

# ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción

“Ensayos de Polarización On-Off Empleando Interruptores de Corriente  
con Asistencia Satelital en Rectificadores de Protección Catódica  
Aplicados en Líneas Enterradas”

## TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentada por:

Paúl Eugenio Cabadiana Cevallos

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2004



## **AGRADECIMIENTO**



A mis Padres, a quienes les debo todo; a mis hermanos, que siempre me brindaron su apoyo; a mi esposa, pilar fundamental de mi vida.

Un agradecimiento especial a los ingenieros Julián Peña por su oportuna guía y a Alex Herrera por su voto de confianza.

## DEDICATORIA



A mi hijo Paúl  
Andrés, en quien  
deposito mi fe y  
esperanza.

# TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



---

Ing. Mario Patiño A.  
PRESIDENTE

---

Ing. Julián Peña E.  
DIRECTOR DE TESIS



CIB-ESPOL

---

Ing. Eduardo Orcés P.  
VOCAL

---

Ing. Ernesto Martínez L.  
VOCAL



## DECLARACIÓN EXPRESA

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

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and flourishes, is positioned above a horizontal line.

Paúl Cabadiana C.



## RESUMEN

El presente estudio enfoca el uso de una técnica moderna en el control de potenciales eléctricos de protección catódica utilizada para prevenir la corrosión en estructuras enterradas, tomando como base estándares internacionales que regulan este tipo de trabajos. El objetivo de este trabajo es dar a conocer técnicas modernas que ya se están empleando en el ámbito internacional por especialistas que están a la vanguardia del monitoreo de sistemas de protección catódica en estructuras enterradas; para lo cual, se desarrollará en este trabajo el método de ensayo de potenciales ON-OFF, que es una de las técnicas recomendadas para determinar cuando tuberías metálicas subterráneas requieren control de la corrosión externa.

El Capítulo 1 explica correctas prácticas de ingeniería indicadas en estos estándares. Una aplicación práctica en una tubería de 24 plg. de diámetro y 136 Km. de largo que transporta crudos pesados, ubicada en el oriente ecuatoriano, servirá para ejemplarizar los criterios empleados en la realización de un correcto mantenimiento y control de la corrosión en este tipo de estructuras.

El desconocimiento de la existencia y aplicación de equipos especializados en el control de la corrosión es uno de los principales problemas para la

realización de un correcto mantenimiento tanto de la protección catódica como del recubrimiento de la estructura enterrada, ya que al no contar con los equipos y procedimientos adecuados los resultados obtenidos son de baja confiabilidad por lo que se puede incurrir en errores y estos causar excesivos gastos por paradas no programadas o por el uso de recursos de manera inútil. El Capítulo 2 ofrece una completa guía de técnicas especializadas, utilizadas en la inspección de recubrimientos y potenciales de protección catódica.



El Capítulo 3 explica el proceso de selección y el alcance del método de inspección usado, además se muestran los listados de los datos tomados en campo. Se aplicó el método de ensayo de potenciales ON-OFF con asistencia satelital, con base a los procedimientos recomendados en la Norma NACE TM0497 (Métodos de Prueba) - Secciones 9 y 10, para el análisis de la capacidad de polarización de la protección catódica. Para el efecto, se emplearon dos interruptores de corriente sincronizados con GPS incorporado para recepción de la señal satelital, ubicado cada uno en un transformador rectificador, electrodos de referencia de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ , multímetros, entre otros equipos.

El trabajo en sitio, consistió en monitorear los potenciales de protección a lo largo del derecho de vía de una tubería enterrada cuya longitud es de 136

Km., la cual fue instalada en el año 2002. Se realizó mediciones en 68 estaciones de prueba ubicadas cada 2 Km. entre sí, lo que incluyó lecturas de potenciales eléctricos en sitios de cruces con otras líneas, tendientes al análisis de posibles corrientes parásitas o de interferencia, que puedan incidir sobre la línea en estudio.

En el Capítulo 4 los datos obtenidos serán procesados y sometidos a los criterios propuestos por la Norma NACE RP0169 (Control de Corrosión Externa en Sistemas de Tuberías Enterradas o Sumergidas) - Secciones 6 y 9, consecuentemente se crearán gráficas de potenciales de protección para someterlos a los criterios recomendados y así determinar posibles problemas con la protección catódica en los diversos tramos del recorrido, y relacionar posibles fallas en el revestimiento aplicado.

El Capítulo 5 presenta las conclusiones obtenidas a lo largo del desarrollo del estudio así como las recomendaciones dirigidas a que el sistema de protección contra la corrosión se mantenga en las mejores condiciones operativas.





# INDICE GENERAL



	Pág.
RESUMEN.....	II
INDICE GENERAL.....	V
ABREVIATURAS.....	VIII
SIMBOLOGÍA .....	IX
INDICE DE FIGURAS.....	X
INDICE DE TABLAS.....	XI
INDICE DE PLANOS.....	XII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. CONTROL DE CORROSIÓN EXTERNA EN TUBERÍAS ENTERRADAS.....	3
1.1 <i>Determinación de la Necesidad de Control</i> .....	3
1.2 Consideraciones en el Diseño de Tuberías Enterradas.....	4
1.3 Revestimientos Externos.....	7
1.4 Criterios Establecidos para Potenciales de Protección Catódica.	11
1.5 Control de Corrientes de Interferencia.....	16
1.6 Operación y Mantenimiento en Sistemas Catódicos.....	22

## CAPÍTULO 2

2. TÉCNICAS MODERNAS PARA EL MONITOREO DE LA CORROSIÓN EXTERNA .....	26
2.1 <i>Ensayo de Potenciales ON - OFF con asistencia satelital</i> .....	26
2.2 Inspección de Potenciales a Intervalos Cortos.....	43
2.3 Corriente Directa y Gradiente de Voltaje.....	55
2.4 Mapeo de Corriente en Tubería.....	65
2.5 Uso del Sistema de Posicionamiento Global.....	72

## CAPÍTULO 3

3. ENSAYO DE POTENCIALES ON - OFF EN LÍNEA DE CRUDOS PESADOS.....	79
3.1 Consideraciones Preliminares.....	79
3.2 Medición de Potenciales Eléctricos mediante Ensayo ON-OFF.	86
3.3 Medición de Corrientes de Interferencia en zonas de cruce con otras líneas.....	89
3.4 Ubicación de Puntos Relevantes mediante Coordenadas GPS.....	90

## CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	93
---------------------------------	----

## CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	100
--	-----

## ANEXOS

## BIBLIOGRAFÍA



## ABREVIATURAS

<b>A</b>	Amperio
<b>CA</b>	Corriente Alterna
<b>CC</b>	Corriente Continua
<b>CIS</b>	Inspección de Potenciales a Intervalos Cortos
<b>cm</b>	Centímetros
<b>CSC</b>	Cobre / Sulfato de Cobre Saturado
<b>dB</b>	Decibel
<b>dc</b>	Corriente Continua
<b>DCVG</b>	Gradiente de Voltaje de Corriente Directa
<b>ECE</b>	Electrodo de Calomel Estándar
<b>EP</b>	Estación de Prueba
<b>FBE</b>	Epóxico de Unión por Fundición
<b>GPS</b>	Sistema de Posicionamiento Global
<b>Hz</b>	Hertz
<b>IR</b>	<i>Caída de Voltaje por resistencia</i>
<b>Km</b>	Kilómetros
<b>m</b>	Metros
<b>mA</b>	Miliamperio
<b>MMO</b>	Mezclas de Metales Oxidados
<b>ms</b>	Milisegundos
<b>mV</b>	Milivoltio
<b>On</b>	Ensayo de polarización con el rectificar encendido
<b>Off</b>	Ensayo de polarización con el rectificar apagado
<b>PC</b>	Protección Catódica
<b>PCM</b>	Mapeo de Corriente en Tubería
<b>PK</b>	Punto Kilométrico
<b>plg</b>	Pulgadas
<b>R1</b>	Rectificador 1
<b>R2</b>	Rectificador 2
<b>s</b>	Segundo
<b>SPC</b>	Sistema de Protección Catódica
<b>V</b>	Voltio



