el Capítulo 4 se exponen las conclusiones respectivas de la importancia de los ensayos de campo y la necesidad del análisis de atenuación como parte integral del diseño de un SPC.

CAPÍTULO 1

1. PROTECCIÓN CATÓDICA EN TUBERÍAS ENTERRADAS.

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 fenómeno de polarización consiste en un cambio en el potencial eléctrico en dirección electronegativa y por lo consiguiente una disminución en la tasa de corrosión del material.



FIG. 1.1. INSTALACIÓN DE TUBERÍAS

En realidad, la protección catódica no elimina la corrosión. Lo que hace es transferirla de la estructura a proteger, al(los) ánodo(s) de protección catódica. Así, la estructura se convierte en el cátodo de una celda de corrosión artificial. La corrosión del metal se detiene una vez que la corriente de protección catódica iguala o excede la corriente de corrosión.

Para dimensionar un sistema de protección apropiado, es necesario disponer de datos útiles. A más de la información técnica disponible de las características de las tuberías y sus recubrimientos (que se pueden acceder de primera mano), es necesario realizar mediciones de campo que ofrezcan información veraz y precisa de la situación real tanto de la estructura como de su entorno.

1.1 Potenciales Eléctricos.

En el presente documento se evalúan primordialmente ensayos que merecen una correcta interpretación de las mediciones de potencial eléctrico. Estas lecturas generalmente consisten en medir el potencial estructura-electrolito, también denominado potencial tubería-suelo, y representa la diferencia de potencial entre la superficie metálica de la estructura y el electrolito que se mide con respecto a un electrodo de referencia en contacto con el mismo. La referencia más comúnmente usada para mediciones de control o monitoreo en tuberías es la del electrodo de cobre/sulfato de cobre (CSE).

En tuberías con sistemas de protección catódica funcionando, al haber flujo de corriente existe un cambio en el potencial eléctrico. Las mediciones pueden ser tomadas en puntos cercanos, preferiblemente sobre la tubería (como se muestra en la *Figura 1.2*) para evitar errores en mediciones por la resistencia del electrolito, o en puntos remotos ya considerando este factor en la medición final.

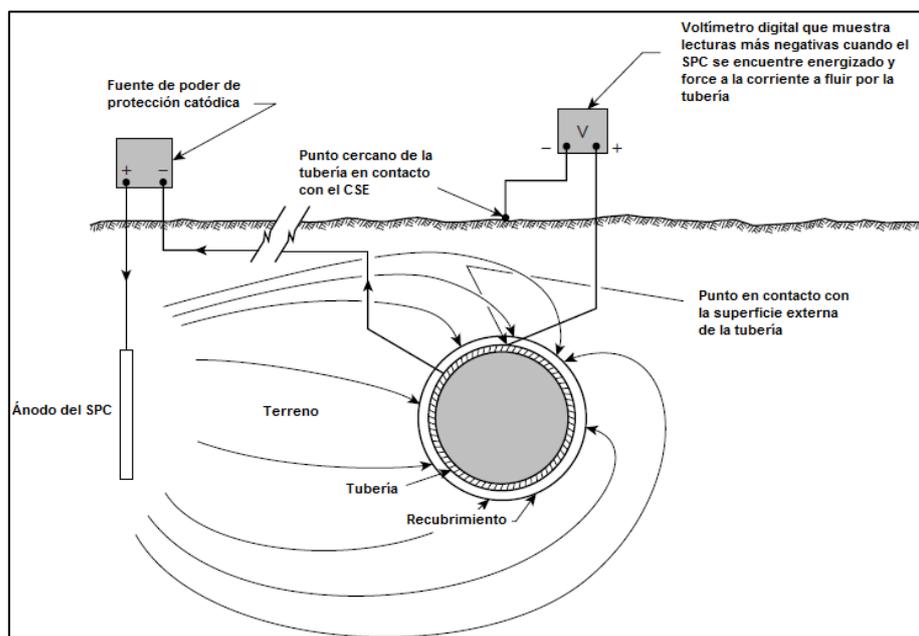


FIG. 1.2. MEDICIÓN DE POTENCIALES ELÉCTRICOS EN TUBERÍAS

En las pruebas generalmente se requiere medir el potencial polarizado a través de la interfase estructura-electrolito. Sin embargo, siempre que se mide un potencial el resultado es la sumatoria de todas las caídas de potencial en el circuito, como se aprecia en la *Figura 1.3*.

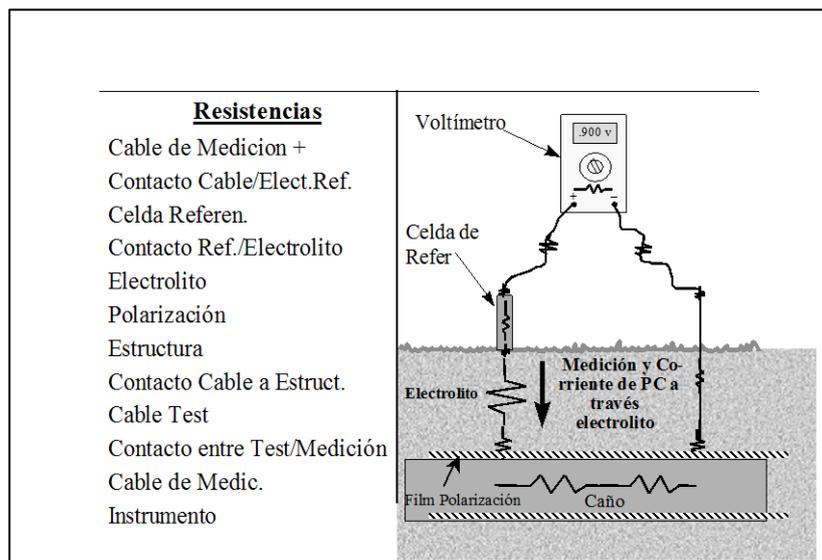


FIG. 1.3. CAÍDAS ÓHMICAS EN UN CIRCUITO

Para corroborar el funcionamiento de un SPC se puede recurrir a los criterios recomendados por Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión de Estados Unidos (NACE por sus siglas en inglés). A continuación se describen los tres criterios de mayor uso, de los cuales debe cumplirse al menos uno.

CRITERIO 1 - LECTURA POTENCIALES ON: Alcanzar un potencial negativo (catódico) de al menos 850 mV con la protección catódica aplicada. Este potencial se mide con respecto a un CSE en contacto con el electrolito. Para poder interpretar correctamente esta medición, deben tenerse en cuenta las otras caídas de

potencial, además de la que tiene lugar en la interfase estructura-electrolito.

CRITERIO 2 - LECTURA POTENCIALES OFF: Obtener un potencial polarizado negativo de al menos 850 mV con respecto al electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre.

CRITERIO 3 - LECTURA DE POTENCIALES OFF: Lograr un mínimo de 100 mV de polarización catódica entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia estable en contacto con el electrolito. La formación o desaparición de la polarización puede medirse para alcanzar este criterio:

- a. Con la corriente interrumpida, se debe observar como decae el potencial polarizado. Si el potencial se hace más positivo al menos 100 mV, se cumple este criterio. Generalmente se usa esta referencia si se desconoce los potenciales naturales.
- b. Si la lectura con la corriente interrumpida es al menos 100 mV más negativa que la lectura del potencial natural, se cumple el criterio. Este criterio es aplicable si se conoce los potenciales naturales de la estructura.

1.2 Pruebas de Campo.

En la actualidad existe una 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.

Como paso previo a efectuar cualquier medición, se debe cumplir con el relevamiento de información de la tubería. Con esto se puede obtener características técnicas de la estructura, poseer un sustento teórico preliminar y así poder planificar un programa de pruebas en campo.

Los siguientes ítems constituyen la información que debería ser recopilada usualmente antes de cualquier operación "in situ":

- Especificaciones técnicas de la tubería: dimensiones, características y espesores de recubrimientos, etc.
- Características del fluido a transportar: tipo, temperatura de operación.

- Planos de detalle de la tubería (recorrido, ubicación de accesorios, ductos cercanos y líneas de transmisión eléctrica).
- Fichas de Instalación, Inspección y Control de Corrosión (en caso de ser tuberías enterradas con anterioridad).
- Registros de potenciales naturales de la estructura (en caso se encuentre enterrada).

Las pruebas que se realicen deben servir como información complementaria para definir con claridad las variables de protección. El ingeniero de corrosión puede encontrarse con tres escenarios diferentes en lo concerniente a PC:

1.2.1 Mediciones Previo a la Instalación.

En este grupo se encierran los ensayos disponibles cuando aún no ha sido instalada la estructura a proteger y los resultados muestran únicamente información del electrolito. Las mediciones que pueden ser ejecutadas en este caso son:

- Medición de resistividad eléctrica del suelo.
- Medición de pH del electrolito.
- Determinación de constituyentes químicos del suelo.

Tener un conocimiento certero de la agresividad del suelo influye de manera directa en el SPC en tuberías, por lo que la ejecución de las pruebas mencionadas es primordial para un diseño confiable.

1.2.2 Mediciones sin Aplicación de Protección Catódica.

Adicional a las mediciones del suelo, se pueden obtener mediciones en campo una vez la tubería se encuentre enterrada. Estas mediciones ofrecen la ventaja de tener información de la estructura a proteger. A nivel de diseño, se logra mayor precisión en los cálculos y confiabilidad en el sistema propuesto. Las mediciones sobre las estructuras incluyen lo siguiente:

- Medición de potenciales naturales entre estructura-electrolito.
- Medición del flujo de corriente.
- Medición de la eficacia de la resistencia eléctrica del recubrimiento.
- Uso de instrumentación especializada para el estudio de condiciones inestables (corrientes de interferencia).
- Evaluación de requerimientos de corriente eléctrica.

La necesidad de efectuar una u otra prueba va a ir en función de las condiciones específicas de cada problema en particular; pero siempre con la finalidad de presentar un diseño integral y apropiado. Varias pruebas pueden definir algunos parámetros desde perspectivas diferentes.

1.2.3 Mediciones con Aplicación de Protección Catódica.

En caso de que las tuberías estuvieran con protección catódica existente, es probable que se requiera verificación del funcionamiento de la PC y tal vez una reingeniería en caso que los resultados no sean satisfactorios. Para dichos efectos, se pueden realizar pruebas que incluyan lo siguiente:

- Medición de potenciales de protección entre estructura-electrolito.
- Medición del flujo de corriente eléctrica en la tubería.
- Uso de instrumentación especializada para el estudio de condiciones inestables.

1.3 Recubrimientos.

Los revestimientos constituyen la estrategia principal en la mayoría de los programas de control de corrosión. Desafortunadamente, éstos no son perfectos, se deterioran con el tiempo e incluso ocurre corrosión acelerada en fallas localizadas. Se utilizan SPC en estos casos para evitar la corrosión del sustrato en las áreas afectadas.

Si bien es posible proteger una estructura desnuda, también es cierto que en una estructura revestida sólo hay que proteger el metal expuesto en las fallas. Esto reduce drásticamente el tamaño y costo de los SPC. Esta variable depende netamente de la calidad de revestimiento aplicado a tubería; si éste es compatible con la estructura y características de operación, posee buenas características aislantes, es resistente al desgaste por manipulación y conserva alta resistencia al flujo de corriente, será necesario proteger menor área.

La inspección del revestimiento tiene implicaciones significativas pues a pesar de que lo ideal es instalar la estructura con el revestimiento en las mejores condiciones posibles, esto no sucede en la práctica.

1.3.1 Efectividad del Recubrimiento en el Control de la Corrosión.

Inicialmente el control contra la corrosión en tuberías metálicas se relegaba únicamente al uso de materiales que recubrían su superficie con la finalidad de aislar el metal del medio corrosivo circundante. En la actualidad, las funciones de un recubrimiento externo, además de controlar la corrosión aislando del ambiente a la superficie externa de una tubería enterrada o sumergida, son la de reducir la corriente requerida para protección catódica y mejorar la distribución de corriente. Esto se logra con las siguientes características:

- Aislamiento eléctrico efectivo.
- Barrera contra humedad efectiva.
- Aplicación a la tubería sin consecuencias adversas.
- Aplicación con un mínimo de defectos.
- Buena adhesión a la superficie de la tubería.
- Habilidad para resistir la formación de defectos de revestimiento con el tiempo.
- Habilidad de resistir daño por manipulación, almacenamiento e instalación.

- Habilidad para mantener una resistividad eléctrica constante con el tiempo.
- Resistencia al desprendimiento.
- Facilidad de reparación.

Si la resistencia efectiva es inestable, la corriente de PC requerida puede aumentar significativamente cada cierto tiempo. Es común obtener medidas engañosas de alta resistencia en ensayos si el electrolito no se ha asentado alrededor de la tubería y si la humedad ha penetrado algún defecto en el recubrimiento.

1.3.2 Tipos de Recubrimientos.

Los recubrimientos pueden ser colocados en la superficie de la tubería en fábrica y en campo. Los tipos de revestimientos utilizados en tuberías son los siguientes:

- Barnices o Esmaltes Bituminosos.
- Poliolefinas y Polietileno Extruido.
- Cintas.
- Epoxi Fundido (FBE o Fusion Bonded Epoxi).
- Resinas Líquidas de Dos Componentes.

1.3.3 Otros Recubrimientos en Campo.

Las juntas soldadas y otros accesorios deben revestirse en campo. Para este procedimiento se usan distintos materiales, incluyendo mantas termo-contraíbles, cintas de aplicación en frío o caliente, resinas líquidas de dos componentes, masillas bituminosas y epoxi fundido. El revestimiento seleccionado debe ser compatible con el revestimiento adyacente y tan durable como el que ya tiene la propia estructura.

Deben tomarse varias precauciones para garantizar la aplicación de un revestimiento en campo. 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 funcionamiento correcto del SPC.

Cuando un recubrimiento es mal aplicado en las uniones, éstas pasan a ser fallas de áreas extensas, comprometiendo grandes porciones de tubería. Este tema requiere su debida importancia en las consideraciones del dimensionamiento de

un SPC ya que al existir áreas mucho mayores a proteger será necesaria una redefinición del problema.

1.4 Atenuación de Corriente.

La cantidad de polarización, y por lo tanto el nivel de protección catódica, dependen de la densidad de corriente aplicada a través de la interfase estructura-electrolito. Para alcanzar protección uniforme en toda la estructura en condiciones estándares se requiere una densidad de corriente uniforme (ideal) sobre la superficie en cuestión. Sin embargo, conseguir lo expuesto es virtualmente imposible en la práctica debido a factores como electrolito no uniforme, características de la estructura, ubicación de los ánodos, recubrimientos en mal estado, entre otros.

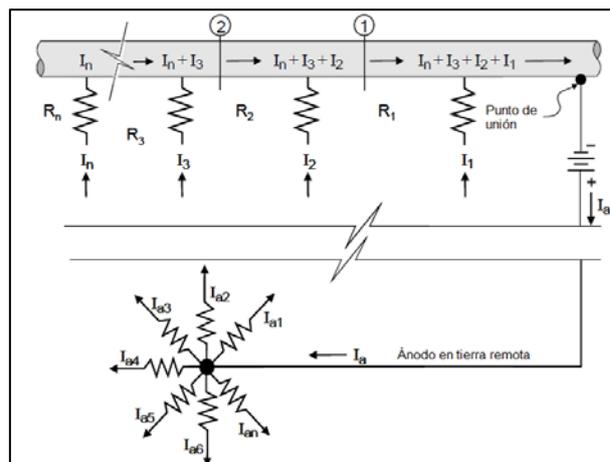


FIG. 1.4. RESISTENCIAS EN LA DISTRIBUCIÓN IDEAL DE CORRIENTES EN UN SPC

La protección catódica en una estructura requiere que la corriente llegue con densidad suficiente para mitigar los mecanismos de corrosión presentes en la interfase estructura-electrolito. La corriente aplicada y los potenciales eléctricos de la tubería varían a medida que se alejan de la fuente debido al fenómeno de atenuación (Ver *Figura 1.4*).

Se denomina **atenuación** al cambio de voltaje decreciente entre estructura-electrolito producido por la alimentación de corriente directa en una estructura metálica.

La idea de utilizar el cambio del potencial versus la distancia a través de un conductor para evaluar una tubería apareció en 1963 en una publicación realizada por E. D. Sunde. Más adelante, en 1948, fue Robert Pope quién escribió la sección de Protección Catódica en un Manual de Corrosión y dentro de este texto enunció que la distribución de corriente tiene una tendencia exponencial descrita por las siguientes expresiones:

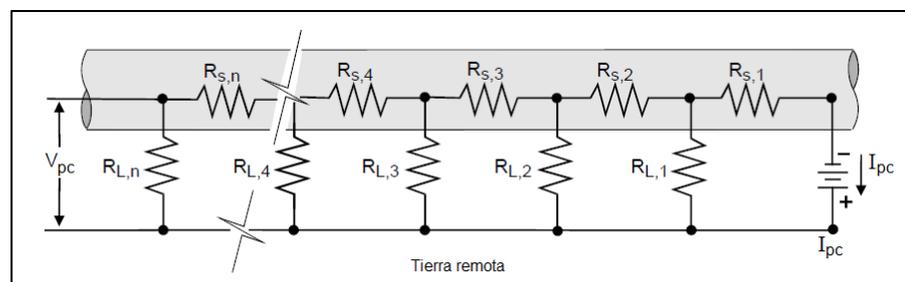
$$\Delta E_x = \Delta E_o^{-\alpha x} \quad (1)$$

$$\alpha = \sqrt{r \cdot g} \quad (2)$$

En 1960, el investigador D. Morgan, presenta una versión simplificada de la expresión matemática que gobierna las ecuaciones 1 y 2. Éstas son resultado de una ecuación diferencial de segundo orden:

$$\frac{\delta^2 E_x}{\delta x^2} = r \cdot g \cdot E_x \quad (3)$$

Estas fórmulas están gobernadas por los valores relativos de la resistencia longitudinal (r ó r_s) en ohmios por unidad de longitud y la resistencia de flujo de corriente del recubrimiento al electrolito (r_L) en ohmios por unidad de longitud; este último también suele expresarse como conductancia eléctrica (g) en siemens por unidad de longitud y representa el recíproco de la resistencia del recubrimiento al electrolito. Ambas características (Ver *Figura 1.5*) determinan la constante de atenuación de la estructura (α), la cual representa la razón de atenuación.



**FIG. 1.5. RESISTENCIAS ENTRE ESTRUCTURA -
ELECTROLITO**

La constante de atenuación describe la razón a la cual la corriente y el voltaje se reducen con la distancia desde el punto de alimentación a la estructura. En la *Figura 1.6* se puede apreciar como constantes pequeñas de atenuación pueden resultar en disminuciones bajas de potencial o corriente con la distancia y de la misma manera con grandes valores de la constante de atenuación se observan curvaturas mayores.