## SIMBOLOGÍA

$\%IR$	Porcentaje del Gradiente de Potencial
$\tau_1$	Gradiente de Potencial en Tierra Remota
$\tau_2$	Gradiente de Potencial en Ultima EP
$\tau_3$	Gradiente de Potencial en Próxima EP
$\phi_1$	Distancia del Defecto a la Ultima EP
$\phi_2$	Distancia del Defecto a la Próxima EP



## INDICE DE FIGURAS



	Pág.
<b>Figura 2.1.1</b>	Electrodo de Referencia de CSC..... 28
<b>Figura 2.1.2</b>	Calibración de Electrodo de Referencia..... 30
<b>Figura 2.1.3</b>	Medición Típica del Potencial de Tubo a Tierra..... 34
<b>Figura 2.1.4</b>	Gradiente de Voltaje por Flujo de CC..... 36
<b>Figura 2.2.1</b>	Potencial de la Línea vs Ubicación de la Media Celda.... 45
<b>Figura 2.2.2</b>	Registro de Datos CIS en Estación de Prueba..... 47
<b>Figura 2.3.1</b>	<i>Detección de Defectos en Recubrimientos</i> ..... 58
<b>Figura 2.4.1</b>	Equipo para Mapeo de Corriente en Tubería (a) Equipo Transmisor; (b) Equipo Receptor..... 66
<b>Figura 2.4.2</b>	Caída de Corriente por Defecto del Recubrimiento..... 68
<b>Figura 2.4.3</b>	Caída de Corriente vs Distancia de la Tubería..... 69
<b>Figura 3.1.1</b>	Medición de Resistividades Paralelo a la Tubería..... 80
<b>Figura 3.1.2</b>	Resistividades a lo Largo del Derecho de Vía de la Línea..... 81
<b>Figura 3.1.3</b>	Conexión del Interruptor en el Rectificador..... 86
<b>Figura 3.2.1</b>	Medición de Potenciales en Estación de Prueba..... 86
<b>Figura 4.1</b>	Perfil de Potenciales de Protección Catódica..... 95
<b>Figura 4.2</b>	Identificación de Puntos con Posibles Problemas de Revestimiento..... 97
<b>Figura 4.3</b>	Análisis de Corrientes de Interferencia en Puntos de Cruce..... 99

## INDICE DE TABLAS

		Pág.
<b>Tabla I</b>	Características de la Línea en Estudio.....	79
<b>Tabla II</b>	Datos de Placa y Condiciones de Operación de Rectificadores.....	85
<b>Tabla III</b>	Medición de Potenciales On-Off vs CSC.....	87
<b>Tabla IV</b>	Ensayo para Detectar Corrientes de Interferencia.....	89
<b>Tabla V</b>	Ubicación de Puntos Relevantes Mediante Coordenadas GPS.....	90



## INDICE DE PLANOS

<b>Plano 1</b>	Distribución General del Sistema de Protección Catódica.....	105
----------------	--	-----





## INTRODUCCIÓN

Dado que la corrosión externa es una de las mayores causas de fugas en las tuberías subterráneas, las tuberías son protegidas contra estos efectos mediante una combinación de revestimientos mecánicos y sistemas de protección catódica.

Los revestimientos representan la primera línea de defensa contra la corrosión externa. Aunque los revestimientos generalmente proporcionan una excelente protección, la mayoría de ellos sufren un deterioro con el tiempo debido a la absorción de agua, presiones de la tierra, abrasión de rocas, daños por raíces, ataque bacteriológico y otras numerosas causas. Estos daños permiten que la corrosión ocurra en sitios donde exista contacto entre el medio corrosivo (la tierra) y superficies de acero expuestas por los defectos en el revestimiento. Si esta condición se mantiene, la corrosión causará pérdida de metal y eventualmente fugas de producto.

La protección catódica tiene el objetivo de proteger la tubería en sitios donde el revestimiento ha fallado, actuando como la segunda línea de defensa contra la corrosión externa. La industria ya reconoce que la combinación de revestimientos con protección catódica es la medida más efectiva para controlar los efectos de corrosión externa en tuberías subterráneas.



La metodología ideal para el control de la protección contra la corrosión externa en tuberías subterráneas consiste en la combinación de la inspección del revestimiento y de la protección catódica de dichas tuberías para determinar el verdadero estado del equilibrio entre ambos sistemas. Para esto, existen variadas técnicas cuya preferencia dependerá básicamente de los recursos asignados y del criterio del inspector.

Técnica de monitoreo de potenciales On-Off con asistencia satelital, CIS, PCM, DCVG, GPS, entre otros son las alternativas tecnológicas que apoyados en su versatilidad y confiabilidad desarrollan estudios donde los detalles son determinados con gran exactitud, convirtiéndose en una referencia de calidad, presentando en este trabajo sus perfiles de acción y principios de funcionamiento e implementando el uso de una.



CIB-ESPOL



CIB - ESPOL

# CAPÍTULO 1



## 1. CONTROL DE CORROSIÓN EXTERNA EN TUBERÍAS ENTERRADAS

### 1.1 Determinación de la Necesidad de Control

Las estructuras metálicas, enterradas o sumergidas, están sujetas a la corrosión. Se deben adoptar adecuados procedimientos de control de corrosión para asegurar la integridad del metal por seguridad y operación económica.

Las necesidades de control de corrosión externa pueden ser establecidas por uno o más de los siguientes medios: ensayos de corrosión, observaciones visuales, resultados de pruebas de sistemas similares en ambientes similares, inspecciones en-línea, especificaciones de diseño y operación, seguridad y requerimientos económicos. Solo la ausencia de fugas es evidencia insuficiente para determinar que no es necesario el control de corrosión.

Factores físicos y ambientales incluyen lo siguiente:

- Tasa de corrosión de una tubería metálica particular en un ambiente específico;
- Ubicación de la tubería relacionada a la densidad de población y frecuencia de visitas por parte de personas;
- Ubicación de la tubería relacionado con otras instalaciones; y
- Fuentes de corrientes extrañas foráneas al sistema.

Factores económicos incluyen lo siguiente:

- Costos de mantenimiento del sistema de tuberías en servicio para su vida esperada; y
- Costos de contingencia de corrosión.



## 1.2 Consideraciones en el Diseño de Tuberías Enterradas

### Control de Corrosión Externa

El control de corrosión externa debe ser de primordial consideración durante el diseño de un sistema de tuberías. La selección de materiales y revestimientos están en la primera línea de defensa contra la corrosión externa. A causa de que los perfectos

revestimientos no son posibles, debe usarse la protección catódica en conjunto con éstos. Se hará mayor referencia a estos puntos en las secciones 1.3 y 1.4 más adelante.

Las tuberías nuevas deben estar externamente cubiertas a menos que investigaciones minuciosas indiquen que los revestimientos no son requeridos.



### **Aislamiento Eléctrico**

Se deben instalar dispositivos de aislamiento tales como bridas de ensamble, juntas de unión prefabricadas o acoples entre los sistemas de tuberías o porciones del sistema donde el aislamiento eléctrico es requerido para facilitar la aplicación de control de corrosión externa. Estos dispositivos deben ser apropiadamente seleccionados para temperatura, presión, resistencia química, resistencia dieléctrica, y fuerza mecánica.

Para la ubicación de los dispositivos de aislamiento eléctrico deberá considerarse la inclusión de, pero no limitarse a, lo siguiente:

- Conexiones para sistemas de líneas de tuberías principales, tales como sistemas de distribución laterales o de recolección;

- Entrada y salida de conductos de medición en-línea y/o estaciones de regulación de presión;
- Estaciones de bombeo o compresión, o en los ductos de succión y descarga o en la línea principal de la estación;
- El empalme de metales disímiles;
- La unión de una tubería desnuda y una revestida; y
- Locaciones donde se usan conexiones de corriente a tierra, tales como válvulas motorizadas e instrumentación.



Se debe considerar la protección contra relámpagos y fallas de corriente en los dispositivos de aislamiento, instalando equipos para alta corriente de periodo corto.

Cuando contactos eléctricos puedan afectar adversamente la protección catódica, las tuberías serán eléctricamente aisladas de postes de soporte de tubería, estructuras de puentes, cerramientos de túneles, pilotes, estructuras costeras, o acero reforzado en concreto. Cuando se requiera un dispositivo de aislamiento se deberá usar un dispositivo manufacturado para desarrollar esta función, o si es permisible, puede instalarse una sección de tubería no-conductora, tal como un tubo plástico.

## **Estaciones de Prueba para Control de Corrosión**

Se debe proporcionar estaciones de prueba para mediciones de potencial, corriente o resistencia, en suficientes lugares para facilitar la comprobación de la protección catódica. Tales locaciones pueden incluir, pero no limitarse a lo siguiente:

- Cruces de estructuras metálicas;
- Juntas de aislamiento;
- Cruces de puentes;
- Estaciones de válvulas;
- Ánodos galvánicos instalados;
- Cruces de carreteras;
- Áreas de corrientes extrañas, y
- Rectificadores instalados.



## **1.3 Revestimientos Externos**

### **Generalidades**

La función de los revestimientos externos es controlar la corrosión por aislamiento de la superficie externa de la tubería enterrada o sumergida del ambiente, para reducir los requerimientos de corriente de protección catódica y para mejorar la distribución de corriente. El

revestimiento externo debe ser seleccionado y aplicado apropiadamente y la tubería revestida cuidadosamente manejada e instalada para cumplir estas funciones. Varios tipos de revestimiento externo pueden lograr las funciones deseadas.

Entre las características deseables de revestimientos externos podemos mencionar:

- Aislante eléctrico efectivo;
- Efectiva barrera de humedad;
- Aplicación a la tubería con un mínimo de defectos;
- Buena adhesión a la superficie de la tubería;
- Habilidad para resistir el desarrollo de discontinuidades con el tiempo;
- Capacidad para resistir el daño durante su manipulación, almacenamiento e instalación;
- Resistencia al desprendimiento;
- Resistencia a la degradación química;
- Fácil de reparar;
- Retención de características físicas; y
- No tóxico para el ambiente.



Los factores típicos a considerar cuando se seleccione un revestimiento externo para tubería incluyen;

- Tipo de ambiente;
- Temperatura de operación del sistema de tubería;
- Ubicación física y geográfica;
- Manipulación y almacenamiento;
- Métodos de instalación de tuberías;
- Costos; y
- Requerimientos de preparación de la superficie de la tubería.



Los sistemas de revestimiento externo de tuberías deberán ser apropiadamente seleccionados y aplicados para asegurar la obtención de una adecuada unión. El desprendimiento de los revestimientos puede crear escudos eléctricos de la tubería que pueden exponer la efectividad del sistema de protección catódica.

### **Almacenamiento y Manipulación**

La tubería revestida a ser almacenada debe ser interna y externamente protegida de la corrosión atmosférica y el deterioro del revestimiento. El daño del revestimiento puede ser minimizado por



medio de una cuidadosa manipulación y el uso de almohadillas y cabrestos.



### **Inspección**

Personal calificado debe observar cada fase tanto de la operación de revestimiento como de la instalación de la tubería.

El uso de detector de discontinuidades es recomendado para detectar fallas que no pueden ser observadas visualmente. El detector de discontinuidades debe ser operado de acuerdo a las instrucciones de fábrica y a un nivel de voltaje apropiado a las características del sistema de revestimiento.

Uniones y ajustes deben ser cubiertas con un material compatible con el revestimiento existente. Los defectos de revestimiento deben ser reparados. Los materiales usados en la reparación de revestimientos deben ser compatibles con el revestimiento original de la tubería.

Debe tenerse cuidado cuando se usen materiales tales como envolturas flojas, espuma de poliuretano no conductiva y escudo de rocas alrededor de la tubería como protección contra daños físicos o

para otros propósitos, puesto que estos materiales pueden crear un escudo eléctrico, efecto que puede ir en detrimento de la efectividad de la protección catódica.



#### **1.4 Criterios Establecidos para Potenciales de Protección Catódica**

La efectividad de la protección catódica u otras medidas de control de corrosión externa pueden ser confirmadas por observación visual, por mediciones del espesor de la pared del tubo, o por el uso de dispositivos de inspección interna. A causa de que tales métodos en ocasiones no son prácticos, la reunión de algún criterio o combinación de criterios es evidencia de que una adecuada protección catódica ha sido lograda. Cuando se hacen excavaciones para algún propósito, la tubería deberá ser inspeccionada para evidenciar la corrosión y/o condiciones del revestimiento.

Los criterios expuestos han sido desarrollados a través de experimentos de laboratorio y verificado por evaluación de datos obtenidos de exitosas operaciones de sistemas de protección catódica. Pueden existir situaciones donde un solo criterio para evaluación de protección catódica no sea satisfactorio para todas las



condiciones. En ocasiones es necesaria una combinación de criterios para una sola estructura.

El historial de fugas por corrosión es valioso en la evaluación de la efectividad de la protección catódica, sin embargo, no se usará para determinar si se han logrado los niveles adecuados de protección catódica a menos que sea impráctico el hacer ensayos eléctricos.

### **Criterios de Protección**

El control de corrosión externa puede ser logrado en varios niveles de polarización catódica dependiendo de las condiciones del medioambiente. Sin embargo, en la ausencia de datos específicos que demuestren que se ha alcanzado el nivel de protección catódica, uno o más de los siguientes criterios se aplicarán:

- a. Un potencial negativo de por lo menos 850 mV aplicados con la protección catódica medido con respecto a un electrodo de cobre/sulfato de cobre saturado en contacto con el electrolito.

Pueden considerarse caídas de voltaje a través del límite estructura-electrolito para validar la interpretación de esta medición de voltaje.

Se resalta la aplicación de sólidas prácticas de ingeniería para determinar la importancia de las caídas de voltaje por métodos tales como:

- Medición o cálculo de caídas de voltaje;
- Revisión del desarrollo histórico del sistema de protección catódica;
- Evaluación de las características físicas y eléctricas de la tubería y los ambientes: y
- Determinación de si hay o no evidencia física de corrosión.

b. Un potencial polarizado negativo (Instant OFF) de por lo menos 850 mV respecto a un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre saturado.

Cuando la corriente es interrumpida, inmediatamente ocurrirá un cambio de voltaje en la tubería, siendo este valor el denominado potencial instant Off.

c. 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.



CIB-ESPOL

Este cambio de voltaje de polarización viene a ser determinado por la interrupción de la corriente de protección y la medida de declinación de polarización. El valor de voltaje a tomar como base de lectura para medir la declinación de polarización es el potencial instant Off.



### **Condiciones Especiales**

En tuberías ineficazmente recubiertas o desnudas donde la actividad de corrosión de línea larga es de fundamental preocupación, puede ser adecuada la medición de un sistema de corriente protectora en predeterminados puntos de descarga de corriente del electrolito a la superficie de la tubería, como el medido por una técnica de corriente de tierra.

El criterio de los  $-850$  mV puede no ser suficiente, en algunas situaciones, tales como la presencia de sulfuros, bacterias, elevadas temperaturas, ambientes ácidos, y metales disímiles.

Valores menos negativos que  $-850$  mV pueden ser satisfactorios, cuando la tubería es encajonada en concreto o enterrada en suelos de alta resistividad, secos o aireados.

## Notas Preventivas

Se aconseja la precaución antes del uso de potenciales polarizados menos negativos que -850 mV para protección catódica de tuberías cuando las presiones de operación y condiciones son conducentes a agrietamiento por tensión de corrosión.

Deberá evitarse el uso de potenciales de polarización excesivos en tuberías recubiertas externamente para minimizar el desprendimiento catódico del revestimiento.

Deberán evitarse los potenciales polarizados que resultan de la excesiva generación de hidrógeno en todos los metales, particularmente aceros de alta firmeza, ciertas calidades de aceros inoxidable, titanio, aleaciones de aluminio, tuberías en concreto pretensionado.

## Alternativa de Electrodo de referencia

Otros electrodos de referencia estándar pueden sustituir al electrodo de referencia de CSC. Se mencionan dos electrodos de referencia junto con su voltaje equivalente [a 25<sup>0</sup> C (77<sup>0</sup> F)]:

- Electrodo de referencia calomel saturado, ECE: -780 mV; y



- Electrodo de referencia de plata/cloruro de plata saturado usado en una solución de agua de mar 52 ohm-cm: -800 mV.

En adición a esta norma para electrodos de referencia, un material metálico alternativo o estructura puede ser usada en lugar del electrodo de referencia de CSC si se asegura la estabilidad del potencial del electrodo y si se establece su voltaje equivalente relacionado a un electrodo de referencia de CSC.