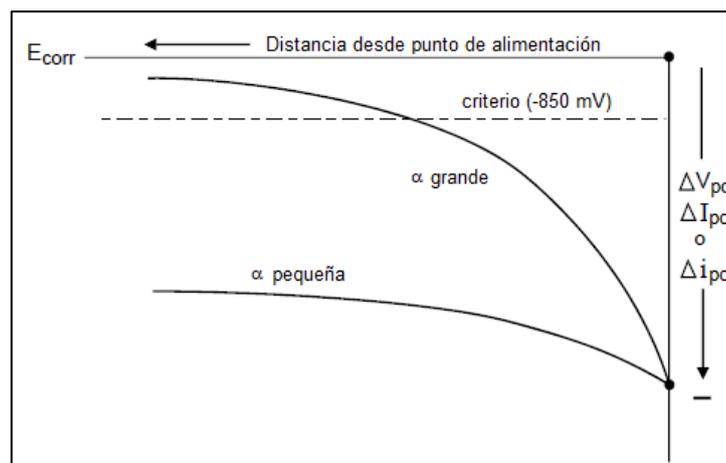


FIG. 1.6. EFECTOS DE LA CONSTANTE DE ATENUACIÓN EN LA DISTRIBUCIÓN DE POTENCIALES

La constante de atenuación será mayor si, por ejemplo, el recubrimiento es pobre, la resistividad del electrolito es baja, o la resistencia longitudinal de la tubería es alta.

Los cálculos de la distribución de corriente no incorporan normalmente los efectos de polarización pues éstos son relativamente complejos. Cuando la corriente es inicialmente aplicada, en la ausencia de polarización significativa, la distribución de la corriente de protección catódica es netamente determinada por las resistencias relativas de los caminos de la corriente. Esta distribución inicial es referida como distribución primaria de corriente.

Con el tiempo y la formación de los productos de las reacciones catódicas como depósitos calcáreos, el potencial de polarización se vuelve más negativo y por lo tanto esto genera menos atenuación, mejorando la distribución de corriente. En la *Figura 1.7* se muestra un esquema de la distribución de potenciales con el tiempo.

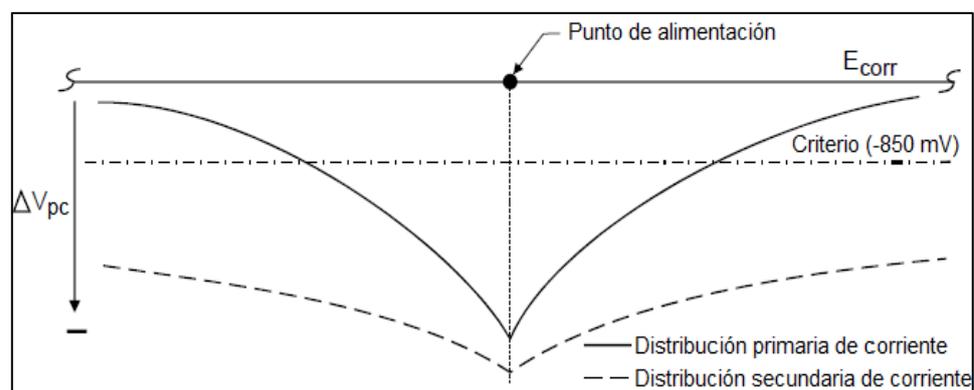


FIG.1.7. EFECTOS DEL TIEMPO DE POLARIZACIÓN EN EL PERFIL DE ATENUACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Efectos del Revestimiento en la Distribución de Corriente.

Un recubrimiento bien seleccionado tiene grandes efectos beneficiosos en la distribución de corriente pues reduce los requerimientos totales de protección. El efecto principal del recubrimiento consiste en la elevada resistividad eléctrica que posee, la cual incrementa la resistencia al flujo de la estructura y por lo tanto minimizando la atenuación.

1.5 Problemas de Interferencia.

La interferencia es cualquier perturbación eléctrica en una estructura metálica causada por una corriente parásita. Corriente parásita o vagabunda puede definirse como una corriente que circula hacia una estructura que no forma parte del circuito eléctrico previsto. Para que haya corrosión a causa de las corrientes vagabundas, debe haber un intercambio de corriente entre una estructura metálica y un medio electrolítico como se puede apreciar en la *Figura 1.8*.

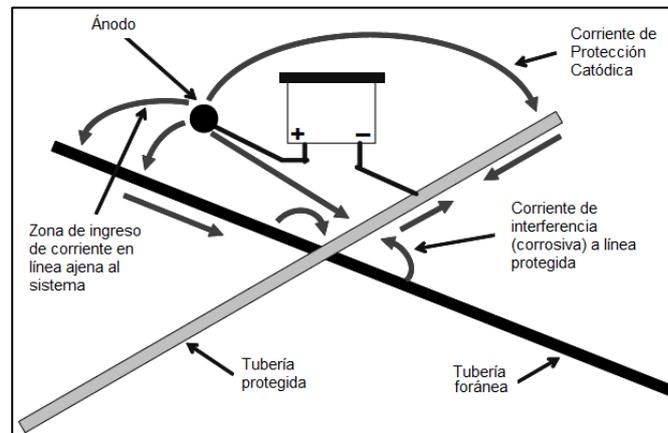


FIG.1.8. CORRIENTES DE INTERFERENCIA ENTRE TUBERÍAS

Las corrientes parásitas continuas tienen un efecto más pronunciado sobre la corrosión ya que circula en una misma dirección. En cambio, la corriente alterna (energía comercial alterna de 50 o 60 ciclos) invierte su dirección 100 ó 120 veces por segundo. Con algunas excepciones, la corriente alterna no genera corrosión significativa en los materiales estructurales comunes; no obstante, puede significar un serio peligro para la seguridad del personal.

Normalmente las corrientes de interferencias son recolectadas del electrolito por la estructura afectada desde una fuente de corriente que no se encuentre mecánicamente unida a la misma.

Según la Ley de Faraday, el peso de metal corroído es proporcional a la cantidad de corriente que se descarga desde el metal hacia el electrolito. La corrosión por corrientes vagabundas es un problema, ya que por lo general son corrientes muy grandes. Mientras la corrosión natural puede generar algunos miliamperios de corriente, una corriente vagabunda puede ser de varios cientos de amperes. Por lo tanto, al encontrar una corriente vagabunda, es necesario encontrar la fuente que la origina e implementar una solución.

Consecuencias de las Corrientes Parásitas.

Se puede pensar erróneamente que si la tubería recibe mayor cantidad de corriente, ésta se hallará mayormente protegida. Los efectos de corrientes parásitas en estructuras metálicas pueden ser dañinos, beneficiosos o inofensivos. En el caso de afectar negativamente a la tubería pueden causar daños irreversibles.

Consecuencias de la Sobreprotección.

Los potenciales más electronegativos que el rango aceptable pueden causar daño en el metal. No solamente se desperdicia la energía imprimada o el material del ánodo; potenciales negativos

excesivos pueden causar desprendimiento de un recubrimiento protector y también ampollamiento por hidrógeno en aceros.

El exceso de protección catódica puede resultar en generación de gas hidrógeno en las **zonas de ingreso de corriente** en la tubería. Cuando los potenciales de protección catódica alcanzan potenciales de polarización de -1100 mV (Instant Off) con respecto a un CSE, ocurre la generación del hidrógeno gaseoso.

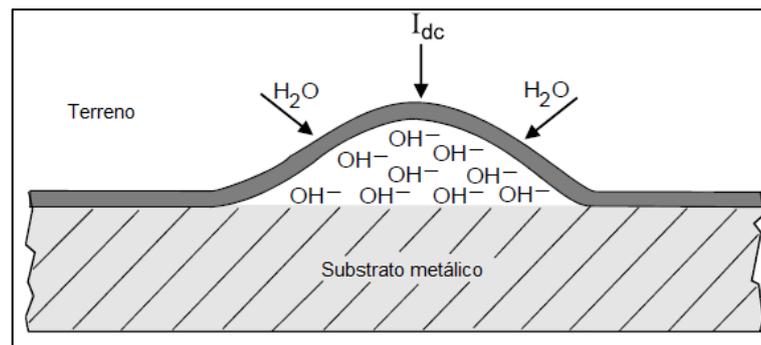


FIG. 1.9. AMPOLLAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO

Este fenómeno empieza por la presión originada bajo el recubrimiento debido al movimiento electro-osmótico de moléculas de agua a través del mismo, tal como se muestra en la *Figura 1.9*. El alto potencial de hidrógeno producido por las reacciones de reducción en la superficie del metal puede atacar la adhesión del revestimiento o actuar como una capa de óxido, resultando en

desmembramiento localizado. El hidrógeno producido cuando se excede en la corriente de protección catódica, puede resultar también en la reducción de la ductilidad del acero.

Cuando se **descarga corriente** de una estructura metálica al electrolito, ocurre una reacción de oxidación que convierte la corriente electrónica en corriente iónica. Si la protección catódica de la tubería no cubre esta salida de corriente, podrían existir pérdidas eventuales de material en las zonas de descarga, deteriorando el gasoducto y posteriormente ocasionando perforaciones si no se toman acciones correctivas a tiempo.

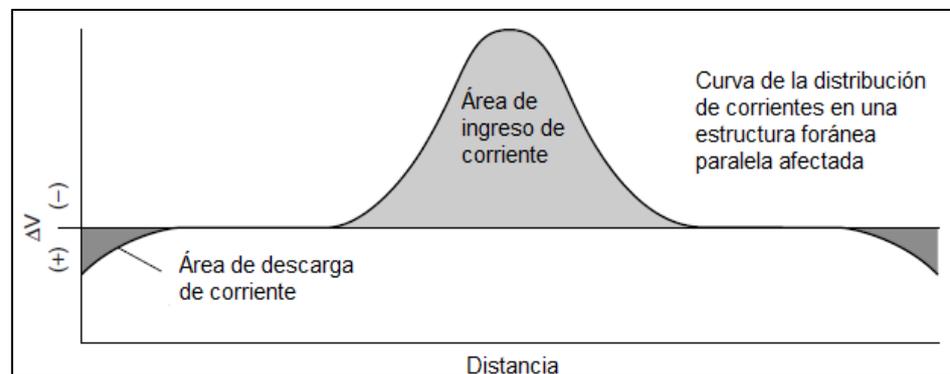


FIG. 1.10. VARIACIÓN DE VOLTAJE EN ZONAS DE INGRESO Y SALIDA DE CORRIENTE

CAPÍTULO 2

2. DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA EN TUBERÍA ENTERRADA.

Se presenta como caso de estudio una tubería de acero A-36 destinada al transporte de agua potable a temperatura ambiente. El acueducto instalado presenta 3 tramos con diferentes secciones transversales y extensiones de 3 y 12 metros entre las 343 uniones soldadas existentes. A lo largo del recorrido se ha instalado cámaras de aire, desagüe y corte, tal como se muestra en el *Plano 1* del Apéndice A. Las características técnicas principales para el desarrollo de la protección catódica del acueducto se describen en la *Tabla 1*.

TABLA 1
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ACUEDUCTO

Diámetro [mm]	Espesor [mm]	Longitud [m]	No. Uniones Soldadas	Recubrimiento	Espesor del Recubrimiento [mm]
1200	8	1400	152	PEAD NCH 2087	600
800	6	1320	135	PEAD NCH 2087	600
600	6	540	56	PEAD NCH 2087	600

Se prevé proteger a la tubería mediante un sistema que pueda ser efectivo en un periodo no menor a 20 años. Se procede a realizar la ingeniería del sistema de protección catódica con pruebas de campo e información técnica disponible del acueducto.

2.1 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 en el que se encuentra la tubería enterrada. Para esto se programa las pruebas a realizar definiendo parámetros como ubicación y cantidad de lecturas luego de estudiar el problema.

Para el diseño del sistema de protección catódica del acueducto todos los trabajos y estudios tienen como base las normas y recomendaciones prácticas internacionalmente aceptadas referentes a la Protección Catódica.

Los ensayos ejecutados para determinar la agresividad del suelo se realizaron en base a los procedimientos técnicos que incluyen los objetivos y materiales necesarios para las pruebas, y se encuentran anexados en el Apéndice B. Las lecturas se realizaron para determinar lo siguiente:

2.1.1 Resistividad Eléctrica.

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 realizan las pruebas en el terreno circundante al eje del acueducto con el método más ampliamente aplicado en el campo de corrosión para la obtención de resistividades eléctricas del electrolito, el método Wenner, o llamado también de las 4 picas. Este ensayo permite determinar la resistencia que tiene el suelo al paso de la corriente eléctrica y consiste en cuatro electrodos equidistantes conectados a un equipo que se encarga de causar un flujo de corrientes entre dos terminales (C1 y C2) mientras las otras dos restantes (P1 y P2) miden voltajes.

La resistividad del suelo se relaciona con la resistencia en base a la siguiente fórmula:

$$\rho = 2. \pi. a. R \quad (4)$$

Dónde:

ρ : Resistividad eléctrica del electrolito [Ω -cm]

a: Distancia entre pines [cm]

R: Resistencia eléctrica del suelo [Ω]

Se toman medidas a pines ubicados perpendicularmente a la tubería y espaciados 1.50, 3.00 y 4.50 metros que representan resistencias a dichas profundidades, como lo establece y recomienda el Standard ASTM G-57. Para mayor detalle del procedimiento, revisar el Apéndice B en la prueba de “Resistividad eléctrica del suelo”.



**FIG. 2.1. MEDICIÓN DE RESISTIVDADES ELÉCTRICAS
DEL SUELO – MÉTODO WENNER**

Un reconocimiento extenso de la resistividad del suelo fue conducido sobre el acueducto. Las mediciones de campo con lecturas cada 400 metros se exponen a continuación:

TABLA 2
LECTURAS DE RESISTENCIAS Y RESISTIVDADES
ELÉCTRICAS – MÉTODO WENNER

UBICACIÓN	DISTANCIA [cm]	LECTURA EQUIPO	ESCALA	RESISTENCIA [Ω]	RESISTIVIDAD [Ω-cm]
0+000	150	1.5	1	1.5	1413.7
	300	0.9	1	0.9	1696.5
	450	4.8	0.1	0.48	1357.2
0+400	150	2.8	1	2.8	2638.9
	300	1.6	1	1.6	3015.9
	450	1.1	1	1.1	3110.2
0+800	150	2.7	1	2.7	2544.7
	300	1.4	1	1.4	2638.9
	450	1.1	1	1.1	3110.2
1+200	150	1	1	1	942.5
	300	4.1	0.1	0.41	772.8
	450	2.9	0.1	0.29	820.0
1+600	150	0.9	1	0.9	848.2
	300	2.7	0.1	0.27	508.9
	450	2	0.1	0.2	565.5
2+000	150	0.9	1	0.9	848.2
	300	4.3	0.1	0.43	810.5
	450	2.7	0.1	0.27	763.4
2+400	150	4.3	0.1	0.43	405.3
	300	2.9	0.1	0.29	546.6
	450	2.1	0.1	0.21	593.8
2+800	150	1.3	1	1.3	1225.2
	300	5	0.1	0.5	942.5
	450	4	0.1	0.4	1131.0
3+200	150	3.2	1	3.2	3015.9
	300	1.2	1	1.2	2261.9
	450	0.8	1	0.8	2261.9

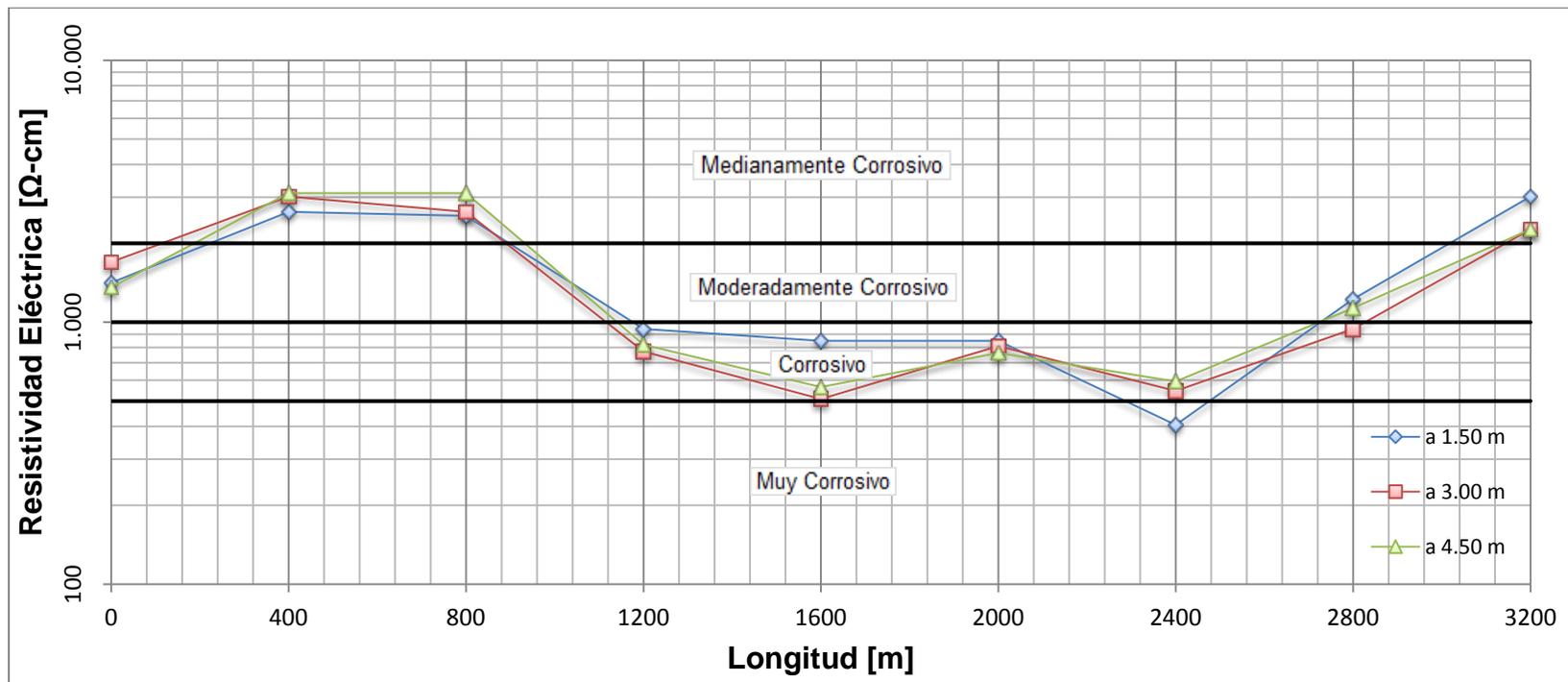


FIG. 2.2. RESISTIVIDADES ELÉCTRICAS DEL SUELO

Como observaciones generales se acota que las lecturas fueron tomadas en buen tiempo (soleado) y con terreno seco. De las observaciones particulares se tiene que las 3 lecturas iniciales, las abscisas 0+000, 0+400 y 0+800 se realizaron sobre terreno de relleno recientemente compactado. Posterior al punto kilométrico 1+200 la tubería se encuentra en zonas de cota baja por una extensión aproximada de 1600 metros y termina en un cerro, a cota elevada de terreno, cerca de 50 metros sobre el nivel del mar en comparación con 18 metros en cotas bajas. Las observaciones mencionadas reflejan similitud con la variación de las lecturas de resistividades eléctricas de la *Figura 2.2*.