## 1.5 Control de Corrientes de Interferencia

### Generalidades

Las corrientes corrosivas de interferencia en estructuras metálicas enterradas o sumergidas difieren de otras causas de daños por corrosión en la que la corriente directa, que causa la corrosión, proviene de una fuente extraña a la estructura afectada. Normalmente la corriente de interferencia es recolectada del electrolito por la estructura afectada de una fuente de corriente directa que no está mecánicamente unida a dicha estructura.

Los efectos perjudiciales de corrientes de interferencia ocurren usualmente en locaciones donde hay transferencia de corrientes

entre las estructuras afectadas y el electrolito. Los revestimientos pueden desprenderse en áreas donde los gradientes de voltaje en el electrolito fuerzan la corriente hacia la estructura afectada. Sin embargo, como el revestimiento externo se desprende, queda expuesta una gran área de metal que habría de incrementar la demanda de corriente de protección catódica. Este desprendimiento puede crear problemas de escudo.

La severidad de la corrosión externa como resultado de las corrientes de interferencia depende de varios factores:



- Separación y dirección de la interferencia entre las estructuras afectadas y ubicación de la fuente de corriente de interferencia;
- Magnitud y densidad de la corriente;
- Calidad del revestimiento externo o ausencia de este en la estructura involucrada; y
- Presencia y ubicación de juntas mecánicas que tienen alta resistencia eléctrica.

Fuentes típicas de corrientes de interferencia incluyen las siguientes:





- Corriente directa: rectificadores para protección catódica, generadores, corriente directa de sistemas de trenes eléctricos, sistemas de transporte y bombas de industrias mineras, máquinas de soldadura, y otros sistemas de energía de corriente directa:
- Corriente alterna: sistemas de energía de corriente alterna y trenes eléctricos energizados con corriente alterna; y
- Corrientes telúricas.



### **Detección de Corrientes de Interferencia**

Durante los ensayos para control de corrosión externa, el personal debe estar alerta en la observación de cambios eléctricos o físicos que puedan indicar la interferencia de fuentes extrañas tales como:

- Cambios de potencial tubo-electrolito en la estructura afectada causados por fuentes extrañas de corriente directa;
- Cambios en la magnitud o dirección de la línea de corriente causados por fuentes extrañas de corriente directa;
- Picaduras (corrosión diseminada) localizadas cerca o inmediatamente adyacente a estructuras extrañas; y
- Daño de revestimiento externo en un área localizada cercana a una cama anódica o cerca de alguna otra fuente de corriente directa extraña.

En áreas donde se sospecha la existencia de corrientes de interferencia, se deben efectuar pruebas. Se notificará de todas las partes afectadas antes de que se ejecute la prueba. Una o varias combinaciones de los siguientes métodos de prueba pueden ser usadas:

- Medidas de potencial estructura-electrolito con registros o instrumentos de indicación;
- Medidas de flujos de corriente en la estructura con instrumentos de indicación o registro;
- Desarrollo de curvas beta para localizar el área de máxima descarga de corriente de la estructura afectada; y
- Medición de las variaciones en la corriente de salida de la posible fuente de corriente de interferencia y correlacionada con mediciones obtenidas en los dos primeros ítems enunciados.

### **Métodos de Mitigación de Problemas de Corrosión por Interferencia**

Los problemas de interferencia son individuales en naturaleza y la solución debe ser mutuamente satisfactoria para las partes involucradas. Estos métodos pueden ser usados en combinación o separadamente.

El diseño e instalación de uniones eléctricas de resistencia propia entre las estructuras afectadas es una técnica de control de interferencias. La unión conduce eléctricamente la corriente de interferencia de una estructura afectada a la estructura interferida y /o fuente de corriente,



- Se pueden necesitar dispositivos unidireccionales de control, tales como diodos o interruptores de reversión de corriente, en conjunción con uniones eléctricas si hay presencia de fluctuaciones de corriente. Estos dispositivos previenen la reversión del flujo de corriente.
- Puede ser necesaria una resistencia en la unión del circuito para controlar el flujo de corriente eléctrica de la estructura afectada a la estructura interferida.
- El enlace de uniones eléctricas puede reducir el nivel de protección catódica en la estructura interferida. Puede entonces requerirse protección catódica suplementaria en la estructura interferida para compensar este efecto.
- Una unión puede no mitigar efectivamente el problema de interferencia en el caso de una tubería desnuda catódicamente protegida o una tubería con revestimiento externo pobre, que es el causante de interferencia en una tubería con revestimiento.

La corriente de protección catódica puede ser aplicada a la estructura afectada en aquellos sitios donde la corriente de interferencia es descargada. La fuente de corriente de protección catódica puede ser galvánica o con ánodos para corriente impresa.

Un ajuste en la corriente de salida de rectificadores de protección catódica que interfieren puede resolver los problemas de interferencia.

La reubicación de camas anódicas de rectificadores de protección catódica puede reducir o eliminar las corrientes de interferencia halladas en estructuras cercanas.

La reprogramación de rutas de líneas propuestas puede evitar fuentes de corriente de interferencia.

La conveniente ubicación de ajustes de aislamiento puede reducir o resolver problemas de interferencia.

La aplicación de revestimientos externos en áreas de corriente halladas puede reducir o resolver problemas de interferencia.

## 1.6 Operación y Mantenimiento en Sistemas Catódicos

Las mediciones eléctricas e inspecciones se hacen necesarias para determinar que la protección ha sido establecida de acuerdo a criterios aplicables y porque cada parte del SPC puede estar sujeta a cambios. Por este motivo se pueden requerir ajustes en el SPC para mantener dicha protección. Pueden existir condiciones donde experiencias de operación indican la necesidad de hacer pruebas e inspecciones más frecuentemente que las recomendadas aquí. Debe tenerse cuidado en la selección de locación, número y tipo de mediciones usadas para determinar la eficiencia de la protección catódica.



Donde sea practicable y se determine la necesidad de sólidas prácticas de ingeniería, debe conducirse un detallado ensayo de potencial (intervalo cerrado) para (a) asegurar la efectividad del sistema de protección catódica; (b) proporcionar bases para datos de operación; (c) localizar áreas de inadecuados niveles de protección; (d) identificar locaciones probables a ser adversamente afectadas por construcción, corrientes extrañas, u otras condiciones inusuales del ambiente; o (e) seleccionar áreas a ser monitoreadas periódicamente. Los ajustes al sistema de protección catódica deben estar acompañados por suficientes pruebas que aseguren la

permanencia del criterio satisfecho. Un ensayo debe ser ejecutado después de que cada SPC es energizado y/o ajustado a determinar si el criterio aplicable ha sido satisfecho.

La efectividad del SPC debe ser monitoreada anualmente. Intervalos de monitoreo largos o cortos pueden ser apropiados, dependiendo de la variabilidad de factores de PC, consideraciones de seguridad, y factores económicos del monitoreo.

Se deben hacer pruebas e inspecciones de los recursos de PC para asegurar su propia operación y mantenimiento como sigue:

- Todas las fuentes de corriente impresa deben ser revisadas a intervalos de dos meses. Intervalos largos o cortos de monitoreo pueden ser apropiados. Evidencia de funcionamiento apropiado puede ser el rendimiento de corriente, consumo normal de energía, una señal que indica operación normal, o satisfactorios niveles de protección catódica en la tubería.
- Todos los medios de corriente impresa de protección deben ser inspeccionados anualmente como parte de un programa de mantenimiento preventivo para minimizar las fallas del servicio. Intervalos largos o cortos de monitoreo pueden ser adecuados.

Las inspecciones pueden incluir chequeos para mal funcionamiento eléctrico, seguridad de conexiones a tierra, exactitud de las medidas, eficiencia, y resistencia de circuito.

- Interruptores de reversión de corriente, diodos, uniones de interferencia, y otros dispositivos de protección, cuyas fallas pueden arriesgar la protección de la estructura, deben ser inspeccionados a intervalos de dos meses para funcionamiento apropiado. Pueden ser convenientes las mediciones a intervalos cortos o largos.
- La efectividad de aislamientos adecuados, continuidad de las uniones, y cubiertas aisladas deben ser evaluados durante los ensayos periódicos. Esto puede ser complementado con mediciones eléctricas.

Donde la tubería se ha destapado, se debe examinar para evidencia de corrosión externa y, si esta revestida externamente, para verificar la condición de su revestimiento externo.

El equipo de prueba para obtener cada valor eléctrico debe ser del tipo apropiado. Los instrumentos y equipo relacionado deben ser mantenidos en óptimas condiciones de operación y ser revisados para su precisión.



Se deben tomar medidas de reparación donde inspecciones y pruebas periódicas indican que la PC no tiene el alcance adecuado.

Estas medidas pueden incluir lo siguiente:

- Reparación, reposición o ajuste de componentes del SPC;
- Proporcionar recursos suplementarios donde sea necesaria la PC adicional;
- Los sectores con revestimientos dañados o desnudos deben ser completamente limpiados y apropiadamente revestidos si se requiere lograr la protección catódica;
- Reparación, reposición, o ajuste de continuidad y uniones de interferencia;
- Remoción de contactos metálicos accidentales; y
- Reparación de dispositivos de aislamiento defectuosos.





# CAPÍTULO 2



## 2. TÉCNICAS MODERNAS PARA EL MONITOREO DE LA CORROSIÓN EXTERNA

### 2.1 Ensayo de Potenciales ON – OFF con asistencia satelital

#### Generalidades

El monitoreo de los Sistemas de Protección Catódica en tuberías son requeridos por la ley en muchos países y es un importante medio del mantenimiento de la integridad de la tubería.

El método de ensayo de potenciales “ON – OFF” mas ampliamente difundido, es el conocido como “*Estudio en Estaciones de Prueba*”. Este método de monitoreo consiste en la medición y registro de los potenciales tubo a tierra en las designadas estaciones de prueba.

Los materiales y equipos requeridos para la realización del estudio son los siguientes:

- Multímetro
- Electrodo de Referencia de Cobre/Sulfato de Cobre
- Interruptores de Corriente con GPS incorporado, ver Anexo
- Receptor GPS (Opcional)

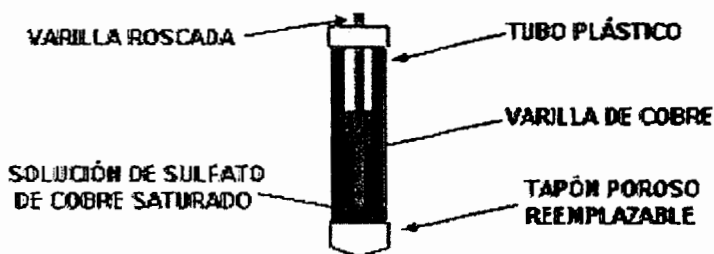


Con la finalidad de iniciar apropiadamente un estudio de este tipo, el equipo de trabajo deberá ser entrenado, para lo cual se deberá discutir muchos de los factores que afectarán la calidad de los datos de campo. Un inicio es el estudio de los principios teóricos como se revisó en el capítulo anterior y por supuesto el correcto uso de los equipos requeridos como veremos a continuación.

### **Electrodos de Referencia**

El electrodo de referencia estándar utilizado es el de CSC, y en zonas de alta concentración de iones cloruros es el de Plata/cloruro de Plata. En la figura 2.1.1 se muestra el electrodo de referencia de CSC, el cual es muy práctico y puede ser usado en una variedad de aplicaciones de campo y condiciones de terreno debido a su relativa estabilidad.





**Figura 2.1.1 Electrodo de Referencia de CSC**

Cuando potenciales de tubo a tierra son medidos utilizando este electrodo, es muy importante que las mediciones sean lo más exactas posibles. Para lograr esto es importante que el potencial del electrodo de referencia, presente un potencial de media celda estable dentro de límites razonables. Aunque la estabilidad en campo del electrodo de Cobre/Sulfato de Cobre es generalmente aceptable, esta puede ser afectada por contaminación y cambios en temperatura y luz ultravioleta.

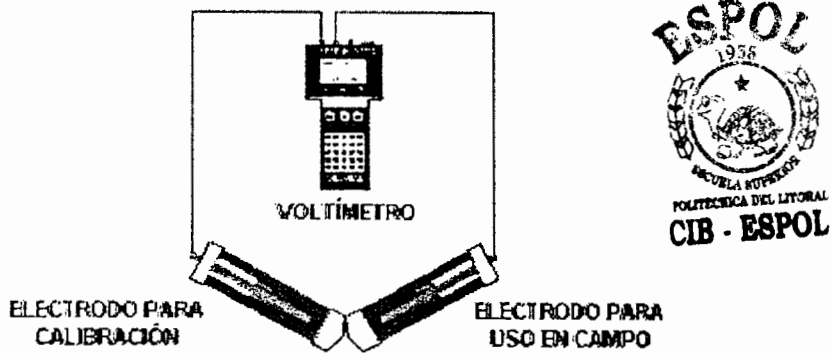
Un tipo importante de contaminación sería por “iones cloruro” que podrían penetrar a través del tapón poroso. Es muy importante que el electrodo de referencia de CSC no sea usado en áreas que contengan sal, tales como pantanos de agua-sal, agua salobre o de mar. La contaminación resultará en potenciales de tubo a tierra inexactos, con lo que el electrodo de referencia dejará de presentar un potencial normal.

Los cambios de temperatura pueden afectar el potencial del electrodo de referencia en alrededor de 0.5 mV por grado Fahrenheit. Por lo tanto habrán algunos cambios diarios. Sin embargo, mientras que el electrodo no esté expuesto a grandes variaciones en la temperatura, generalmente ninguna acción preventiva es requerida.

Ha sido documentado que la luz ultravioleta también puede afectar la estabilidad del electrodo por lo que se recomienda que sus lados transparentes sean cubiertos con cinta aislante para reducir cualquier efecto.

Antes de iniciar el ensayo es importante chequear o calibrar los electrodos de referencia a ser usados. Esto se puede realizar como se lo muestra en la figura 2.1.2. La prueba consiste simplemente en colocar el tapón poroso de un electrodo estándar (no usado en campo) contra el tapón de los electrodos a usar en la prueba y medir la diferencia de voltaje en milésimas. Generalmente, si la diferencia es menor que 4 a 6 milivoltios ningún mantenimiento del electrodo será requerido.





**Figura 2.1.2 Calibración de Electrodos de Referencia**

Es recomendable que el grupo de trabajo porte siempre un electrodo de referencia calibrado, el cual no deberá ser usado para las mediciones de campo sino solo para la prueba de calibración descrita arriba.

La prueba de los electrodos de referencia debería ser realizada cada mañana antes de iniciar inspección. La diferencia de milivoltaje y polaridad entre el electrodo de trabajo y el de calibración debería ser registrada en un libro diario de progreso.

Cualquier electrodo de referencia que falle la prueba debería ser separado y limpiado tan pronto como sea posible para asegurar que el grupo cuente siempre con repuestos usables (un equipo de inspección típico requerirá de al menos tres electrodos de referencia,

uno que servirá para las mediciones en campo, uno para las calibraciones y al menos uno como repuesto).

Los electrodos de referencia contaminados necesitan ser separados para limpieza. La varilla de cobre puede ser limpiada con una solución al 10% de ácido nítrico, donde la varilla deberá sumergirse por varios minutos para liberar toda la superficie de contaminantes. Aunque papel de lija puede ser usado para la limpieza de la varilla de cobre, este papel no debería contener aluminio o cualquier otro óxido metálico abrasivo.

Después de la limpieza de la varilla, esta debería ser enjuagada completamente en agua destilada.

El tubo plástico del electrodo puede ser lavado con agua y jabón, utilizando agua destilada para el enjuague.

El tapón cerámico poroso puede ser sumergido en agua destilada para reducir o eliminar cualquier contaminante. Se puede requerir sumergirlo por varias horas con muchos cambios de agua.



Cuando el electrodo ha sido completamente limpiado, este puede ser reensamblado y llenado con la solución de Sulfato de Cobre.

La solución de sulfato de cobre debe ser saturada, manteniendo ciertos cristales visibles, y en el extremo inferior colocar una cubierta sobre el tapón cuando no se esté usando para prevenir fugas y contaminación.