Las resistividades eléctricas en el sector varían desde lecturas muy corrosivas por debajo de los 500 óhmios-centímetros y medianamente corrosivas por encima de los 2000 óhmios-centímetros; pero en promedio se puede evidenciar que las mediciones realizadas se concentran en la zona entre los 500 y los 1000 óhmios-centímetros, por lo que se considera suelo **moderadamente corrosivo** de acuerdo a la *Tabla 3*. La resistividad promedio a considerar

en cálculos posteriores será de 1411 Ω -cm basado en los resultados de resistividad eléctrica a 4.50 metros. Se escoge esta profundidad pues el acueducto se encuentra a dicha cota en promedio por debajo del nivel del suelo.

TABLA 3
CLASIFICACIÓN DE RESISTIVIDADES ELÉCTRICAS

RANGO DE RESISTIVIDAD [OHM-CM]	ACTIVIDAD CORROSIVA POTENCIAL
< 500	Muy corrosivo
500 – 1000	Corrosivo
1000 – 2000	Moderadamente corrosivo
2000 – 10000	Medianamente corrosivo
>10000	Progresivamente menos corrosivo

2.1.2 Análisis Químico.

Nivel de pH del Suelo

Otro factor a considerar en el diseño es el nivel de acidez del electrolito, indicado por el potencial de hidrógeno. El pH es una medida de concentración de iones de hidrógeno en el suelo; a menor pH (<7.0), mayor es la concentración iones hidrógeno (condiciones ácidas). A mayor pH (>7.0) es menor la concentración de iones hidrógeno (condición alcalina). Un pH ácido indica que el metal es activo y puede reaccionar

directamente con el electrolito produciendo hidrógeno gaseoso.



FIG. 2.3. MEDICIÓN DE POTENCIALES ENTRE CSE Y ELECTRODO DE ANTIMONIO

Con ayuda de electrodos CSE y Antimonio se procedió a la medición del potencial hidrogeno (pH) del suelo tal como se muestra en la *Figura 2.3*. El procedimiento se lleva a cabo como se describe en el Apéndice B en la práctica de “Obtención del pH del suelo”.

TABLA 4
LECTURAS DE pH

UBICACIÓN - PK	NÚMERO DE MEDICIÓN	LECTURA [mV]	LECTURA pH
0+000	1	-477	6.8
	2	-529	7.8
0+400	1	-491	7.2
	2	-480	6.9
0+800	1	-543	8.1
	2	-555	8.4
1+200	1	-535	7.9
	2	-517	7.7
1+600	1	-518	7.7
	2	-496	7.3
2+000	1	-511	7.5
	2	-466	6.6
2+400	1	-482	7.0
	2	-516	7.5
2+800	1	-480	7.0
	2	-490	7.1
3+200	1	-481	7.0
	2	-468	6.8

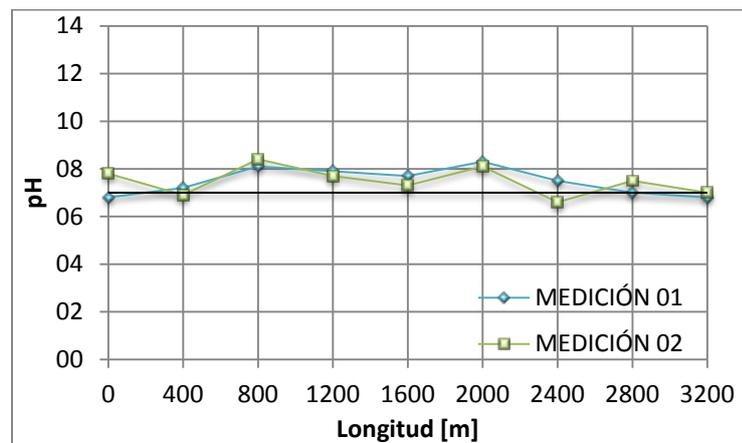


FIG. 2.4. NIVEL DE pH DEL SUELO

Se ejecutó ensayos de pH cada 400 metros en campo. Los resultados se muestran a continuación en la *Tabla 4*. Condiciones alcalinas no representan dificultades serias en tuberías de acero pues dicho ambiente no es agresivo con el acero. Lo contrario ocurre en condiciones ácidas alrededor de la tubería, pues a menor pH (y por lo tanto mayor acidez) se dificulta la polarización a potenciales de protección cuando se aplica la protección catódica, incrementando los requerimientos de corriente en el área. En las mediciones se puede observar un pH promedio de 7.4, muy cercano a un suelo neutro y también evidenciar en la *Figura 2.4* un comportamiento parejo en todas las muestras tomadas, por lo que el nivel de hidrógeno en el suelo no constituye un factor agresivo a considerar.

Determinación de cloruros y sulfatos

Como complemento a las mediciones de pH se presenta el análisis de suelo que incluye la presencia de cloruros y sulfatos mediante la obtención de muestras tal como se aprecia en la *Figura 2.5* y la posterior revisión en un laboratorio especializado.



FIG. 2.5. MUESTRA PARA ANÁLISIS DE SUELO

Con respecto a los resultados de análisis de suelo mostrados en la *Tabla 5* se puede apreciar suelos ligeramente salinos con base a las consideraciones de la *Tabla 6*, por lo que no hay incidencia de elementos contaminantes en el electrolito.

El análisis de contenidos de cloruros y sulfatos caracteriza al terreno como poco agresivo para la integridad estructural para las tuberías de acero.

TABLA 5
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

TABLA 6
GUÍA PARA REVISIÓN DE DATOS DE ANÁLISIS DE
SUELO

COMPONENTE	CORROSIVO	MUY CORROSIVO
pH	5.0 – 6.5	< 5.0
Cloruros	300 – 1000 PPM	> 1000
Sulfatos	1000 – 5000 PPM	> 5000

2.2 Parámetros Iniciales de Diseño.

2.2.1 Densidad de Corriente.

Si bien existen métodos para estimar los requerimientos de corriente de una estructura, estos pueden no ser del todo determinantes por diversas razones. Es común en la práctica asumir una densidad de corriente que acoja tanto las recomendaciones y tablas normalizadas, como la experiencia del diseñador en sistemas similares. La densidad de corriente a emplear en el diseño del sistema de este problema es de 20 mA/m^2 (*), la cual ha ofrecido un nivel adecuado de protección en casos similares.

2.2.2 Área de Protección.

Generalmente la protección catódica es empleada como método complementario de protección contra la corrosión. El área a proteger depende directamente de la eficiencia de los métodos adicionales empleados en la protección de la estructura, como es en este caso el estado del recubrimiento de la tubería. De manera preliminar se estima la eficiencia teórica del revestimiento de 97%; una vez el

(*) Información proporcionada por Instructor NACE, Ing. Héctor Albaya (CP4 – Cathodic Protection Specialist).

acueducto se encuentre operativo, tomando en consideración posibles daños por transporte, almacenamiento, bajado, tapado y deterioro paulatino de la tubería con el paso del tiempo.

La idea principal en la obtención del área representativa a proteger con un SPC consiste en dimensionar el sistema de tal manera que soporte estos cambios. Este parámetro debe considerar los peores escenarios posibles. Inicialmente la tubería puede ser protegida con menor cantidad de corriente debido a que el área de exposición al electrolito es menor, no obstante ésta aumentará.

2.2.3 Corriente de Protección.

Posteriormente 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. Se utiliza la siguiente expresión:

$$I = Dc \cdot As \cdot (1 - \epsilon) \quad (5)$$

Dónde:

Dc: Densidad de corriente [20 mA/m²]

A_s : Área de contacto entre tubería y electrolito [m^2]

ε : Eficiencia del Revestimiento [0.97]

En la *Tabla 7* se observa los requerimientos de corriente de la tubería por sección transversal utilizando la ecuación 2, y muestra que para proteger al acueducto es necesario imprimirle 9.6 amperios de corriente directa.

TABLA 7
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

Por criterios de diseño se prioriza la distribución de corriente y minimizar eventuales corrientes de interferencia; esto significa en términos de corriente de protección contar con energía que pueda soportar cambios de requerimientos, por estos se ha considerado utilizar un factor de corrección del 25% con respecto a los valores calculados.

$$I_D = 1.25 I \tag{6}$$

Dónde:

I_D : Corriente de diseño [A]

I : Corriente mínima de protección [A]

$$I_D = (1.25)(9.6 A)$$

$$I_D = 12.0 A$$

Este factor de seguridad que aumenta el requerimiento de corriente de protección a 12 amperios, cubre también el deterioro natural del recubrimiento de la tubería con el paso de los años que conllevaría a necesitar mayor de corriente de protección.

2.2.4 Sistema de Protección Catódica a Emplear.

Se procede a seleccionar el método apropiado considerando las variables particulares del problema propuesto y analizando las alternativas de protección.

- **Sistema de Protección Catódica por Ánodos de Sacrificio.**

La posibilidad de colocar ánodos de sacrificio a distancias relativamente corta de la superficie a proteger como se muestra en la *Figura 2.6*, puede mejorar la distribución de corriente y concentrarla sobre la superficie de la tubería,

minimizando corrientes de interferencia no solo por la corriente provista sino también por el campo de potencial que estos ánodos de sacrificio producirían.

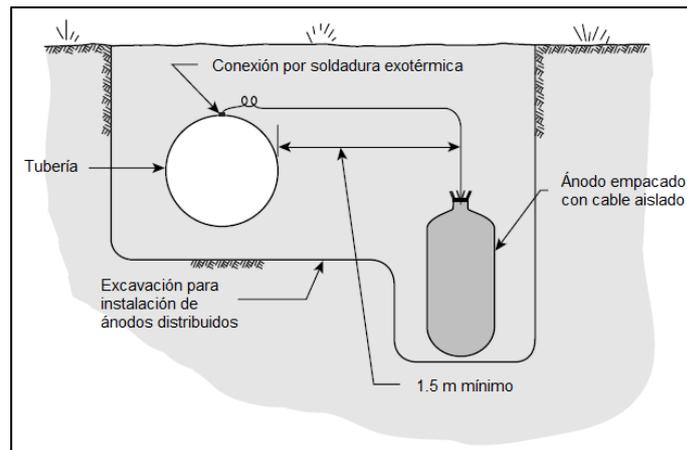


FIG.2.6. INSTALACIÓN TÍPICA DE ÁNODOS DE SACRIFICIO EN TUBERÍAS

Aspectos discutibles para este tipo de sistemas son la expectativa de vida útil reducida y la gran cantidad de material requerido para cubrir áreas extensas por lo que no podría ser económicamente factible en grandes superficies.

- **Sistema de Protección Catódica por Corrientes Impresas con Ánodos Superficiales.**

Los dispersores por corrientes impresas, a diferencia de los galvánicos, puede suministrar una corriente mucho mayor. Son aplicables para superar problemas de interferencia por corrientes parásitas y donde el área de protección es relativamente alta.

Como limitante se puede citar la necesidad de instalar un equipo adicional (transformador-rectificador) como se muestra en la *Figura 2.7*, lo que demandará alimentación energética por parte de un poste eléctrico cercano con el voltaje de ingreso requerido por el equipo, o en su defecto una alternativa de generación eléctrica, lo cual puede resultar costoso pues en el país no se han desarrollado las energías alternativas para que sean competitivas a las convencionales.

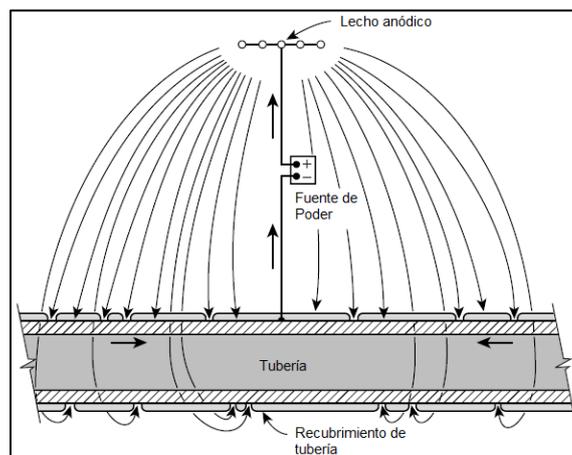


FIG. 2.7. INSTALACIÓN TÍPICA DE ÁNODOS SUPERFICIALES POR CORRIENTES IMPRESAS

- **Toma de Decisión.**

El tipo de sistema de protección catódica depende de la cantidad y distribución del área superficial en contacto con el electrolito de estructura a proteger, el estado del sustrato metálico, la calidad del revestimiento, la condición de resistencia del electrolito y finalmente las disponibilidades de corriente en baja tensión.

El empleo de ánodos de sacrificio resulta una opción poco apropiada dada la gran extensión de la tubería, pues acarrearía problemas en la distribución de corriente en la superficie a proteger. Adicionalmente se debe considerar la vida útil, encareciendo el mantenimiento de este sistema en forma periódica por demandar nuevos materiales y empleo de mano de obra calificada.

La alternativa de emplear dispersores de corriente con un módulo que cumpla con la función de fuente de energía constituyen una alternativa viable que cuenta

con buena confianza de funcionamiento por la incorporación no sólo de materiales con alta confiabilidad, sino también por diseños exitosamente probados por la industria en un sinnúmero de aplicaciones en todo el mundo con excelente desempeño.

Entre las opciones a escoger dentro de las instalaciones por corrientes impresas puede sonar atractivo el instalar un sistema de protección catódica por dispersores profundos, que paliaría problemas como interferencia en estructuras aledañas. La alternativa no resulta del todo realizable por cuestión económica ya que ésta se emplea generalmente en casos donde la interferencia es crítica y se protegen grandes masas metálicas.

En todo caso, para poder cubrir las necesidades de corriente obtenidas en los cálculos preliminares, se propone un sistema de protección catódica 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, sistemas de protección catódica existentes en estructuras vecinas, vida útil esperada de los sistemas a implementar, espacio físico disponible y factibilidad económica.

2.3 Lecho Anódico a Considerar.

Como es entendido, el diseño es un proceso iterativo. Los cálculos y resultados mostrados a continuación son fruto de procesamiento de datos reproducidos con los análisis respectivos hasta llegar a una solución apropiada.

Basados en características técnicas obtenidas de proveedores del mercado y experiencia en el área, se realiza una selección preliminar de los ánodos, así como las especificaciones concernientes de relleno, cableado y disposición geométrica de instalación.

Se decide instalar un lecho anódico alimentado con un rectificador convencional y que cumple con la descripción de las características de la *Tabla 8*. Para esta etapa del diseño es necesario mantener actualizada la información técnica de materiales disponibles en el mercado, pues para cálculos posteriores se requiere de datos

concretos otorgada por cada proveedor en base al tipo y calidad de sus productos. Lo mencionado ocurre principalmente en los ánodos; en los que usualmente se presentan nuevos modelos o ligeras variaciones en composiciones químicas para optimizar la utilidad de los ya existentes.

TABLA 8
CARACTERÍSTICAS DEL LECHO ANÓDICO

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Separación entre ánodos	5 metros
Número de ánodos	10
Ubicación	100 metros del acueducto
Tipo de ánodo	MMO
Diámetro de ánodo	0.0125 metros
Longitud de ánodo	1.524 metros
Capacidad de corriente	2.62 Amp/m
Cable de salida de ánodo	TTU #8 AWG
Longitud de cable por ánodo	3.05 metros
Vida del dispersor	20 años
Tipo de backfill	Coque SC-3
Diámetro del hoyo del backfill	0.152 metros
Longitud del hoyo del backfill	2.134 metros
Tipo de cable HEADER (principal)	TTU #6 AWG
Longitud del cable HEADER	145 metros

2.4 Cálculo de Resistencias Eléctricas del Circuito de Protección Catódica.

Con los datos presentados y las mediciones de campo en el electrolito se procede a realizar los cálculos de resistencias eléctricas. Con esto se completa los requerimientos de energía para el sistema propuesto con el cálculo del voltaje de salida del rectificador. Las resistencias a calcular para sistemas por corrientes impresas son las siguientes:

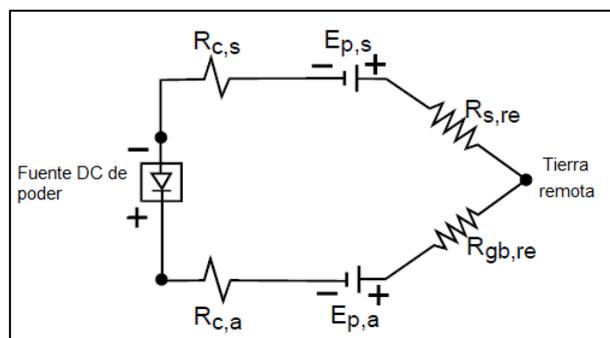


FIG. 2.8. CIRCUITO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA PARA TUBERÍAS ENTERRADAS

Dónde:

$R_{c,s}$: Resistencia del cable negativo hacia la tubería [Ω]

$E_{p,s}$: Potencial polarizado de la estructura [V]

$R_{s,re}$: Resistencia de la tubería a tierra remota [Ω]

$R_{gb,re}$: Resistencia del lecho anódico a tierra remota [Ω]

$E_{p,a}$: Potencial polarizado de la cama anódica [V]

$R_{c,a}$: Resistencia del cable positivo del lecho anódico [Ω]

El circuito de la *Figura 2.8* muestra las resistencias intervinientes en el cálculo del dimensionamiento del rectificador. A mayor resistencia del circuito, se necesitará mayor voltaje de la fuente para llegar a la corriente de protección.

A continuación se presenta el desglose de las resistencias calculadas:

Cálculo de la Resistencia del Lecho Anódico a Tierra Remota

Se utiliza la ecuación de Sunde para calcular la resistencia eléctrica de camas anódicas de múltiples dispersores tomando en consideración la resistencia debido a interferencia mutua de los ánodos:

$$R_{gb, re} = \frac{\rho}{2\pi NL} \left(\log \frac{8L}{d} - 1 + \frac{2L}{S} (2.3 \log 0.656N) \right) \quad (7)$$

Dónde:

- ρ : Resistividad eléctrica promedio [Ω -cm]
- N: Número de ánodos en paralelo
- L: Longitud de Ánodos [m]
- d: Diámetro de ánodos [m]
- S: Espaciamiento entre ánodos [m]

En este cálculo se toman las dimensiones del relleno (backfill) y no del ánodo pues uno de los motivos principales para colocar un material con baja resistividad eléctrica es el de incrementar la superficie de contacto del ánodo con el electrolito y así tener mayor y mejor distribución de corriente.

$$R_{gb,re} = \frac{14.11\Omega\text{-m}}{2\pi(10)(2.13\text{m})} \left(\log \frac{8(2.13\text{m})}{0.1524\text{m}} - 1 + \frac{2(2.13\text{m})}{5\text{m}} (2.3 \log 0.656(10)) \right)$$

$$R_{gb,re} = 0.545 \Omega$$

Cálculo de la Resistencia de la Tubería a Tierra Remota

La resistencia del acueducto a tierra remota ($R_{s,re}$) está compuesta por dos resistencias en serie, las cuales son: la resistencia de la tubería hacia el recubrimiento ($R_{s,re1}$) y la resistencia del recubrimiento hacia el terreno ($R_{s,re2}$). Para tuberías enterradas desnudas no aplica el cálculo de la segunda resistencia pues no existiría el recubrimiento; sin embargo en este caso la tubería es nueva y posee un revestimiento, el cual es evaluado en el siguiente capítulo.