Ahora está disponible el gel de Sulfato de Cobre para el uso en electrodos de referencia reduciendo el problema de fugas que algunas veces pueden ocurrir cuando se usa la solución. Sin embargo, se ha encontrado que mientras el gel es satisfactorio para un uso ocasional del electrodo de referencia, puede no proveer suficiente humectación de la superficie del tapón poroso para esta aplicación. Por lo tanto se recomienda que el gel no sea usado en este ensayo.

Para reducir la resistencia del contacto a tierra, es también recomendado que los tapones porosos tengan una formación cónica para permitir la penetración en la superficie del terreno.



Debido a que los electrodos de referencia no están disponibles localmente en muchas áreas, repuestos incluyendo tapones extras, tienen que ser cargados con el grupo de trabajo.

Los términos “electrodo de referencia”, “referencia” y “media celda” son sinónimos usados para describir al electrodo de referencia estándar.



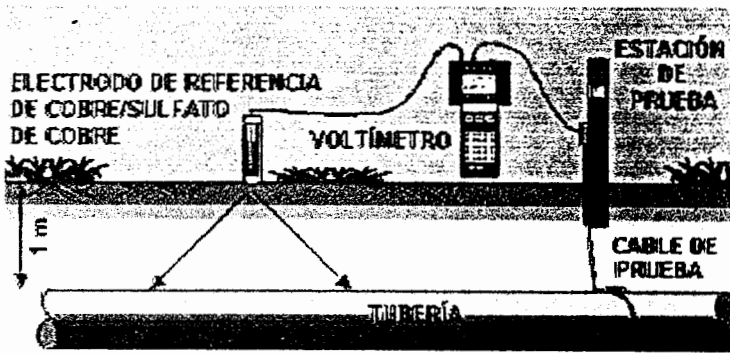
### **Potenciales de Tubo a Tierra**

Antes de realizar las mediciones potenciales reales del tubo a tierra, es importante entender que representa realmente el potencial.

La figura 2.1.3 muestra el arreglo típico para una medición del potencial del tubo a tierra en una estación de prueba.

El electrodo de referencia es posicionado, en la superficie de la tierra, sobre la tubería, de modo que el tapón poroso tenga un buen contacto con la tierra. El electrodo de referencia es conectado por medio de un cable de prueba al terminal negativo de un voltímetro (el voltímetro debe ser de alta impedancia de entrada para asegurar la exactitud).





**Figura 2.1.3 Medición Típica del Potencial de Tubo a Tierra**

El terminal positivo del voltímetro es conectado a la tubería a través de un cable de prueba ubicado en la estación de prueba. El potencial del tubo a tierra será mostrado en un medidor, donde la magnitud de este potencial dependerá del estado del SPC.

Este potencial representa el potencial promedio en esa ubicación. Por ejemplo, en una tubería desnuda, el potencial del tubo a tierra será el potencial promedio de quizás solo 2 o 3 metros del tubo (aproximadamente dos veces la profundidad a la que el tubo esté enterrado). El potencial de cada centímetro cuadrado puede contribuir diferentemente al potencial promedio. Habrá generalmente una mayor contribución al potencial promedio desde la parte superior del tubo y la parte baja del electrodo de referencia, que desde el fondo de la tubería a una parte alejada del electrodo de referencia.

Este hecho tiene que ser claramente entendido, ya que el significado del potencial de  $-850$  mV es solo un promedio, y ambos potenciales mayor y menor a este valor contribuyen a su medición.

Antes de proceder al siguiente tópico, los efectos del gradiente de voltaje en el terreno deben ser discutidos.

Siempre que corriente directa desde un SPC fluye a través de la tierra, gradientes de voltaje serán producidos. Esto es directamente análogo a la corriente directa fluyendo a través de un resistor y produciendo una caída de voltaje.

En adición a los gradientes de voltaje creados en la tierra, la corriente de la PC que fluye a lo largo de la tubería también creará caídas de voltaje (por ejemplo la corriente de retorno que fluye al rectificador de PC).

En sistemas de tuberías recubiertos, hay también corriente que fluye a través del recubrimiento del tubo, el cual puede producir un mayor gradiente de voltaje que la tierra. Por lo tanto, en los casos en donde la corriente directa esté fluyendo, el potencial real del tubo a tierra será, el potencial del tubo a tierra medido, mas el gradiente de

voltaje en la tierra, mas la caída de voltaje por atravesar el recubrimiento. Todas estas caídas de voltaje en la tubería son llamadas caídas IR, que no es otra cosa que la caída de voltaje a través de una resistencia de acuerdo a la ley de Ohm. Esto es esquemáticamente mostrado en la figura 2.1.4.

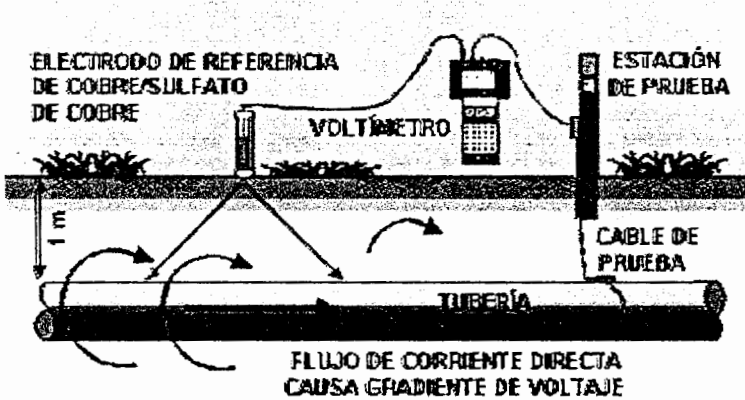


Figura 2.1.4 Gradiente de Voltaje por Flujo de CC

En este caso, el potencial del tubo a tierra no es el verdadero potencial de la tubería. Si el verdadero potencial del tubo a tierra desea ser medido, el flujo de corriente directa que causa los gradientes de voltaje (caídas IR) debe ser retirado.

Esto puede ser logrado por la interrupción temporal de la corriente de salida del rectificador de PC, el cual suspenderá el flujo de corriente directa en el sistema. Esto será revisado en detalle más adelante.

Por lo tanto hay dos potenciales tubo a tierra que pueden ser medidos y registrados en cada locación. El potencial registrado con la corriente fluyendo es llamado el potencial "ON", y el potencial registrado en el instante en que el flujo de corriente es medido, es llamado potencial "OFF", "Instante OFF" o de "polarización OFF". Algunos estudios requieren ambos potenciales "ON" y "OFF" para ser registrados. Otros tipos de estudio, por ejemplo en sistemas de ánodos de sacrificio, se requieren solo potenciales "ON". Note que en los sistemas de ánodos de sacrificio, la magnitud de la corriente que fluye es generalmente menor que en los sistemas con rectificador, y el flujo de corriente es más localizado debido a la distribución de los ánodos.

En tuberías recubiertas, potenciales prácticamente exactos pueden ser generalmente registrados incluso con el electrodo de referencia desplazado un metro de la línea de la tubería. Sin embargo, en tuberías desnudas o pobremente recubiertas, es muy importante el colocar el electrodo de referencia sobre la tubería.





## **Interrupción del Rectificador**

Como ya fue mencionado, los potenciales "OFF" del tubo a tierra pueden ser medidos y registrados solo si las fuentes de corriente de la PC (rectificadores) son momentáneamente interrumpidas.

Si los verdaderos potenciales "OFF" van a ser registrados, es imperativo interrumpir todos los rectificadores en línea que afecten la sección a ser inspeccionada. Si algunos rectificadores no están interrumpidos, entonces los potenciales "OFF" registrados no serán lecturas verdaderas.

En este momento se deben realizar las preguntas de que si existen conexiones hacia o desde la tubería, o si hay presencia de rectificadores foráneos. Donde la existencia de rectificadores foráneos sea conocida que puedan afectar a la línea, pero no exista ningún tipo de conexión, es importante poner fuera de operación a estos rectificadores durante el estudio (otras pruebas pueden ser requeridas luego). De esta manera cualquier área de interferencia adversa debería ser vista durante la inspección. Es también importante recordar que los potenciales "OFF" registrados durante el estudio pueden no ser valores verdaderos debido a los efectos de flujo de corriente desde los rectificadores foráneos.