De manera preliminar para dimensionar el sistema se realizan cálculos teóricos con asunciones de la calidad del recubrimiento por inspección visual en puntos varios de la tubería instalada y el tipo de recubrimiento aplicado en las uniones soldadas. Las juntas

fueron recubiertas con una pintura “primer” bituminosa y un “tape” resistente dimensionalmente estable para aplicar en tuberías enterradas en juntas y accesorios. Se verifica una selección adecuada de recubrimientos aplicados en campo.

a) Cálculo de la Resistencia de la tubería al recubrimiento

La resistencia longitudinal de la tubería se la obtiene con la expresión mostrada a continuación:

$$R_{s, re1} = \rho_{cu} \sum_{i=1}^3 \frac{L_i}{A_i} \quad (8)$$

Dónde:

ρ_{cu} : Resistividad eléctrica del acero [$20\mu \Omega$ -cm]

L_i : Longitud de la tubería en sección i [m]

A_i : Área de sección transversal de tubería [m^2]

Al existir tres tramos de tubería con diferente sección y longitudes, se efectúa el cálculo individualmente y se suman los resultados con cada diámetro y longitud mostrados en la *Tabla 1*.

$$R_{s, re1} = (0.20\mu \Omega - m) \left(\frac{1400m}{0.030m^2} + \frac{1320m}{0.015m^2} + \frac{540m}{0.011m^2} \right)$$

$$R_{s, re1} = 0.037 \Omega$$

b) Cálculo de la Resistencia entre Recubrimiento y Electrolito.

Para tuberías con recubrimiento, la mayor porción de la resistencia a tierra se da a través del revestimiento. Con un estimado de la resistencia específica del recubrimiento (obtenido en tablas referenciales) se puede calcular dicha resistencia con la siguiente expresión:

$$R_{s.re2} = \frac{r'_c}{A_s} \quad (9)$$

Dónde:

r'_c : Resistividad específica del recubrimiento [$\Omega\text{-m}^2$]

A_s : Área superficial de la tubería [m^2]

Con una resistividad específica del recubrimiento de $14110 \Omega\text{-m}^2$ en promedio para tuberías con “excelente” revestimiento ($1 \times 10^4 \Omega\text{-m}^2$ en suelo de $1000 \Omega\text{-cm}$), tomado con referencia en la *Tabla 9*, la resistencia del recubrimiento en función de su calidad para tuberías largas con muchos accesorios y con la resistividad promedio de la sección anterior se obtiene:

$$R_{s, re} = \frac{14110\Omega\text{-m}^2}{9613.3\text{ m}^2}$$

$$R_{s, re2} = 1.468\ \Omega$$

TABLA 9
RESISTENCIA ESPECÍFICA DEL RECUBRIMIENTO
EN FUNCIÓN DE SU CALIDAD

Tuberías largas con pocos accesorios	Conductancia Especifica Promedio del Recubrimiento G		Resistencia Especifica Promedio del Recubrimiento R' (1/G)	
	Calidad del recubrimiento	Siemens/ft ²	Siemens/m ²	Ω-ft ²
Excelente	<1 x 10 ⁻⁵	<1 x 10 ⁻⁴	>10 ⁵	>10 ⁴
Bueno	1 x 10 ⁻⁵ to 5 x 10 ⁻⁵	1 x 10 ⁻⁴ to 5 x 10 ⁻⁴	2 x 10 ⁴ to 10 ⁵	2 x 10 ³ to 10 ⁴
Regular	5 x 10 ⁻⁵ to 1 x 10 ⁻⁴	5 x 10 ⁻⁴ to 1 x 10 ⁻³	10 ⁴ to 2 x 10 ⁴	10 ³ to 2 x 10 ³
Malo	>1 x 10 ⁻⁴	>1 x 10 ⁻³	<10 ⁴	<10 ³
Tubería sin recubrimiento (5 a 30 cm)	4 x 10 ⁻³ to 2 x 10 ⁻²	4 x 10 ⁻² to 2 x 10 ⁻¹	50 to 250	5 to 25

Tuberías largas con muchos accesorios	Conductancia Especifica Promedio del Recubrimiento G		Resistencia Especifica Promedio del Recubrimiento R' (1/G)	
	Calidad del recubrimiento	Siemens/ft ²	Siemens/m ²	Ω-ft ²
Excelente	<5 x 10 ⁻⁵	<5 x 10 ⁻⁴	>2 x 10 ⁴	>2 x 10 ³
Bueno	5 x 10 ⁻⁵ to 1 x 10 ⁻⁴	5 x 10 ⁻⁴ to 1 x 10 ⁻³	10 ⁴ to 2 x 10 ⁴	10 ³ to 2 x 10 ³
Regular	1 x 10 ⁻⁴ to 5 x 10 ⁻⁴	1 x 10 ⁻³ to 5 x 10 ⁻³	2 x 10 ³ to 10 ⁴	2 x 10 ² to 10 ³
Malo	>5 x 10 ⁻⁴	>5 x 10 ⁻³	<2 x 10 ³	<2 x 10 ²
Tubería sin recubrimiento (5 a 30 cm)	4 x 10 ⁻³ to 2 x 10 ⁻²	4 x 10 ⁻² to 2 x 10 ⁻¹	50 to 250	5 to 25

La mayor parte de la superficie de la tubería posee el revestimiento en estado excelente por lo que su resistencia sería del orden de los 60Ω con un espesor de 600 μm y las zonas expuestas en el orden de los 60 mΩ,

con diferencias de cuatro órdenes de magnitud. El resultado de la resistencia entre electrolito y tubería representa la media entre los puntos con el revestimiento en excelente estado y las zonas expuestas por defectos en el recubrimiento (puntos calientes).

Cabe señalar que en el tema de resistencias eléctricas, el asumir un revestimiento excelente significa considerar las peores condiciones posibles, pues mientras mejor sea el recubrimiento menor será la conductividad entre el electrolito y la estructura.

Regresando a los cálculos, al sumar ambos componentes:

$$R_{s,re} = R_{s,re1} + R_{s,re2} \quad (10)$$

$$R_{s,re} = 0.037 \, \Omega + 1.468 \, \Omega$$

$$R_{s,re} = 1.505 \, \Omega$$

Errores en el cálculo de resistencia del recubrimiento puede llevar a dimensionar incorrectamente la fuente de poder y no alcanzar los criterios de protección, desencadenando en la utilización de alternativas de protección complementarias costosas.

Cálculo de Resistencia de Cables en el Sistema Propuesto

Las resistencias de cables incluyen tanto a $R_{c,s}$ como a $R_{c,a}$ (ver *Figura 2.7*). Para cables sólidos de cobre, la resistencia del conductor (R_c) se la obtiene con la expresión:

$$R_c = r_{dc}L \quad (11)$$

Dónde:

R_c : Resistencia del cable [Ω]

r_{dc} : Resistencia del cable por unidad de longitud (estandarizado – *Tabla 10*) [Ω /m]

L: Longitud del cable [m]

TABLA 10
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS CABLES
ESTANDARIZADOS

Tamaño AWG	Diámetro exterior sin recubrimiento (pulg)	Peso Apróx. sin incluir recubrimiento (lb/1000ft)	Fuerza de rotura máxima (lbs)	Resistencia máxima a corriente DC (Ohms/1000ft)	Corriente DC máxima permitida (Amperios)
14	0.0726	12.68	130	2.5800	15
12	0.0915	20.16	207	1.6200	20
10	0.1160	32.06	329	1.0200	30
8	0.1460	50.97	525	0.6400	45
6	0.1840	81.05	832	0.4030	65
4	0.2320	128.90	1320	0.2540	85
3	0.2600	162.50	1670	0.2010	100
2	0.2920	204.90	2110	0.1590	115
1	0.3320	258.40	2660	0.1260	130
1/0	0.3730	325.80	3350	0.1000	150
2/0	0.4190	410.90	4230	0.0795	175
3/0	0.4700	518.10	5320	0.0631	200
4/0	0.5280	653.30	6453	0.0500	230
250 MCM	0.5750	771.90	7930	0.0423	255

- a) El cable No.6 AWG que cubre el espacio de 145 metros entre estructura y cama anódica (100 metros de conexión de tubería-lecho y 45 metros de cama anódica) tiene una tasa de resistencia de 1.322 Ohmios por cada 1000 metros de longitud.

$$R_{c\#6} = (1.322\Omega/1000m)(145m)$$

$$R_{c\#6} = 0.192 \Omega$$

- b) El cable No.8 AWG que cubre el espacio de 30.5 metros desde los ánodos al cable principal que une el lecho al rectificador. La tasa de resistencia es de 2.100 Ohmios por cada 1000 metros de longitud.

$$R_{c\#8} = (2.100\Omega/1000m)(30.5m)$$

$$R_{c\#8} = 0.064 \Omega$$

Lo que da una resistencia total por concepto de cables de conexión del sistema de:

$$R_c = R_{c,a} + R_{c,s} = R_{c\#6} + R_{c\#8} \quad (12)$$

$$R_c = 0.192 \Omega + 0.064 \Omega$$

$$R_c = 0.256 \Omega$$

Finalmente, se obtiene la Resistencia Total del Sistema de Protección Catódica (R_{cp}) con la siguiente expresión:

$$R_{cp} = R_{gb,re} + R_{s,re} + R_c \quad (13)$$

Dónde:

R_{cp} : Resistencia del sistema [Ω]

R_c : Resistencia del cable en las conexiones del lecho [Ω]

$R_{s,re}$: Resistencia de la estructura a tierra remota [Ω]

$R_{gb,re}$: Resistencia del lecho anódico a tierra remota [Ω]

$$R_{cp} = 0.545 \Omega + 1.505 \Omega + 0.256 \Omega$$

$$R_{cp} = 2.306 \Omega$$

Por lo tanto, el circuito del SPC propuesto tiene una resistencia total de **2.306 Ω** .

2.5 Selección de Fuente de Poder.

Por la cercanía de postes de cableado eléctrico en las vías aledañas al acueducto y costo relativo bajo de equipos y mantenimiento, se decide utilizar un rectificador convencional. Para dimensionar el equipo se necesita definir lo siguiente:

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. Con la resistencia global calculada de 2.306Ω , considerando todas las resistencias al flujo de corriente en el circuito de protección catódica del acueducto, se obtiene el voltaje requerido para que el rectificador pueda generar la demanda de 12 amperios.

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” o “back voltage” y generalmente asumido como 2 voltios para los cálculos de este tipo.

$$V_{TR} = R_{cp}I + 2V_{BackVoltage} \quad (14)$$

$$V_{TR} = (2.306 \Omega)(12 A) + 2V$$

$$V_{TR} = 29.7 V$$

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 las siguientes características:

- Corriente de salida: 12 Amperios
- Voltaje de salida: 30 Voltios

Adicionalmente, se selecciona si el equipo será enfriado en aire o aceite. El segundo caso se lo utiliza generalmente en zonas de riesgo con clasificación normada por el peligro que generaría una chispa con los demás equipos operando en el entorno, condición que no se presenta en este problema, por lo que se selecciona un rectificador enfriado en aire.

La alimentación de energía convencional en el país es de 110-220 V_{AC} , por lo que se requiere un rectificador con dichas opciones de entrada. El equipo suele venir prefijado para una entrada en particular, sin embargo el manual indica como modificar de manera sencilla en forma mecánica el voltaje de ingreso.

Los resultados obtenidos muestran una correlación apropiada entre características del rectificador, lecho anódico y factores económicos. Se continúa con la selección de la ubicación del sistema de protección catódica y los efectos de dicho

posicionamiento con el acueducto y su entorno; para el efecto se debe tener una visión más real del estado del recubrimiento y como se distribuyen los potenciales a lo largo de la tubería, además de posibles afectaciones de corrientes de interferencia.

A continuación se muestra la evaluación de las curvas de corrientes y potenciales eléctricos en la estructura con un enfoque principalmente en la influencia de la eficiencia del revestimiento.

CAPÍTULO 3

3. EVALUACIÓN DEL SISTEMA CATÓDICO EN BASE A RELEVAMIENTO EN CAMPO E INFLUENCIA DE INTERFERENCIA.

Como condición inicial para realizar pruebas de campo sobre estructuras en electrolitos, éstas deben estar aisladas eléctricamente de su entorno. Por ello, para realizar los ensayos es necesario contar con juntas dieléctricas que aíslen el acueducto (en caso que la tubería se encuentre conectada a otras estructuras metálicas), y de esta manera evitar que sea afectada por posibles protecciones de otras estructuras. El kit de aislamiento empleado en la tubería está conformado por arandelas, manguitos y la junta.

El acueducto fue enterrado previo a la elaboración de la ingeniería de la protección catódica por lo que es posible realizar en campo pruebas adicionales a las mencionadas en el capítulo anterior, las mismas que se describen a continuación.



FIG. 3.1. INSTALACIÓN DEL ACUEDUCTO

3.1 Mediciones de Campo en Tubería Instalada.

Como se mencionó anteriormente, si la tubería se encuentra instalada se pueden realizar mayor cantidad de pruebas que entreguen resultados más cercanos a la realidad. 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.

3.1.1 Conductancia Eléctrica del Recubrimiento.

La conductancia de un revestimiento es expresada en términos de siemens (S) o también llamados mhos, generalmente con notación científica de 10^{-6} por la naturaleza de las lecturas. Esta propiedad puede variar considerablemente a lo largo de la tubería debido a cambios en la resistividad promedio del suelo, nivel de polarización y factores del recubrimiento tales como tipo, edad, espesor, nivel de daño e inspecciones de calidad durante la instalación de la tubería. En áreas con recubrimiento deteriorado, los valores de conductancia son elevadas mientras que lo contrario sucede en zonas con buen revestimiento.

Medición de Conductancia Eléctrica.

En la actualidad se emplean varios métodos de medición de esta propiedad del recubrimiento en secciones de tuberías enterradas. En el presente documento se utiliza el método de atenuación del potencial eléctrico, una de las opciones propuestas por el estándar NACE TM0102 (para mayor detalle revisar el procedimiento respectivo del Apéndice B).

El ensayo consiste en registrar lecturas de potenciales eléctricos sobre la tubería en puntos espaciados a partir de una fuente de energía que le suministra corriente. El sistema conecta el terminal negativo del rectificador a un interruptor de corriente 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.



**FIG. 3.2. PRUEBA DE CONDUCTANCIA ELÉCTRICA DEL
RECUBRIMIENTO**

La prueba se fundamenta en el principio de acción de un lecho anódico provisional para observar la respuesta de la tubería al suministrarle corriente. Con la corriente siendo interrumpida de manera intermitente, se toman lecturas de potenciales eléctricos con la fuente “on” (encendido) y “off” (apagado – no hay paso de corriente) en dos puntos a y b, teniendo cuidado de no ubicarse en zonas cercanas al lecho anódico temporal de tal manera que no pueda afectar a las mediciones. Luego se calcula la diferencia de potenciales en cada punto con la siguiente ecuación:

$$\Delta E_x = E_{x,on} - E_{x,off} \text{ [V ó mV]} \quad (15)$$

El punto de alimentación del sistema provisional a la tubería fue en la abscisa 1+420. Para lograr evaluar los resultados en un amplio espectro, se añaden los potenciales naturales de la estructura y así poder visualizar el cambio proporcionado por la corriente en la prueba. En la prueba se utilizó como ánodo una sección de tubería de acero de 30.5 centímetros de diámetro por 50 centímetros de longitud colocada a 35 metros perpendicular a la tubería. La fuente operó con 31 voltios y 4.5 amperios de salida a la tubería.

TABLA 11

LECTURAS DE POTENCIALES EN PRUEBA DE CONDUCTANCIA ELÉCTRICA DEL RECUBRIMIENTO

Abscisa	Área [m²]	Potenciales Naturales [mV]	Vx-ON [mV]	Vx-OFF [mV]	ΔV [mV]	Observaciones
0+920	3468	-511	-1416	-831	585	Medición en cámara de hormigón Cota elevada de terreno Terreno seco
1+110	4185	-558	-1508	-853	655	Medición en cámara de hormigón Terreno seco
1+295	4882	-527	-1544	-871	673	Medición en cámara de hormigón Terreno seco
1+402	5285	-535	-1612	-960	652	Medición en cámara de hormigón Terreno seco
1+600	5781	-558	-1584	-854	730	Terreno seco
2+720	8633	-554	-1537	-859	678	Terreno seco
3+160	9538	-552	-1550	-839	711	Terreno seco

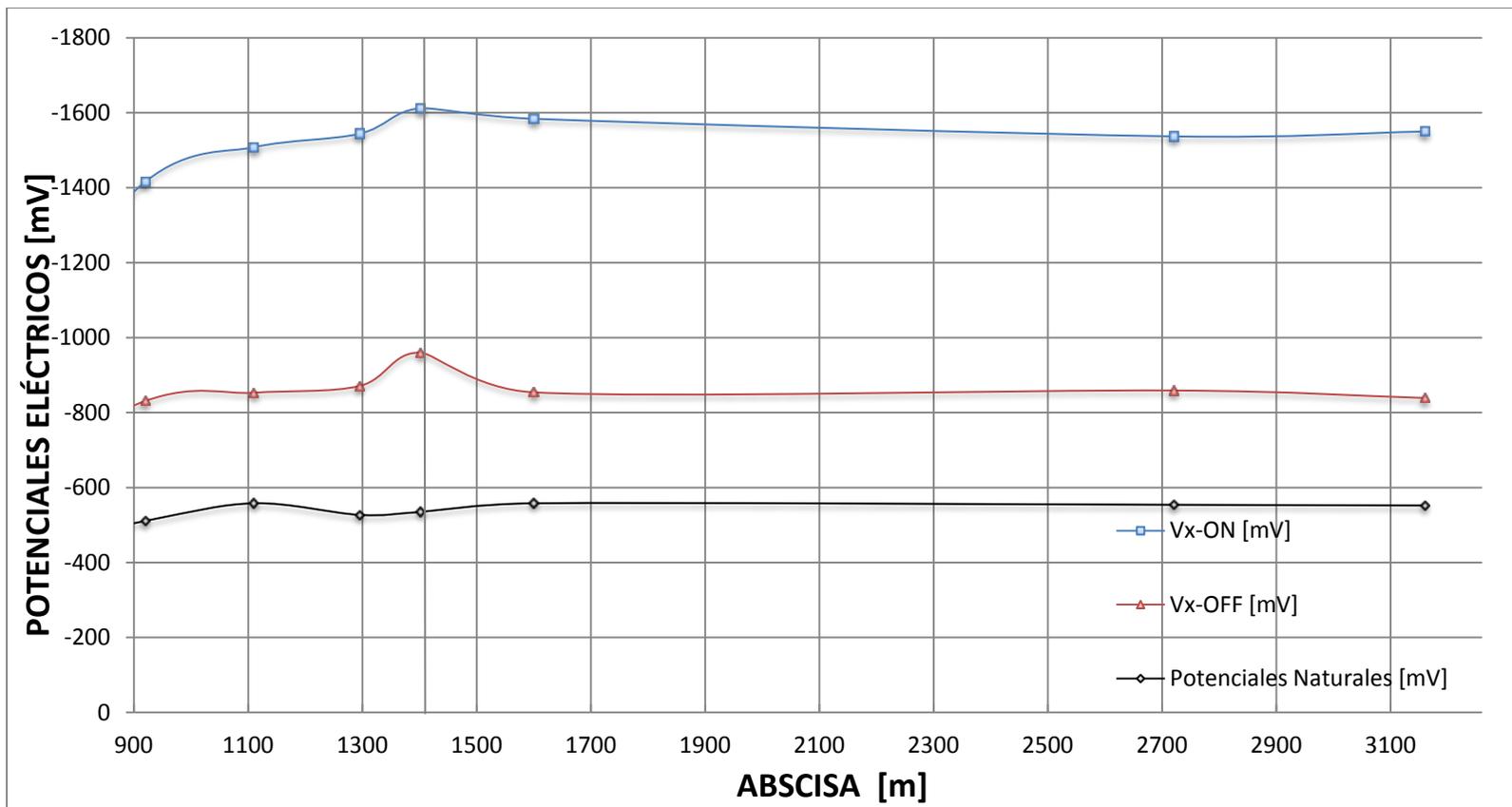


FIG. 3.3. DISTRIBUCIÓN DE POTENCIALES EN PRUEBA DE CONDUCTANCIA ELÉCTRICA DEL RECUBRIMIENTO

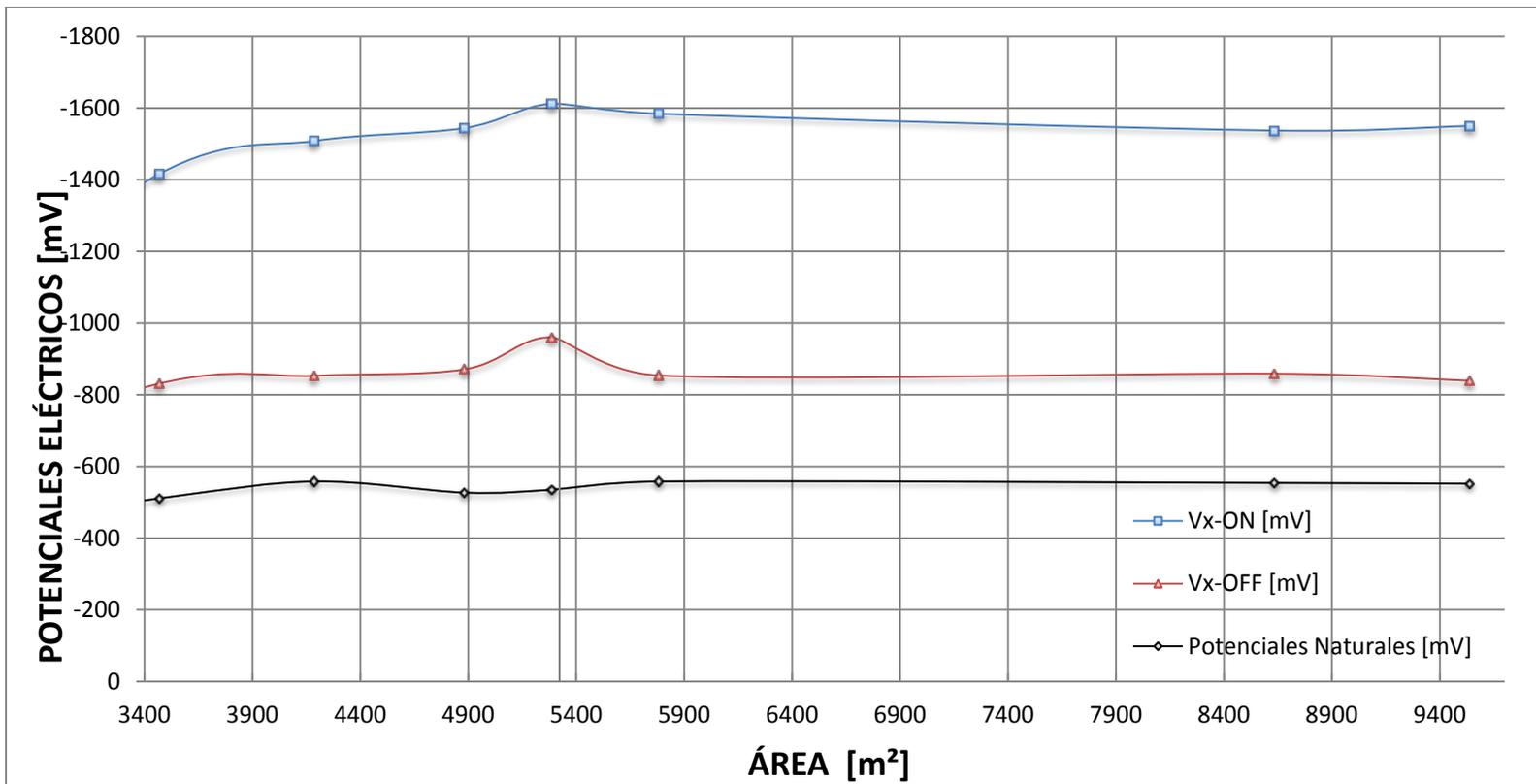


FIG. 3.4. DISTRIBUCIÓN DE POTENCIALES EN PRUEBA DE CONDUCTANCIA ELÉCTRICA DEL RECUBRIMIENTO EN FUNCIÓN DEL ÁREA SUPERFICIAL

En la *Figura 3.3* se grafica las lecturas obtenidas en función de las abscisas de la tubería, es decir en función de la distancia lineal entre los puntos de medición. En la *Figura 3.4*, sin embargo se muestra en el eje x el área superficial de la tubería; este gráfico revela el comportamiento de potenciales a través de diferentes secciones, pues el acueducto del problema posee tres diámetros, tal como lo muestra la *Tabla 1*. El análisis pertinente se describe en la siguiente sección.

Luego se toman dos puntos a y b en las mediciones y se calcula la constante de atenuación de la sección con la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{\Delta E_a}{\Delta E_b}\right)}{L} \quad (16)$$

Dónde

α : Constante de atenuación de sección L

L: Distancia entre los puntos a y b [km]

ΔE_x : Diferencia de potencial entre lecturas “on” y “off”
[mV]

Las lecturas a considerar para la ecuación 13 debido a la distancia y ausencia de accesorios son las pertenecientes a

las abscisas 3+160 y 2+720, las cuales muestran una disminución de potencial eléctrico de 711 mV y 678 mV respectivamente. Estos puntos se encuentran distanciados 440 metros entre ellos, por lo tanto:

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{711 \text{ mV}}{678 \text{ mV}}\right)}{0.440 \text{ km}}$$

$$\alpha = 0.108$$

La resistencia longitudinal de la tubería en el tramo "L" se la calcula de manera similar que la calculada en el capítulo anterior con la *ecuación 5* con la diferencia que para los cálculos de atenuación se toman tramos longitudinales que representen la unidad de inspección. Para los cálculos siguientes se considera como unidad de longitud al kilómetro.

$$r = \frac{\rho_{cu} \frac{L}{A}}{L_u} \quad (17)$$

Las abscisas mencionadas corresponden al tercer tramo del acueducto, que de acuerdo a la *Tabla 1* tiene 600 mm de diámetro y 6 mm de espesor. De esto, la resistencia longitudinal r será:

$$r = \frac{(0.20 \mu \Omega \cdot m) \left(\frac{440 \text{ m}}{0.00112 \text{ m}^2} \right)}{1}$$

$$r = 0.079 \Omega$$

Una vez obtenida la constante de atenuación y la resistencia longitudinal, se procede a calcular la conductancia del recubrimiento con la ecuación 1 mencionado en el marco teórico despejando g con una longitud unitaria de 1 km:

$$g = \frac{\alpha^2}{r}$$

Dónde

g: Conductancia por unidad de longitud [S]

r: Resistencia longitudinal de la tubería en la sección "L" entre los puntos a y b [Ω]

$$g = \frac{0.108^2}{0.079 \Omega}$$

$$g = 0.148 \text{ S}$$

Cabe recordar que esta conductancia eléctrica calculada representa al tramo a-b donde fue elaborada la prueba; sin embargo, para obtener una base comparativa en el análisis de resultados se calcula posteriormente la conductancia específica promedio del recubrimiento con la ecuación:

$$G = \frac{g}{A_s} \quad (18)$$

Dónde

G: Conductancia específica promedio de tubería recubierta [S/m²]

A_s: Área superficial de la tubería en el tramo a-b [m²]

$$G = \frac{0.148 \text{ S}}{829.4 \text{ m}^2}$$

$$G = 179 \text{ } \mu\text{S/m}^2$$

Existen tablas normalizadas que clasifican la calidad del recubrimiento en función de la conductancia específica promedio. Esta propiedad es función de la resistividad del electrolito y por ello se estandariza el valor calculado con condiciones de resistividad eléctrica promedio de 1000 Ω – cm con una regla de tres:

$$G_n = G_1 \times \frac{\rho_{avg,1}}{1000 \text{ } \Omega\text{-cm}} \quad (19)$$

Dónde

G_n: Conductancia específica normalizada en suelo de 1000 Ω – cm [μS/m²]

G_1 : Conductancia específica obtenida en la prueba
[$\mu\text{S}/\text{m}^2$]

$\rho_{\text{avg},1}$: Resistividad promedio del suelo en sección.

En la *Figura 3.1* Entre las abscisas 3+160 y 2+720 se puede apreciar una resistividad promedio a 4.5 metros de profundidad (ubicación de tubería) de $1363 \Omega - \text{cm}$, de esto:

$$G_n = 179 \mu\text{S}/\text{m}^2 \times \frac{1363 \Omega - \text{cm}}{1000 \Omega - \text{cm}}$$

$$G_n = 244 \mu\text{S}/\text{m}^2$$

3.1.2 Potenciales Eléctricos Naturales.

Como parte de las mediciones de campo en la tubería, se tomaron lecturas de potenciales eléctricos naturales de la estructura con la ayuda de un electrodo de referencia portátil, CSE (para mayor detalle revisar el procedimiento respectivo del Apéndice B).

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.

TABLA 12
LECTURAS DE POTENCIALES NATURALES

Abscisa	Ubicación	Lectura [mV]
0+000	Inicio de acueducto - Junta aislante	-236
0+020	Cámara de desagüe 01	-311
0+480	Cámara de aire 01	-368
0+920	Cámara de desagüe 02	-511
1+110	Cámara de aire 02	-558
1+295	Cámara de desagüe 03	-527
1+402	Cámara de corte	-535
1+600	ERP instalado	-558
2+720	T de cambio de sección	-554
3+160	Final del recorrido	-552

En la *Tabla 12* se muestran los potenciales eléctricos naturales obtenidos puntos de acceso al acueducto; esto es

en cámaras de válvulas de aire, desagüe, cruces, entre otros (ver *Plano 1* del Apéndice A).



FIG. 3.5. MEDICIÓN DE POTENCIALES ELÉCTRICOS

3.1.3 Potenciales Eléctricos entre Electrodo.

Otro punto de análisis en secciones posteriores es el de posibles corrientes parásitas o vagabundas que puedan afectar a la tubería. 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.

Las abscisas seleccionadas consisten en dos tramos, tal como se muestra en la *Tabla 13*. El primero fue considerado por ser la zona más cercana al poliducto, enterrado a pocos

metros de distancia paralelo al acueducto; mientras que el segundo tramo representa las abscisas cercanas a líneas de alta tensión que podrían afectar la estructura a proteger.

TABLA 13
LECTURAS DE POTENCIALES ENTRE CSE

TRAMO 1		TRAMO 2	
ABSCISA	LECTURA [mV]	ABSCISA	LECTURA [mV]
1+660	28.7	1+780	8.3
1+663	15.5	1+783	-2.0
1+666	29.5	1+786	0.2
1+669	52.8	1+789	5.0
1+672	-7.8	1+792	8.8
1+675	-5.5	1+795	-13.0
1+678	-8.0	1+798	17.9
1+681	-25.0	1+801	-3.5
1+684	-8.3	1+804	9.0
1+687	-7.5	1+807	-10.5
1+690	1.1	1+810	9.3
1+693	-12.6	1+813	1.1
1+696	-9.1	1+816	8.5
1+699	-16.5	1+819	-2.8
1+702	-9.5	1+822	8.9
1+705	-1.5	1+825	-4.5
1+708	-1.0	1+828	11.8

3.2 Evaluación del Recubrimiento Externo de la Tubería.

Las pruebas en una tubería enterrada no solo corroborar los requerimientos de corriente y muestra una distribución estimada

fiable de potenciales eléctricos, sino que también revelan información efectiva de propiedades del revestimiento que son de gran interés en la aplicación del sistema de protección. Tal es el caso de requerimientos adicionales de corriente de protección, problemas de interferencia o secciones con fallas en el recubrimiento, uniones de tuberías, accesorios, entre otros.

Los resultados obtenidos en las pruebas fueron en tiempo cortos de funcionamiento del sistema provisiona y en condiciones climáticas atípicas. El sector donde se ha instalado el acueducto es afectado por precipitaciones gran parte del año y las pruebas fueron realizadas en ausencia de lluvias, suelo seco. La humedad en el electrolito favorece la distribución de corriente entro otros factores positivos, por lo que las mediciones a analizar se obtuvieron del caso más crítico a considerar.

La necesidad de realizar este tipo de pruebas parte de que el mercado le da mayor importancia a características técnicas relacionadas con propiedades mecánicas y químicas en los recubrimientos de tuberías. Resulta complicado obtener datos tabulados de la resistencia eléctrica del recubrimiento precisamente por lo variable de dicha propiedad por parámetros tanto de

manipulación como de aplicación. En muchas ocasiones, es necesario asumir posturas en extremo conservadoras al diseñar un sistema de protección catódica por falta de información o dudas en la veracidad de la disponible.

La información de las lecturas obtenidas muestra únicamente el estado actual de la estructura, no predice su estado en función del tiempo. Es por esto que en los cálculos de diseño interviene con gran peso la experiencia del ingeniero en interpretar conjuntamente los resultados de las pruebas con práctica en casos similares.

Es preferible disponer de varios puntos de prueba convenientemente distanciados en las zonas donde se realice este ensayo. Los altos requerimientos de voltaje de la prueba son debidos al uso de trozos de chatarra a manera de ánodos. En caso de utilizar mayor cantidad de pines (que actúan como ánodos) y materiales conductores con una distribución similar a la de un lecho anódico se disminuirá la resistencia en pruebas futuras.

Las cámaras de válvulas pueden generar variación de potenciales eléctricos en las lecturas, esto se refleja en las curvas de atenuación de potenciales eléctricos en las *Figuras 3.3 y 3.4* donde

se puede apreciar una curva más pronunciada en las lecturas alejadas de la fuente del lado donde se encuentran las cámaras mencionadas. Es por esto que se realizan los cálculos de conductancia en las abscisas finales pues éstas no presentan cámaras de ningún tipo y las mediciones se realizan sobre la tubería sin encofrado.

En el capítulo anterior se estimó la corriente de protección de la tubería con una eficiencia del 97% del recubrimiento. En esta sección, con las pruebas ejecutadas en campo se dispone de datos reales de la conductancia eléctrica actual de la tubería. De los cálculos de la prueba de conductancia eléctrica del recubrimiento, la conductancia específica de $244 \mu\Omega / m^2$ revela “**buena**” calidad del recubrimiento comparado con la referencia de la *Tabla 14* tomada de Normas NACE.

TABLA 14
CONDUCTANCIA ESPECÍFICA DEL RECUBRIMIENTO PARA
SUELOS DE 1000 Ω – cm

Calidad del Recubrimiento	Rango de Conductancia Específica Normalizada (G_n)	
	($\mu S/m^2$)	($\mu S/ft^2$)
Excelente	< 100	< 10
Bueno	101 to 500	10 to 50
Regular	501 to 2,000	51 to 200
Pobre	> 2,000	> 200

La resistencia eléctrica del recubrimiento asumida en el capítulo anterior en los cálculos de resistencias del circuito de protección catódica se obtuvo definiendo preliminarmente al revestimiento con una mejor calidad. Esto es conservador pues a mejor estado del recubrimiento, menor es la exposición de la superficie externa del metal al electrolito y por lo tanto disminuyen los requerimientos de corriente. Los resultados de la prueba de conductancia se interpretan como menor resistencia del circuito eléctrico de protección catódica.

3.2.1 Análisis de Atenuación.

Se procede a realizar un estudio de la tendencia de la distribución tanto del potencial como de la corriente en la tubería. Para el efecto se utiliza las ecuaciones hiperbólicas de la *Tabla 15*, las cuales describen la atenuación que

sufren las variables mencionadas a lo largo de la tubería enterrada a partir de los parámetros de resistencia lineal de la tubería (r), conductancia del recubrimiento (g) y la constante de atenuación (α) previamente obtenidos. Estas expresiones representan las soluciones homogéneas de la ecuación diferencial de segundo orden (ecuación 3) referida en el fundamento teórico.

TABLA 15
FÓRMULAS DE ATENUACIÓN DE CORRIENTE

Ecuación General	Dónde
$R_G = \sqrt{\frac{r}{g}} \quad (20)$	R_G : Resistencia característica [Ω]
$R_{so} = R_G \coth(\alpha x) \quad (21)$	R_{so} : Resistencia de entrada en circuito abierto [Ω]
$I = I_s \cosh(\alpha x) - \frac{E_s}{R_G} \sinh(\alpha x) \quad (22)$	I_s : Corriente de salida de fuente de energía [A]
$E = E_s \cosh(\alpha x) - R_G I_s \sinh(\alpha x) \quad (23)$	E_s : Voltaje de salida de fuente de energía [V]

Para poder describir las curvas de atenuación de corrientes y potenciales eléctricos se procede a definir las variables empleadas en las ecuaciones hiperbólicas y que se

mantiene constantes a lo largo de la tubería, empezando por la Resistencia Característica.

Se obtiene la conductancia del acueducto y la constante de atenuación, G_T y α_T , en el electrolito a partir de los cálculos de resistencia longitudinal del capítulo anterior y conductancia específica en la prueba, asumida como conductancia promedio de toda la estructura, con las ecuaciones 19, 18 y 17.

$$G_T = 244 \mu\text{S}/\text{m}^2 \times \frac{1000 \Omega\text{-cm}}{1411 \Omega\text{-cm}}$$

$$G_T = 173 \mu\text{S}/\text{m}^2$$

$$g = (173 \mu\text{S}/\text{m}^2)(9613 \text{m}^2)$$

$$g = 1.66 \text{S}$$

$$\alpha_T = \frac{\sqrt{(1.66 \text{S})(0.037)}}{3.2}$$

$$\alpha_T = 0.077$$

Posteriormente se procede a calcular la resistencia característica del circuito con la ecuación 20 que relaciona las propiedades eléctricas de la tubería.

$$R_G = \sqrt{\frac{0.0037\Omega}{1.66 \text{ S}}}$$

$$R_G = 0.148 \Omega$$

Distribución de Potenciales Eléctricos

Los resultados en las curvas varían en función de la corriente otorgada por la fuente de poder del sistema. En la *Figura 3.6* presentada a continuación se describe la variación de potenciales eléctricos al imprimirle una corriente de 7.5 amperios.