Pruebas especiales de los efectos de los rectificadores foráneos pueden ser iniciadas separadamente al final de este ensayo.

Donde existan conexiones a líneas foráneas, es importante conocer, la magnitud y polaridad de la corriente en la conexión. Esto determinará si esta es una corriente foránea o si es que sale desde la línea que está siendo inspeccionada. Si la corriente viene desde un rectificador foráneo, entonces este rectificador necesita ser interrumpido para el estudio.

Note que la interrupción de las conexiones causará que la corriente fluya hacia otras direcciones, por lo que la interrupción de la conexión debería ser evitada a menos que existan circunstancias especiales.

Cuando se interrumpe a los rectificadores de PC, todas las interrupciones deben ocurrir al mismo tiempo con la finalidad de que potenciales "OFF" verdaderos sean medidos. Por lo tanto, los interruptores de corriente instalados deben estar sincronizados y todos deben cambiar la corriente a "ON" y "OFF" al mismo tiempo.



Si un interruptor falla, las lecturas registradas "OFF" no ser válidas.

Ahora están disponibles los interruptores de corriente controlados por GPS, estos tienen la ventaja de permanecer sincronizados durante el tiempo que sean requeridos, mientras que la comunicación con el satélite sea mantenida en el momento de la calibración.

Esto quiere decir que previo a la sincronización debe haber señal del GPS. No necesariamente deben ser sincronizados simultáneamente sino que pueden serlo en tiempos diferentes. La fuente de energía de un GPS puede ser desde baterías o desde la señal alterna que alimenta al rectificador. El interruptor sufrirá una descalibración solo cuando sus baterías se agoten o sufra una desconexión (fuente de energía alterna). En este instante se deberá nuevamente sincronizar al interruptor, por lo que su señal de GPS deberá estar activa. En el caso de baterías, su energía dura aproximadamente 5 días, y el periodo de trabajo del interruptor se puede programar por ejemplo, de 06H00 a 18H00, entonces en el cuarto día se realizaría el cambio de baterías y se procedería a la calibración fuera del periodo de trabajo tal que este no se vea afectado. Para el caso de



interruptores de fuente alterna se deberán tomar todas las medidas preventivas tal que no se corra el riesgo de sufrir una descalibración en periodos de trabajo.

Los interruptores sincronizados pueden interrumpir la corriente del rectificador varias veces por ciclo, y a varias tasas de tiempo "ON" a tiempo "OFF". La selección de ambos, el tiempo de ciclo y la tasa de tiempo de "ON" a "OFF" es muy importante para la viabilidad del estudio y la validez de los datos.

El tiempo de ciclo es el tiempo total seleccionado para un ciclo de interrupción completa, incluyendo el tiempo "ON" y el tiempo "OFF". Para muchos estudios de este tipo, el tiempo de ciclo es de 4 o 5 segundos, ya que la toma de datos depende de la capacidad de percepción del inspector.

Las tasas de tiempo típicas son para el primer caso 3:1 y para el segundo 3:2, lo que representa 3 segundos ON – 1 segundo OFF y 3 segundos ON – 2 segundos OFF, respectivamente.







### **Desarrollo del Ensayo**

Para iniciar con el estudio se deberán registrar los puntos de operación de todos los rectificadores que alimenten el sistema. Se colocarán tantos interruptores de corrientes como rectificadores haya. Todos los interruptores deberán ser sincronizados mediante sus GPS, además se los programará con el tiempo de ciclo y la tasa de tiempo a la que interrumpirán la corriente.

Se recorrerán todas las estaciones de prueba existentes en la línea tal que se registren los potenciales de tubo a tierra "ON" y "OFF". El potencial OFF a registrar es también llamado "Instante OFF", ya que será aquel que el voltímetro registre justo en el instante de interrupción en donde habrá un salto del valor ON al valor Instante OFF, debido a que si el estado OFF se mantiene la tubería tenderá a despolarizarse provocando una disminución en este valor.

En muchos casos la ubicación de las estaciones de prueba es desconocida, por lo que la asistencia de un equipo GPS es de gran ayuda. En caso de que no existan las coordenadas previas de los puntos el GPS podrá siempre referenciar un punto conocido para tener una idea más precisa de la ubicación del siguiente punto. En ambos casos siempre es muy útil la asistencia de un guía que

conozca las diferentes entradas vecinales tal que el trabajo se agilice.

Luego, con toda la información registrada se elaboran gráficas de los potenciales ON y OFF vs. La abscisa de la tubería para ver el comportamiento de los potenciales a lo largo de la tubería y de esta manera emitir conclusiones y recomendaciones.



## 2.2 Inspección de Potenciales a Intervalos Cortos

### Generalidades

Como ya se mencionó en la sección anterior el estudio en estaciones de prueba es uno de los métodos de monitoreo más difundidos por su relativa sencillez y rapidez de realización, aunque esta es una información muy útil, particularmente para tuberías con buenos recubrimientos, los datos de las estaciones de prueba solo representan los potenciales en menos del 1% de la superficie de la tubería. Los datos de las estaciones de prueba no proveen ninguna información de los potenciales del tubo a tierra a lo largo de la tubería entre estaciones de prueba.

En una tubería desnuda o pobremente recubierta, los datos de las estaciones de prueba pueden representar los potenciales solo que en pocos metros desde la estación de prueba.



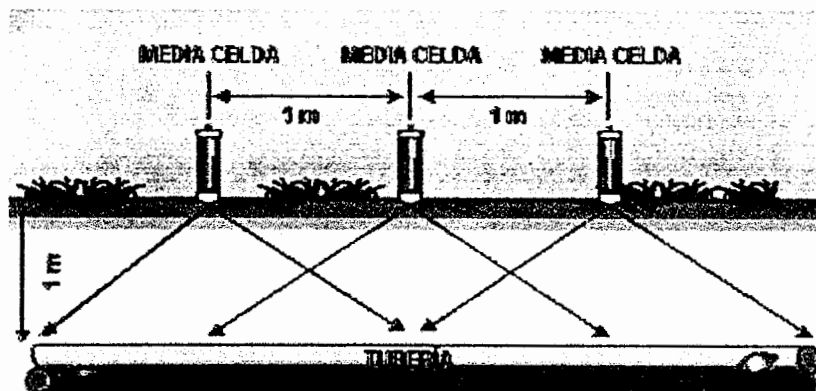
No obstante esto ha sido el principio para el desarrollo de la técnica de "Inspección de Potenciales a Intervalos Cortos" en tuberías, conocido como CIS por sus siglas en inglés (Close Interval Survey). Se recomienda realizar esta técnica con la finalidad de proveer los datos para un aseguramiento de la efectividad del Sistema de Protección Catódica sobre la longitud completa de la tubería.

El ensayo CIS es muy parecido al ensayo en estaciones de prueba, en lo concerniente a equipos y principios de operación, por lo que para un mejor entendimiento de este ensayo es primordial que se haya entendido la sección anterior. Las diferencias operacionales que se presentan son las que introducen el uso de equipo mas especializado.

Los materiales y equipos requeridos para la realización del estudio son los siguientes, ver Anexos A y B:

- Voltímetro

- Electrodo de Referencia de Cobre/Sulfato de Cobre
- Interruptores de Corriente con GPS incorporado
- Colector de datos computarizado (Datalogger)
- Localizador de Tuberías
- Multímetro (Opcional)
- Receptor GPS (Opcional)



**Figura 2.2.1 Potencial de la Línea vs Ubicación de la Media Celda**

La base conceptual para la realización de un CIS es como sigue; si una conexión es hecha entre el tubo y la estación de prueba mediante el cable de prueba, y el electrodo de referencia es movido a lo largo de la línea como se muestra en la figura 2.2.1, el potencial del tubo a tierra puede ser medido en numerosas locaciones secuenciales. Esta es la base para el CIS. El espaciamiento del electrodo de referencia usualmente es de 1 o 3 metros, y se puede

realizar la medición de potenciales del tubo a tierra sobre una longitud acordada. Se puede elaborar un gráfico del potencial vs. La distancia, el cual nos dará una noción de los puntos con problemas en la tubería en función de la abscisa de la misma.



### **Datos en Estaciones de Prueba**

Las estaciones de prueba (EP) están normalmente ubicadas a lo largo de la tubería en locaciones tales como caminos, cruces con líneas de ferrocarril, cruces con otras líneas, y de 1 a 5 Km de separación en áreas remotas.