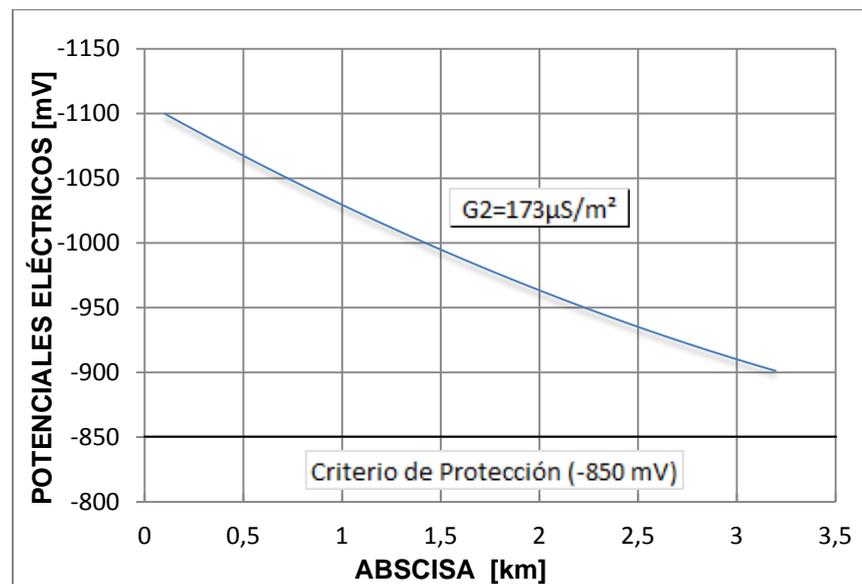


FIG. 3.6. DISTRIBUCIÓN ACTUAL DE POTENCIALES ELÉCTRICOS EN ACUEDUCTO

Como se evidencia en la curva, 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. La *Figura 3.4* muestra la influencia del área de protección en la dispersión de potenciales.

Si se comparan las curvas de la prueba de conductancia (*Figura 3.3*) con la obtenida de las ecuaciones hiperbólicas (*Figura 3.6*), se puede evidenciar una curva menos pronunciada con tendencia asintótica en las mediciones obtenidas en campo, lo que refleja pocas fallas del recubrimiento en la zona y por lo tanto una mejor distribución de corriente. Esto no debe ser interpretado como un error en la otra curva señalada, sino más bien comprenderse que en las ecuaciones de atenuación no se evalúan fallas puntuales. El análisis se realiza con la conductancia

específica, variable que representa el promedio de fallas existentes en toda la tubería.

Uno de los criterios de protección catódica de una estructura metálica indica que el voltaje de protección debe ser por lo menos de -850 mV con respecto a un CSE. En la *Figura 3.3* se observa claramente que en los 3200 metros de longitud de la tubería, el potencial más bajo obtenido es muy cercano a -900 mV con el punto próximo a la fuente en -1100 mV, por lo que la estructura puede ser protegida en toda su extensión por una fuente de energía que cumpla con los requerimientos descritos anteriormente.

Distribución de Corriente

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. La corriente de protección fue calculada en el Capítulo 2 de manera preliminar tomando en consideración múltiples factores adversos.

Con la prueba de conductancia del recubrimiento se tuvo un valor preliminar de corriente de protección que corrobora que la cantidad de corriente necesaria para proteger al acueducto 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.

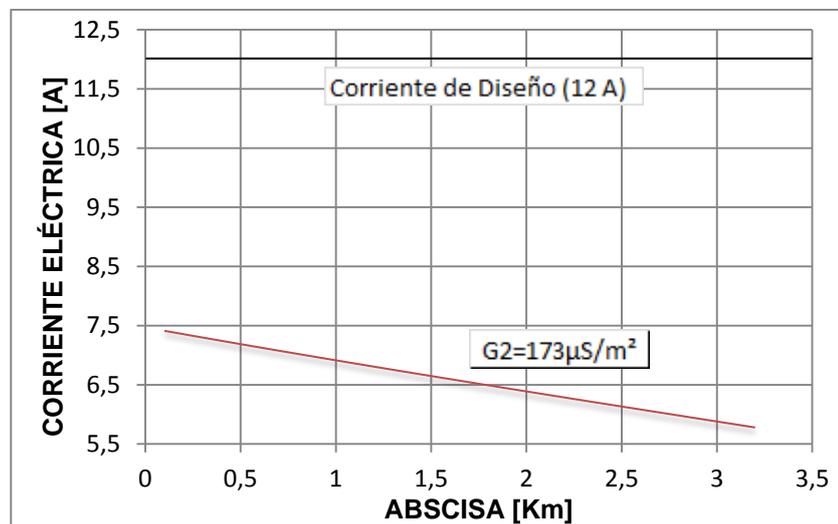


FIG. 3.7. DISTRIBUCIÓN ACTUAL DE CORRIENTE EN EL ACUEDUCTO

Con respecto a la corriente que circula en la tubería (*Figura 3.7*) 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 el análisis comparativo entre ambos.

Resultados teóricos versus prácticos.-

Se contrastan los resultados obtenidos con los cálculos teóricos del revestimiento calculando las variables involucradas siguiendo el procedimiento realizado en los cálculos anteriores partiendo de la constante de atenuación, α , con la conductancia eléctrica teórica del recubrimiento del capítulo anterior.

La resistencia eléctrica entre recubrimiento-electrolito es el recíproco de la conductancia eléctrica y fue calculada inicialmente. A continuación, en la *Tabla 16*, se detallan los resultados que se obtienen tanto de los procedimientos teóricos como de los prácticos basados en pruebas de campo.

TABLA 16
DATOS TEÓRICOS VS. PRÁCTICOS

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 que incluían asunciones del estado del recubrimiento. Es comprensible encontrar 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.

3.2.2 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.

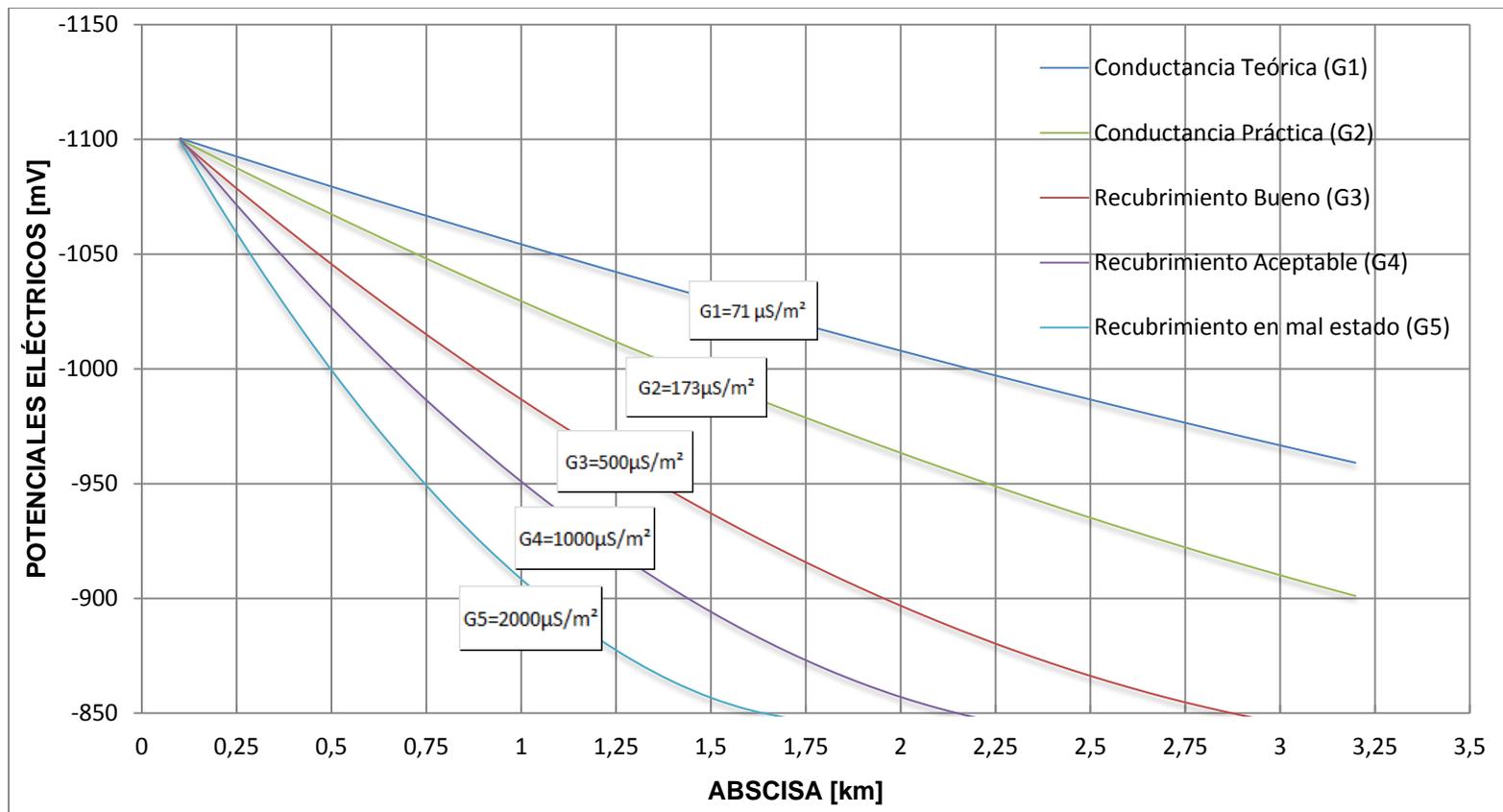


FIG. 3.8. DISTRIBUCIÓN DE POTENCIALES ELÉCTRICOS EN FUNCIÓN DE LA CALIDAD DEL RECUBRIMIENTO

Tal como lo expuesto en la teoría, a medida que disminuye la resistencia del recubrimiento al flujo de corriente se puede apreciar mayor variación de potenciales eléctricos en los puntos que se alejan de la fuente de energía del sistema. Se ha seleccionado el rango en el que los potenciales del acueducto deben situarse para que cumpla los criterios de protección, siendo esta zona la de mayor interés para la evaluación.

Para los cálculos teóricos y prácticos las dos primeras curvas describen una disminución prudencial y equilibrada que garantiza la protección de la totalidad de la estructura con una sola fuente de poder. Sin embargo, a partir del límite del recubrimiento bueno, con conductancia de $500 \mu\text{S}/\text{m}^2$, los potenciales se reducen por debajo del límite condicionado para el buen funcionamiento de un SPC.

La mayor utilidad de la evaluación del recubrimiento reside principalmente en los casos de atenuación excesiva, ya que en ese tipo de situaciones es necesario un análisis más profundo. 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.

Volviendo al problema del acueducto, con las curvas mencionadas se puede colocar el sistema catódico en cualquier punto kilométrico de la tubería pues ésta va a estar protegida siempre y cuando reciba la energía requerida. Si se diera el caso de recubrimientos de mala calidad, la gráfica de distribución de potenciales eléctricos sería de gran ayuda para simular las variaciones de potenciales ubicando el rectificador en diferentes puntos.

En el evento que las pruebas de campo hubieran proporcionado una conductancia eléctrica del recubrimiento mayor a $2000 \mu\text{S}/\text{m}^2$ y solo se pudiera colocar el SPC en un extremo, hubiera sido necesario utilizar dos (y probablemente hasta tres) SPC con rectificadores para lograr proteger la estructura.

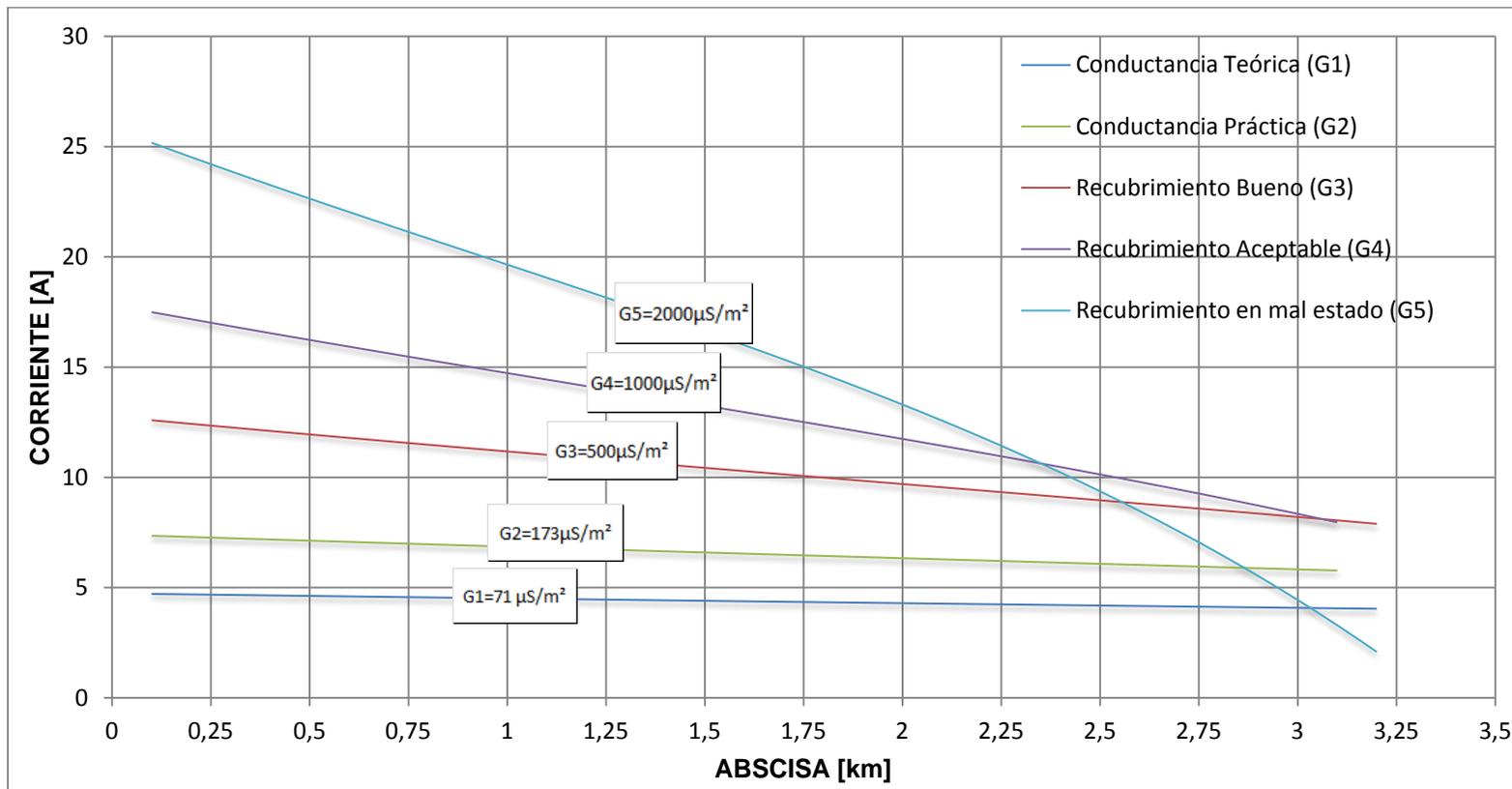


FIG. 3.9. DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTE EN FUNCIÓN DE LA CALIDAD DEL RECUBRIMIENTO

A menor resistencia eléctrica del recubrimiento, mayor será la corriente que drene por el mismo; esto es lo que se evidencia en la *Figura 3.9*, a medida que la conductancia eléctrica aumenta. Como fruto de la elevada conductancia también 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.

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 tomando como referencia la *Figura 3.10*. Se puede pensar que el área mencionada es exagerada, no obstante 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.

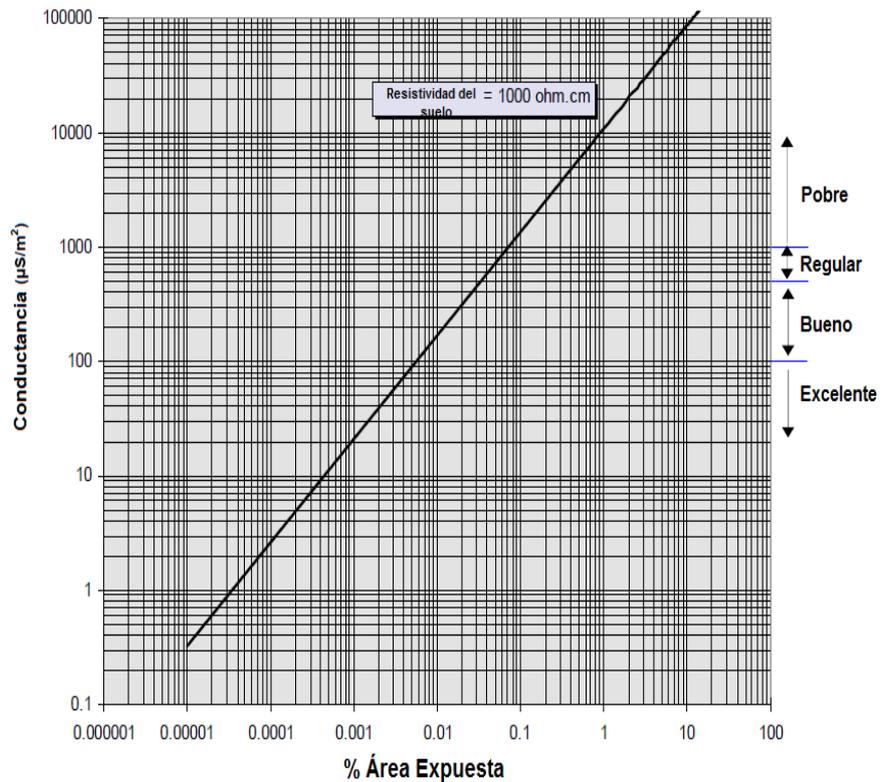


FIG. 3.10. CONDUCTANCIA DEL REVESTIMIENTO FBE EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE ÁREA EXPUESTA

Con la prueba de obtención de la conductancia del recubrimiento por el método de atenuación de potenciales eléctricos se genera confianza en el funcionamiento del sistema formulado para la etapa de puesta en marcha. Se consigue información de gran utilidad que influye en la toma de decisiones en casos donde las asunciones iniciales no concuerdan del todo con la realidad. El impacto es variable pero contundente, ya que puede ser necesaria una

reingeniería del diseño en aspectos como ubicación de lechos anódicos, número de subsistemas de protección utilizados, acciones correctivas y de control, entre otros. Del mismo modo se puede obtener indirectamente indicios de problemas mayores en el recubrimiento de la tubería en el caso que los potenciales medidos reflejara bajas excesivas.

La eficiencia del recubrimiento depende de tantos factores adicionales a los razonados en su selección 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.

3.3 Planteamiento de Escenarios de Instalación del Sistema Catódico.

Una vez conocida la distribución de corrientes y potenciales se puede presentar con fundamento técnico posibles escenarios para ubicar el lecho anódico y rectificador. Generalmente, la selección del lugar responde a parámetros de campo que pueden variar

dependiendo del sector donde se pretenda instalar. A continuación se enuncian los parámetros que ayudan en la definición de la ubicación del sistema catódico:

- Distribución de corrientes y potenciales eléctricos.
- Puntos kilométricos de cota baja de terreno.
- Baja resistividad eléctrica en la zona a seleccionar.
- Disponibilidad de fuente de energía cercana que tenga capacidad de cubrir los requerimientos del equipo transformador-rectificador.
- No generación de conflictos con instalaciones vecinas.

Para el acueducto se consideraron los siguientes escenarios de ubicación del lecho anódico:

- **Extremos de la tubería a proteger**

En las curvas de atenuación de corriente en la evaluación del revestimiento, gracias a una buena distribución 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.

En el extremo de inicio del acueducto el terreno se encuentra rodeado de propiedades privadas que restringen la ubicación de un lecho anódico a distancias pequeñas de la tubería. También se tiene una gran estructura enterrada, la tubería principal que alimenta al acueducto y no es parte de la superficie a proteger, por lo que situar un sistema de protección catódica por esta zona incurriría en problemas con otras estructuras.

Al finalizar el acueducto se ubicará un tanque de almacenamiento en una cota elevada de terreno. Actualmente se dispone de espacio físico disponible para la instalación del sistema de protección catódica, sin embargo a futuro se pretende construir una urbanización sobre los últimos 200 metros del acueducto y es preferible evitar colocar dispersores de corriente bajo zonas pobladas.

Por las razones mencionadas se descarta la opción de colocar el SPC en un extremo.

- **Ubicar el Lecho en Abscisa Intermedia.-**

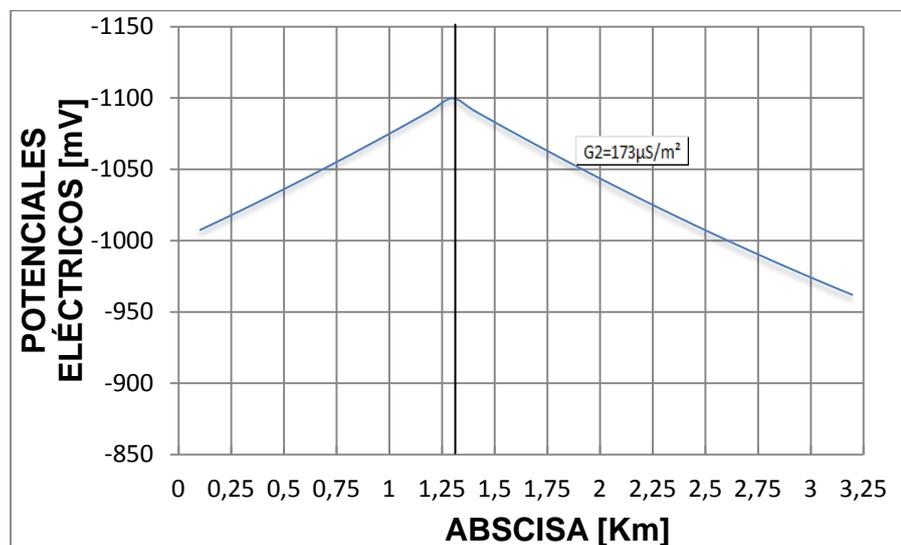
Recordando que la atenuación de corriente ocurre de la misma manera en cualquiera de las dos direcciones de la tubería desde el punto donde está instalada la fuente, se puede lograr una mejor distribución de potenciales de protección colocando el lecho anódico en un punto intermedio del recorrido.

En campo se recorrió por varios sectores para la ubicación del lecho anódico, tomando en consideración los parámetros descritos anteriormente. Algunas abscisas cuentan con los requerimientos necesarios para una correcta instalación y funcionamiento adecuado del sistema; sin embargo, para evitar la posibilidad de inducir corrientes parásitas en el poliducto se optó por seleccionar un punto remoto que no interfiera con la estructura mencionada.

En las mediciones de campo se expusieron las lecturas de las resistividades eléctricas del suelo, y a pesar de encontrar los valores más bajos de resistencia de corriente entre el pk 1+600 y el pk 2+400, este tramo se encuentra cercano a una línea de un gasoducto paralelo a la tubería en cuestión. La decisión del punto kilométrico 1+300 responde a la existencia de fuentes de

alimentación eléctrica cercana así como quebradas fluviales cercanas y la minimización de problemas de interferencia con la estructura mencionada.

En el caso de colocar los dispersores en la ubicación indicada, las curvas de atenuación de potenciales eléctricos serían las expuestas en la *Figura 3.11*. Se tiene una buena distribución de corriente y niveles protección adecuados. Adicionalmente se cuenta con mejor distribución de corriente en zonas de menor resistividad, donde es más propensa la corrosión acelerada.



**FIG. 3.11. DISTRIBUCIÓN DE POTENCIALES ELÉCTRICOS
CON ALIMENTACIÓN EN ABSCISA SELECCIONADA**

3.4 Influencia de Corrientes de Interferencia.

Mediciones de campo adicionales fueron destinadas a la verificación de la influencia de corrientes de interferencia en el acueducto bajo estudio; esto junto al reconocimiento del sitio para detectar la existencia de vías de tren, postes eléctricos de alta tensión, estructuras metálicas cargadas eléctricamente, entre otras situaciones que podrían causar interferencia eléctrica son los factores a considerar.

Estudio de interferencia en acueducto

A los efectos de descartar la posibilidad de existencia de tensiones inducidas electromagnéticamente por **corriente alterna** que pudiesen eventualmente generar riesgos por corrosión se toma en consideración las lecturas entre electrodos descritas al inicio del presente capítulo.

Como se pudo observar en el primer tramo, existe un cambio de polaridad entre las abscisas 1+669 y 1+672, precisamente en el sector donde el acueducto se encuentra más cerca al poliducto. La variación de potenciales eléctricos sin embargo, se mantiene por debajo de los 50 mV negativos entre electrodos, por lo que es un punto ligeramente afectado, no obstante cabe recalcar que la

acción del poliducto es originada por corriente directa, por lo que el caso puede requerir un trato diferente. Se decide colocar un poste de medición de potenciales eléctricos en el punto mencionado para poder monitorear y tomar acciones en caso de ser necesario.

En el “Tramo 2” no se halla mayor variación de potenciales eléctricos ni una tendencia polarizada en la zona cercana al cruce de la línea de alta tensión ubicada en la abscisa 1+800. Siendo éste el único factor presente en este problema en particular que podría llevar a una situación de interferencias por corriente alterna, se puede concluir que la instalación a proteger no se halla afectada.

En lo relacionado a potenciales fuentes de **interferencias por corrientes continuas** generadas por sistemas de protección catódica de estructuras cercanas, se midieron potenciales naturales del acueducto respecto de un electrodo portátil (CSE) cuyos valores se muestran en las pruebas de campo.

Los resultados manifestaron potenciales eléctricos estable y dentro de los rangos reglamentarios en estructuras nuevas en el acueducto. La línea del Poliducto La Libertad – Pascuales, que se

encuentra paralela en un pequeño tramo no genera picos voltaicos en la estructura a proteger. Se descarta además, la existencia de interferencia por corrientes telúricas por efectos geomagnéticos pues no se registran perturbaciones.

Se ratifica la inexistencia de fenómenos de interferencias nocivos por corriente continua ya sean generados por instalaciones externas de CA, CC o por interferencias por corrientes telúricas.

Influencia del lecho anódico en la tubería

En la instalación del sistema de protección catódica por corrientes impresas se deben colocar los dispersores a una distancia tal que el lecho anódico se encuentre en posición remota frente a la estructura a proteger, esto es que la dispersión de corrientes en el electrolito no le llegue a afectar directamente a zonas cercanas al transformador-rectificador.

La interferencia por el voltaje del ánodo puede ser despreciable cuando el voltaje en el punto afectado recibe el 15% del voltaje saliente del lecho anódico. Como base comparativa, en el caso La distancia a la cual la cama de ánodos de un sistema de protección catódica por corrientes impresas deja de generar un efecto

negativo en una estructura cercana varía con el electrolito y el espaciamiento de los dispersores enterrados.

Como referencia se puede presentar la disminución porcentual del potencial eléctrico en el electrolito con respecto a un ánodo instalado a 100 metros de distancia perpendicular al acueducto. Se plantea un caso crítico ya que un ánodo genera mayor resistencia y por lo tanto menor disipación de corriente, alejando la zona remota del dispersor. La *Figura 3.11* refleja la relación inversa entre potencial y distancia con la siguiente expresión:

$$E_r = \frac{0.005I\rho}{\pi L} \left(\ln \left(\frac{L + (L^2 + r^2)^{0.5}}{r} \right) \right) \quad (24)$$

Dónde

- E_r : Potencial eléctrico en el punto r [mV]
 r: Distancia radial con el ánodo como punto de origen [m]
 L: Distancia transversal de estructura a ánodo [m]
 I: Corriente drenada desde el dispersor [$\Omega - \text{cm}$]
 ρ : Resistividad del electrolito [$\Omega - \text{cm}$]

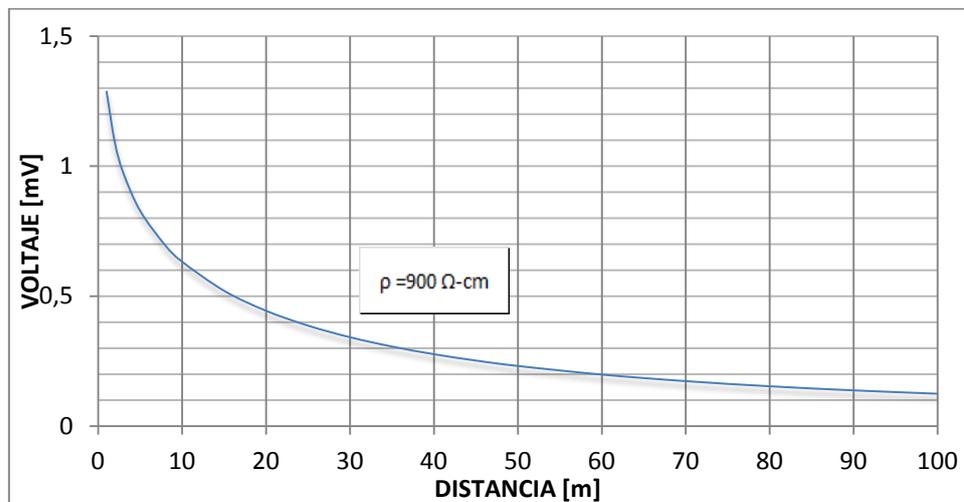


FIG. 3.12. DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJE A TIERRA REMOTA

Por experiencia se suele utilizar distancias superiores a 50 metros para evitar este tipo de problemas y de forma preliminar en el capítulo anterior se decide colocar el lecho a 100 metros de la tubería. En la gráfica se aprecia en los primeros metros ocurre la mayor cantidad de variación en el voltaje de salida de los dispersores y menos del 15% del voltaje inicial en distancias superiores a 60 metros, por lo que el lecho anódico se puede considerar remoto con respecto a la estructura a proteger y no influye negativamente a la misma.

3.5 Descripción Técnica del Diseño.

Con el objeto de describir el sistema de protección catódica de forma integral para el problema planteado, se detalla a

continuación los detalles restantes en la labor ingenieril del diseño, los cuales fueron definidos con mejor criterio en base a las mediciones de campo realizadas sobre la estructura y el electrolito.

El Sistema de Protección Catódica por Corrientes Impresas planteado responde a un esquema que garantice la no generación de interferencias y con una vida útil prevista de al menos 20 años. Aún cuando se deba sustituir los ánodos de corriente impresa, por haber alcanzado su vida útil, la recuperación de los sistemas permite colocar nuevos ánodos sin necesidad de recurrir a realizar una instalación similar.

El sistema requiere unas pocas conexiones desde el rectificador hacia la tubería, influyendo directamente en el costo por rubro de materiales, especialmente en el cable a usarse. El número de dispersores tienen por objeto cubrir el aspecto fundamental de disponer de corriente de reserva para afrontar las necesidades de la tubería en cuestión, y de ser posible, tener un excedente por deterioro con el tiempo de la superficie protegida.

Se plantea adicionalmente la instalación de postes de medición de potenciales eléctricos por concepto de monitoreo en la línea luego

de que el sistema se encuentre funcionando. Con lecturas periódicas se puede verificar el estado de protección y los efectos del deterioro del recubrimiento con el tiempo, pues será necesario ajustar los “taps” de la fuente de energía para cubrir los nuevos requerimientos

Posteriormente será necesario considerar factores como interferencia con nuevas estructuras enterradas o sobreprotección de zonas de la tubería protegida, por lo que se debe contar con la asistencia de personal con experiencia en protección catódica.

Los materiales necesarios en la instalación del sistema se describen en la siguiente tabla:

TABLA 17

ÍTEMS DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA

CANTIDAD	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
1	u	Transformador - Rectificador: cabina en acero galvanizado 120VAC - 240VAC,60Hz. Monofasico, enfriamiento por conveccion natural
1	u	Caja para base socket en la torre de corriente alterna
1	u	Socket para medidor de corriente eléctrica y reversible de
1	u	Pica para Puesta a Tierra de Protección Cargas Estáticas al
150	mts.	Tubería Conduit acero galvanizado para protección de cables desde caseta hacia lecho ánodos
12	mts.	Tubería EMT para cables de alimentacion al rectificador
1	u	Breaker de 70 amp de 3 polos sobrepuesto en la alimentacion
10	u	Electrodo de Referencia Permanente Cu/CuSO4 tipo CUY-007 ó
10	u	Ánodos Inertes Tipo Metal Mixed Oxide, Código (Ceranode) CRA-
10	u	Pernos ranurados tipo hendidos para unión cable 6AWG X 8AWG
10	u	Encapsulaciones Epóxicas para Unión Cables Eléctricos Anódicos
20	sacos	Carbón de Relleno Loresco SC-3 para difusion de corriente de los
10	u	Postes para Toma de Potenciales Eléctricos con caja de Conexión
200	m	Cable #6 AWG, TTU, CABLE núcleo simple hebrado, material Cobre, con doble aislamiento
150	m	Cable #8 AWG TTU, CABLE núcleo simple hebrado, material Cobre, con doble aislamiento
5	u	Cintas Autofundentes 3m para empalmes Eléctricos
10	u	Soldadura CADWELD; # parte: CA15 para uniones desde tubería a postes de Toma de Potenciales
1	u	Soldadura CADWELD; # parte: CA65 para unión desde Tubería con cable 6AWG hacia el Rectificador
11	u	Weld Cap Royston para sellado de soldadura Cadweld
2	u	Kit de Aislamiento Eléctrico en Juntas de los Extremos del Ducto
13.5	m3	Arena fina de Río
3	m3	Arcilla roja para señalización de cableado
200	m	Cinta de identificación del Sistema de Protección Catódica
25	m	Funda sellada de 1/2" de día. para proteger cable de ánodos antes de llegar al cable HEADER

Descripción de los Materiales Principales del SPC.

A continuación se describen los materiales definitivos escogidos en base a los resultados de las mediciones de campo y cálculos

realizados, con el lecho de dispersores, rectificador y postes con la ubicación seleccionada en base a la evaluación de los parámetros descritos.

RECTIFICADOR

El rectificador será ubicado en la abscisa 1+300 del acueducto. Tendrá una configuración denominada “montada en poste”. La instalación será realizada aproximadamente a 3 metros sobre nivel del suelo apoyado en una base conectada a 2 postes de hormigón en base al procedimiento respectivo con la intención de evitar manipulación indebida y seguridad del poblado cercano pues este tipo de equipos generalmente maneja cantidades de energía elevadas.

LECHO ANÓDICO

Para el lecho anódico se toma la configuración del capítulo 2. Se utilizará ánodo inertes de MMO, los cuales tienen una tasa de consumo muy baja (menor a 1 mg/A-año) Sus dimensiones serán de 1/2 pulgada de diámetro por 60 pulgadas de longitud, unidos a 10 pies de cable HMWPE No.8 AWG y con una capacidad de 0.800 A/pie² para 20 años de funcionamiento.

El lecho anódico constará de 10 dispersores verticales separados 5 metros cada uno en un lecho anódico ubicado a 100 metros de la tubería. Se utilizará carbón de relleno alrededor del ánodo, el cual formará una columna de 7 pies de alto por 6 pulgadas de diámetro. El cable principal "Header", que une el lecho anódico con la tubería pasando por el rectificador será cable No.6 AWG tipo TTU. Los detalles de instalación del lecho anódico se pueden observar en el Apéndice A.

POSTES DE MEDICIÓN DE POTENCIALES ELÉCTRICOS

Los postes de medición de potenciales eléctricos destinados al control de los niveles de protección serán colocados a lo largo de la tubería cada 400 metros, uno en la zona cercana al poliducto y otro en la ubicación del rectificador dando un total de 11 postes edificados en base al detalle del *Plano 3*.

Se tiene planificado construir una vía de concreto sobre el acueducto y debido a la necesidad de tener un contacto entre electrolito-electrodo de referencia para realizar las mediciones, se colocarán electrodos de referencia permanentes en cada punto de toma de potenciales para evitar romper pavimento cada vez que se realicen las lecturas de control.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Se concluye lo siguiente:

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.

Se recomienda lo siguiente:

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 con procesamiento de datos. En caso de existir disminución en potenciales de protección, se debe planificar acciones predictivas.

APÉNDICE A

PLANOS ESQUEMÁTICOS

APÉNDICE B

PROCEDIMIENTOS DE MEDICIONES DE CAMPO

RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO

1) OBJETIVO

- Medir la resistencia del suelo mediante el Método Wenner de cuatro electrodos.
- Obtener una resistividad promedio del suelo para un posterior análisis de resultados.

2) MATERIALES Y EQUIPOS

- Medidor de Resistencia.
- Cuatro picas.
- Cuatro cables de conexión.
- Martillo con cabeza de caucho.
- Cinta métrica.
- Cámara fotográfica.
- Poma con agua.

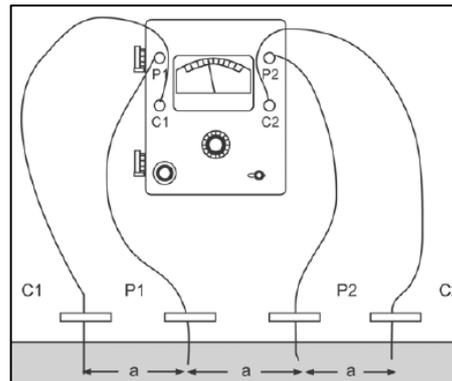
3) ASPECTOS GENERALES

- Seleccionar el área donde se realizarán las pruebas.

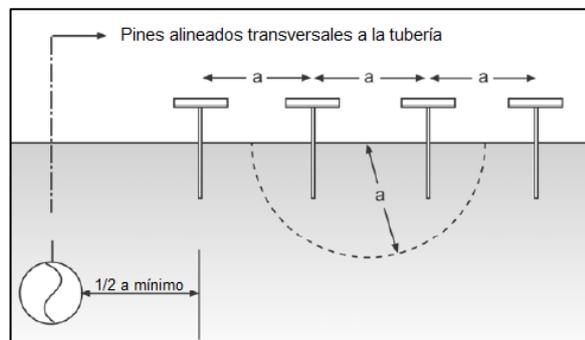
4) PROCEDIMIENTO

- Tomar un punto de referencia en la zona destinada a realizar la prueba y enterrar las picas en línea perpendicular a la tubería equidistantes a 1.50 m, 3.00 m y 4.50 m.

- Conectar con el cableado provisto los dos electrodos externos (denominados C1 y C2) a las terminales de la fuente de corriente y los dos internos (P1 y P2) a los terminales de medición de potencial del equipo.



EQUIPO TÍPICO DE MEDICIÓN DE RESISTENCIA ELÉCTRICA



ALINEAMIENTO DE PINES EN EL SUELO.

- Se humecta el suelo en los puntos donde fueron colocadas las picas para evitar lecturas en terreno seco.
- Graduar las escalas del equipo hasta encontrar una adecuada al nivel de resistencia de la lectura.

- Mantener oprimido el switch hacia arriba (TEST ADJ). Se deberá evidenciar movimiento de la pluma lo cual indicará que las terminales están bien conectadas, en caso contrario se deberá revisar las conexiones.
- Para tomar las lecturas se deberá mantener el switch oprimido hacia abajo (READ) y a la vez girar la perilla encargada de ajustar la resistencia hasta que el apuntador se equilibre en el cero del dial.
- Se registra el número de la perilla y la escala respectiva de la medición para posteriormente calcular la resistividad mediante la ecuación:

$$\rho = 2\pi a l E$$

Dónde:

a: Distancia entre electrodos

l: Lectura de medición

E: Escala de medición

- Los resultados obtenidos se registrarán en la ficha correspondiente.

OBTENCIÓN DEL pH DEL SUELO

1) OBJETIVO

- Medir el potencial de hidrógeno del suelo para obtener parámetros del estado de agresividad del electrolito.

2) MATERIALES Y EQUIPOS

- Electro de Referencia de Cu/CuSO₄ (CSE).
- Electrodo de Antimonio.
- Multímetro de Alta Impedancia.
- Cables de conexión.
- Cámara fotográfica.
- Poma con agua.

3) ASPECTOS GENERALES

- Seleccionar el área donde se realizarán las pruebas.

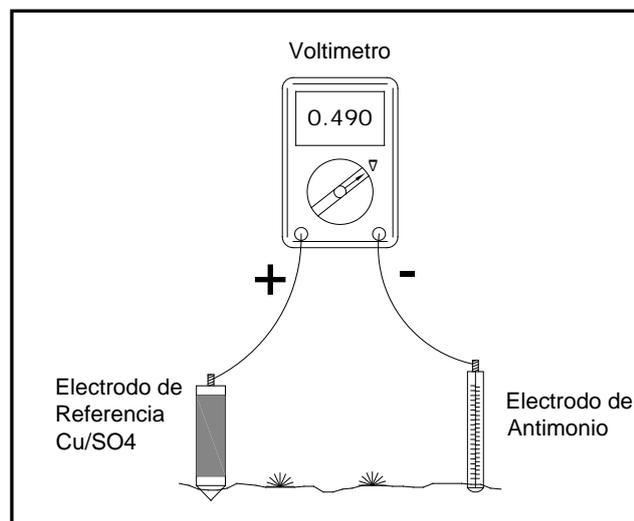
4) PROCEDIMIENTO

- Colocar los cables de conexión de la siguiente manera: el positivo del Multímetro al electrodo de CSE y el negativo al de antimonio.
- Colocar los electrodos de referencia CSE y Antimonio en el suelo natural cercano a la tubería. Para evitar lecturas en terreno seco se procede a condicionar el terreno para cada electrodo en un área de

15 cm x 15 cm, removiendo rocas a una profundidad de 5 cm.

Posteriormente se procederá a mojar dicha superficie preparada.

- Encender el equipo en la opción de medición de voltaje en corriente continua (mV) y tomar la lectura del potencial eléctrico.
- Con el indicador impreso en el electrodo de antimonio y la lectura del multímetro, obtener el nivel de pH del electrolito en el punto medido.
- Registro los valores en la ficha respectiva.



ESQUEMA DE EQUIPOS DE MEDICIÓN DE pH

POTENCIALES ELÉCTRICO EN TUBERÍA

1) OBJETIVO

- Describir el procedimiento de lectura y registro de potenciales eléctricos en tuberías medidos con CSE.

2) ASPECTOS GENERALES

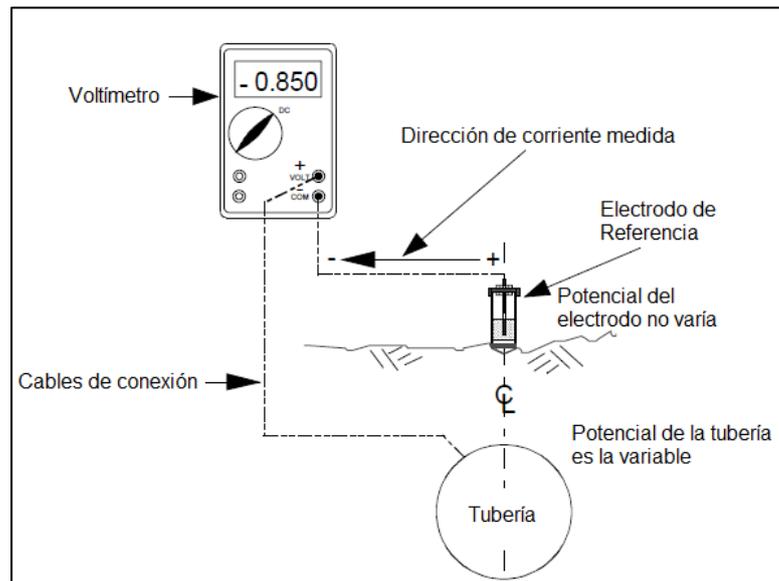
- Esta prueba se realiza cuando la tubería haya sido enterrada el tiempo necesario para que la estructura se encuentre en equilibrio termodinámico con el electrolito.
- Se realizará previo a los trabajos de instalación del SPC y a efectuar conexiones eléctricas de la tubería con otras estructuras metálicas.

3) MATERIALES Y EQUIPOS

- Multímetro de Alta Impedancia.
- Cables de conexión.
- Un CSE.
- Pala pequeña.
- Flexómetro.
- Lija.
- Estilete.
- Cámara Digital.
- Wype o paños de limpieza.
- Poma de agua.

4) PROCEDIMIENTO

- Desprender la pintura de la superficie de la tubería mediante lijado en un área aproximada de 1 cm^2 de tal forma que exista conductividad eléctrica entre la tubería y el instrumento de medición (multímetro).
- Colocar el CSE en el suelo natural cercano a la tubería (de ser posible sobre la estructura). Para evitar lecturas en terreno seco se procede a condicionar el terreno en un área de $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$, removiendo rocas a una profundidad de 5 cm . Posteriormente se humecta el terreno en dicha superficie preparada.
- Conectar los cables de conexión de la siguiente manera: el polo negativo del multímetro al electrodo de referencia y el polo positivo a la tubería en el área descubierta.
- Encender el multímetro en milivoltios (mV) para obtener lecturas de voltaje.
- Los valores registrados estarán enmarcados dentro de un rango de -700 a -400 mV para potenciales naturales y mayores a -850 para potenciales de protección (en base a los criterios de protección), según las características del terreno. Sin embargo si esta cantidad tuviera fluctuaciones se informará la existencia de posibles corrientes parásitas en la estructura.



**ESQUEMA DE MEDICIÓN DE POTENCIALES ELÉCTRICOS SOBRE
TUBERÍA**

POTENCIALES ELÉCTRICO ENTRE ELECTRODOS

DE REFERENCIA

1) OBJETIVO

- Describir el procedimiento de lectura y registro de potenciales eléctricos entre electrodos de referencia medidos sobre la tubería instalada en zonas con posibles interferencias por CA.

2) ASPECTOS GENERALES

- Esta prueba se realiza cuando la tubería haya sido enterrada el tiempo necesario para que la estructura entre en equilibrio termodinámico con el electrolito.
- Se deben localizar las áreas que puedan estar sujetas a interferencias eléctricas por CA como líneas de alta tensión.
- Se realizará cuando la tubería no se encuentre catódicamente protegida y previo a efectuar cualquier conexión eléctrica de la tubería con otras tuberías y/o estructuras metálicas.

3) MATERIALES Y EQUIPOS

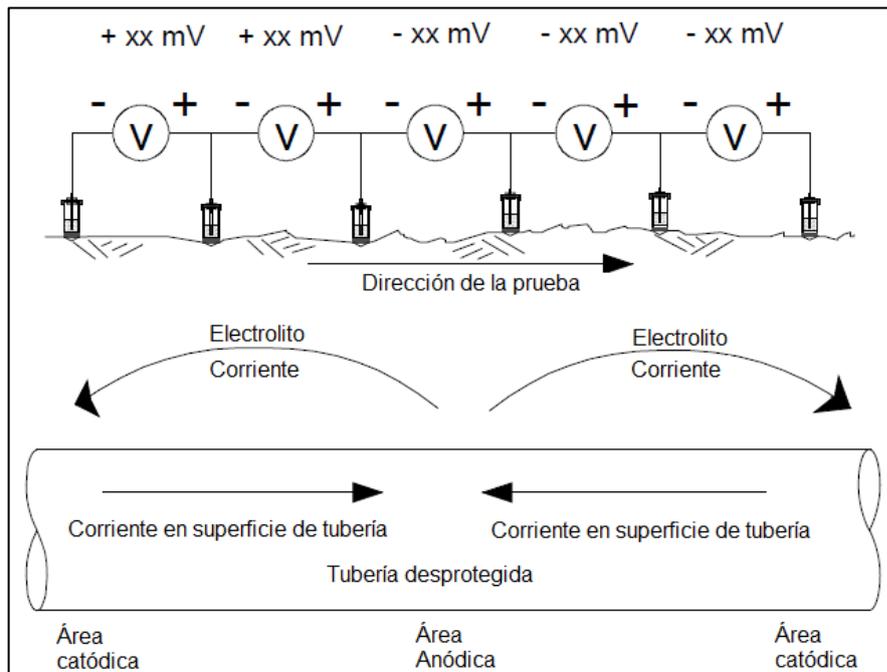
- Multímetro de Alta Impedancia.
- Cables de conexión con terminales adecuadas.

- Dos electrodos de Referencia de Cu/CuSO_4 (CSE).
- Pala pequeña.
- Flexómetro.
- Wype o paños de limpieza.
- Cámara fotográfica.
- Agua

4) PROCEDIMIENTO

- Sobre el eje central de la tubería, separados 3 metros entre sí, colocar los dos CSE en el suelo natural. Para evitar lecturas en terreno seco se procede a condicionar el terreno en un área de 15 cm x 15 cm, removiendo rocas a una profundidad de 5 cm. Posteriormente se humecta el terreno en dicha superficie preparada.
- Conectar los cables de conexión de la siguiente manera: el polo positivo del multímetro al electrodo de referencia (CSE) frontal y el polo negativo al electrodo posterior.
- Encender el multímetro para obtener lecturas de voltaje en milivoltios (mV) en corriente continua.
- Los valores registrados estarán enmarcados dentro de un rango corto (por lo general menor a 50 mV); sin embargo si los voltajes obtenidos variasen su polaridad, se podría confirmar la existencia de zonas anódicas (de descarga de corriente) en la tubería.
- En caso de encontrar cambios en polaridad, para confirmar la dirección de la corriente, se realizan mediciones en dirección

transversal a la tubería (ambos lados) en el sector donde se encuentran estas anomalías.



REPRESENTACIÓN DE MEDICIÓN DE POTENCIALES ELÉCTRICOS ENTRE TUBERÍAS

MEDICIÓN DE CONDUCTANCIA ELÉCTRICA EN

TUBERÍAS ENTERRADAS

1) OBJETIVO

- Describir el procedimiento de obtención de la conductividad eléctrica de una tubería mediante la imprimación de corrientes con una fuente de energía provisional.

2) ASPECTOS GENERALES

- Se debe contar con información de la resistividad eléctrica del terreno del sector destinado a la prueba.
- Esta prueba se realiza cuando la tubería haya sido enterrada el tiempo necesario para que la estructura entre en equilibrio termodinámico con el electrolito.
- Se efectúa previo a los trabajos de instalación del Sistema de Protección Catódica y previo a efectuar cualquier conexión eléctrica de la tubería con otras tuberías y/o estructuras metálicas.
- El sistema se conecta en una zona de baja resistividad eléctrica con una fuente cercana de alimentación de energía.

3) MATERIALES Y EQUIPOS

- Fuente de Voltaje con capacidad suficiente para realizar la prueba y variar la alimentación de energía.

- Interruptor de corriente controlado por satélite.
- Ánodo provisional (jabalina(s), chatarra de acero, etc.) que cumpla con la función de dispersor de corriente.
- Multímetro de Alta Impedancia (mayor a 10 Mega-Ohmios).
- Cable No.8 AWG o de mayor diámetro con la extensión suficiente para realizar la prueba (en función de ubicación de ánodo, fuente y tubería).
- Extensiones eléctricas.
- Martillo con cabeza de caucho.
- Un electrodo de Referencia (CSE).
- Pala pequeña.
- Cinta métrica.
- Lija.
- Destornillador.
- Estilete.
- Wype o paños de limpieza.
- Cámara fotográfica.
- Agua.

4) PROCEDIMIENTO

- Proceder a proporcionar la alimentación de energía de la fuente más cercana a la zona previamente seleccionada para efectuar la prueba con la ayuda de las extensiones eléctricas.

- Enterrar el ánodo provisional a una distancia de aproximadamente 30 metros en dirección perpendicular a la tubería.
- Realizar las conexiones de alimentación eléctrica de la fuente de voltaje provisional y verificar su correcto funcionamiento.
- Unir eléctricamente con el cable No.8 AWG los terminales de la fuente de la siguiente manera: el positivo al ánodo y el negativo a la tubería. De ser posible se realiza soldadura exotérmica en las uniones en tubería y ánodo para garantizar continuidad eléctrica.
- Colocar el CSE, en el suelo natural en un punto próximo al ingreso de corriente a la tubería para lograr identificar el potencial eléctrico cerca de la fuente al iniciar el funcionamiento del sistema provisional.
- Revisar los cables de conexión del circuito, conectar y encender la fuente provisional con voltaje inicial en cero.
- Girar la perilla reguladora del voltaje y monitorear la lectura del multímetro (de acuerdo al Procedimiento de Medición de Potenciales Eléctricos en Tuberías) en el punto cercano, de tal manera que la corriente de salida no eleve por encima de -1100 mV el potencial de la tubería.
- Registrar los valores fijados del voltaje y la corriente de salida del rectificador.
- Accionar el interruptor, esperar que localice un satélite y configurarlo con las especificaciones deseadas.

- Fijar el interruptor en ciclos cortos repartidos en 75% del tiempo ON y el 25% restante OFF (por ejemplo 3 segundos “on” y 1 segundos “off”) para evitar despolarizar la estructura.
- Luego de un tiempo prudencial para que la tubería se logre polarizar apagar la fuente provisionalmente para intercalar el interruptor en serie.
- Conectar a una de las pinzas del interruptor el negativo de la fuente y la pinza restante al cable de conexión a la tubería. La conexión en la tubería debe ser tal que garantice el flujo de corriente.
- Con la corriente siendo interrumpida de manera intermitente, se toman lecturas de potenciales eléctricos con la fuente “on” y “off” en dos puntos a y b donde se pueda apreciar variaciones considerables en las lecturas.
- Registrar las abscisas donde son realizadas las lecturas.
- Luego calcular la diferencia de potenciales en cada punto de la siguiente manera:

$$\Delta E_a = E_{a,on} - E_{a,off} [V]$$

$$\Delta E_b = E_{b,on} - E_{b,off} [V]$$

- Acto seguido se calcula la constante de atenuación de corriente con la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{\Delta E_a}{\Delta E_b}\right)}{L}$$

Dónde

α : Constante de atenuación

L: Distancia entre los puntos a y b [m]

ΔE_x : Diferencia de potencial entre lecturas ON y OFF. [mV]

- Una vez obtenida la constante de atenuación, se procede a calcular la conductancia del recubrimiento de la siguiente manera:

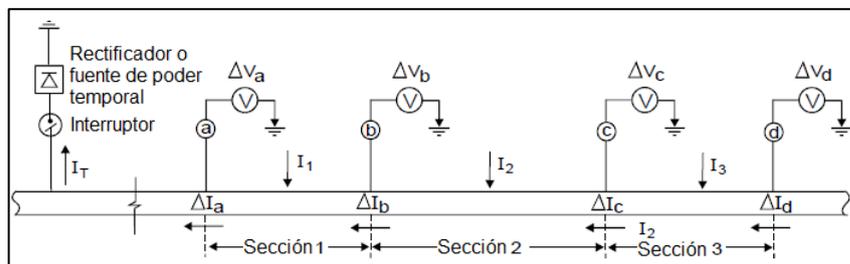
$$g = \frac{\alpha^2}{r}$$

- Posteriormente se calcula la conductancia específica promedio del recubrimiento con la ecuación:

$$G = \frac{g}{A}$$

- La conductancia eléctrica es proporcional a la resistividad del electrolito circundante. Es por esto que para evaluar las condiciones del revestimiento se normaliza la conductancia calculada a una resistividad de 1000 ohmios-centímetros con una regla de tres:

$$G_n = G_1 \times \frac{\rho_{avg,1}}{1000 \Omega - cm}$$



ESQUEMA DE PRUEBA DE CONDUCTANCIA ELÉCTRICA EN RECUBRIMIENTO

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ANSI/AWWA C210-97 – Liquid-Epoxy Coating Systems for the Interior and Exterior of Steel Water Pipelines.
- [2] ASTM G57-07 – Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method.
- [3] Basic Corrosion Course, NACE International, 2005.
- [4] Handbook of Cathodic Corrosion Protection – Theory and Practice of Electromechanical Protection Processes, Third Edition. W. von Baeckmann, W. Schwenk, and W. Prinz, 1997.
- [5] IPS (IRANIAN PETROLEUM STANDARD) – Inspection Standard for Monitoring Cathodic Protection Systems – Original Edition, 2006.
- [6] NACE International Training & Certification – Cathodic Protection Tester Course Manual – CP Level 1, 2005.

- [7] NACE International Training & Certification – Cathodic Protection Technician Course Manual – CP Level 2, 2007.
- [8] NACE International Training & Certification – Cathodic Protection Designer Course Manual – CP Level 3, 2005.
- [9] NACE Paper No. 00673 – A Novel Approach to Cathodic Protection Design for Marine Pipelines: Part I - An Inclusive Attenuation Equation. Pierson, Keith P. Bethune, William H. Hartt, and Palaniswami Anathakrishnan Center for Marine Materials - Department of Ocean Engineering, 2000.
- [10] NACE Standard Practice 0169-2007 – Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems.
- [11] NACE Standard Practice 0190-2007 – External Protective Coatings for Joints, Fittings, and Valves on Metallic Underground or Submerged Pipelines and Piping Systems, Seventh Edition.

- [12] NACE Standard Practice 0207-2007 – Performing Close-Interval Potential Surveys and DC Surface Potential Gradient Surveys on Buried or Submerged Metallic Pipelines.
- [13] NACE Standard Practice 0394-2002 – Application, Performance, and Quality Control of Plant-Applied, Fusion-Bonded Epoxy External Pipe Coating.
- [14] NACE Standard Test Method 0102-2007 – Measurement of Protective Coating Electrical Conductance on Underground Pipelines.
- [15] NACE Standard Test Method 0497-2007 – Measurement Techniques Related to Criteria for Cathodic Protection on Underground or Submerged Metallic Systems.
- [16] “Peabody’s Control of Pipeline Corrosion”, Second Edition. A.W. Peabody, Editedopor R.L. Bianchetti, 2001.
- [17] “Pipe Line Corrosion and Cathodic Protection”, Third Edition. Marshall E. Parker, Edward G. Peattie, 1999.