Las EP proveen de un medio de contacto eléctrico con la tubería para propósitos de inspección. Aunque el potencial de tubo a tierra tomado en las EP solo representa unos pocos metros de tubería, estos valores pueden ser utilizados como datos de prueba y comparación de los potenciales en los intervalos recomendados.

Las EP adicionalmente a todas las funciones que cumplen, las cuales ya han sido mencionadas, para el CIS estas realizan las siguientes funciones de particular importancia.

La EP es un punto de medición en la cual la caída de voltaje en la tubería puede ser medida. La caída de voltaje en la tubería mostrará directamente si los interruptores están operando apropiadamente y si todos los rectificadores que afectaban esa sección de la tubería se han interrumpido.

En el procedimiento CIS, cuando se llega a una EP, hay varias pruebas que deberían ser completadas en secuencia. El operador deberá ingresar en el datalogger la distancia y la designación de la EP. Se debe registrar el llamado “potencial de tierra lejana”, el cual no es otra cosa que el potencial registrado con los electrodos de referencia ubicados en la EP cercana, pero con la conexión eléctrica en la última EP pasada. Esto se muestra en la figura 2.2.2.

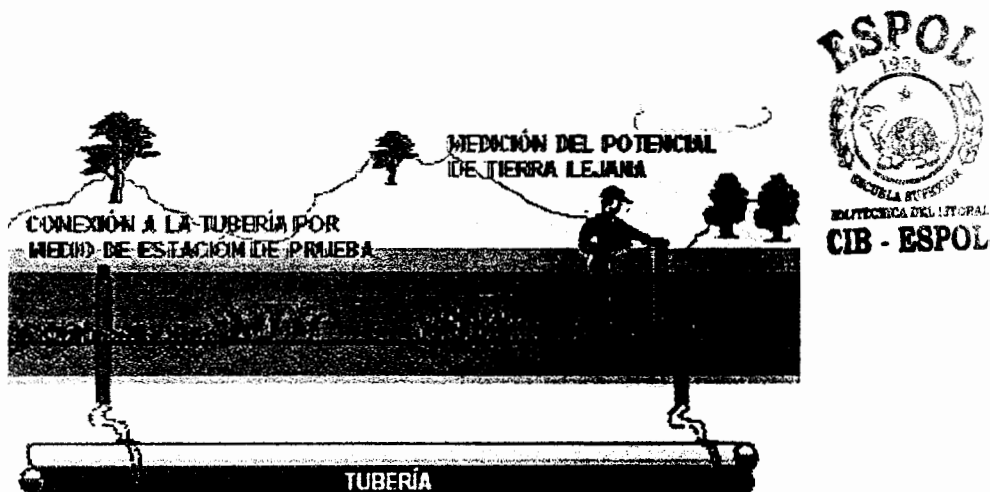


Figura 2.2.2 Registro de Datos CIS en Estación de Prueba

Después de registrar el potencial de tierra lejana, el técnico deberá registrar el potencial de “tierra cercana”, este se refiere a aquel en que los electrodos se mantienen en la misma posición en la tierra que para el de tierra lejana, pero esta vez la conexión eléctrica a la tubería será en la EP cercana.

Después de medir el potencial de tierra cercana, se deberá medir la caída IR en el tubo. Esto es la caída de voltaje en la tubería desde la EP lejana a la EP cercana. Conectando la EP lejana a uno de los terminales del datalogger (generalmente el positivo) con el cable del ensayo y el otro terminal del datalogger (el negativo) conectado al cable que va al tubo en la EP cercana. Hay que tomar en cuenta la polaridad de las lecturas.

Un ejemplo típico sería el siguiente:

Tierra lejana, -1,720 V en ON y -1,084 V en OFF

Tierra cercana, -1,796 V en ON y -1,086 V en OFF

Entonces, IR sería, +76 mV en ON y +2 mV en OFF

La caída IR “ON” es positiva lo que significa que con la conexión estándar en el medidor, la corriente fluye de la tubería desde la



última EP hacia la EP cercana. Si el diámetro del tubo, espesor de pared y la distancia entre las EP son conocidas, el valor de la caída IR puede ser usado para calcular la cantidad de corriente que fluye en la línea.

El valor +2 mV de caída IR "OFF", indica que hay todavía una pequeña cantidad de corriente fluyendo durante el ciclo de interrupción OFF, y el flujo va hacia la EP cercana. Por lo tanto, hay probablemente otro rectificador aguas abajo en la línea el cual está mostrando un pequeño efecto en esta locación.

Bajo circunstancias normales, una caída IR de 2 mV sería aceptable en la mayoría de las tuberías, y el ensayo podría continuar. Sin embargo, la próxima caída IR en la línea debería ser notada, y si es aún positiva y se ha incrementado de 4 a 6 mV, sobre una distancia comparable del ensayo, entonces la fuente de corriente necesitará ser investigada.

Las EP son por lo tanto un componente muy valioso del SPC y un gran activo para el ensayo CIS. Note que en términos generales, cualquier parte de la tubería que es usada para pruebas del SPC o para contacto eléctrico, puede ser llamada una "EP". Esto sería



aplicable para válvulas, canalizaciones verticales, y otros accesorios conectados a la tubería pero con salida sobre la tierra.



### Ciclos y Tasas de Interrupción

Recordemos que el tiempo de ciclo es el tiempo total seleccionado para un ciclo de interrupción completo. En el CIS es muy común que el ciclo de tiempo sea de 2 segundos para un eficiente y válido estudio. Este tiempo de ciclo es también usado en viejos rectificadores con salidas de 50 o 60 amperios, sin causar daño. Mayores salidas en los rectificadores pueden necesitar un mayor ciclo de tiempo dependiendo de las circunstancias.

Una tubería con un buen recubrimiento con solo pequeñas salidas del rectificador, un ciclo de tiempo de 1 segundo también puede ser usado efectivamente.

La tasa de tiempo de ON a OFF ha sido históricamente de 4:1, por ejemplo el ciclo de tiempo ON es cuatro veces mayor que el ciclo de tiempo OFF. Sin embargo, tasas más pequeñas que 4:1 han sido desarrolladas con muy buenos resultados, sin afectar adversamente la calidad de los datos. Estudios pueden ser realizados con tasas de tiempo de 2:1 e incluso 1,66:1.

Lo siguiente puede ser usado como una guía para ciclos y tasas de tiempo, mientras que las salidas de los rectificadores sean también consideradas.

- Tuberías desnudas y con revestimientos de baja eficiencia, ciclo de tiempo de 2 segundos, 1,5 segundos ON, 0,5 segundos OFF.
- Tuberías con buenos revestimientos, ciclo de tiempo de 1 segundo, 0,6 segundos ON, 0,4 segundos OFF.

### **Colector de Datos Computarizado**

El datalogger o voltímetro computarizado usado para el ensayo debe ser capaz de registrar todos los datos requeridos durante el CIS, siendo también capaces de resistir el ambiente de trabajo.

Esto significa que la unidad de datalogger debe tener una gran capacidad de memoria, programas diseñados específicamente para el CIS, y una capacidad completa alfanumérica con la finalidad de ingresar comentarios y notas.

El datalogger necesita ser programable para evitar registrar datos durante los primeros 125 milisegundos en los que se suele producir una cierta inestabilidad durante el periodo de interrupción.



Algunos equipos de trabajo también llevan un multímetro durante la inspección para la adquisición de otros datos, tales como lecturas AC y lecturas de corriente. Teniendo un segundo medidor con el equipo les permite chequear la exactitud del datalogger en cualquier momento, por ejemplo cuando cambios en el potencial no esperados son vistos.

Como estas unidades serán operadas bajo lluvia y ambientes de alta humedad, es esencial que ellos sean impermeables y de fácil secado si es que la humedad penetra en la estructura.

Al menos deberá haber un datalogger de repuesto en el sitio de trabajo, de modo que el grupo de trabajo no sufra retrasos debido a problemas por los equipos.

### **Ubicación de la Tubería**

Con la finalidad de registrar los potenciales del tubo a tierra lo más exactos posibles, es necesario ubicar los electrodos de referencia sobre la tubería. Aunque en tuberías con buenos revestimientos la diferencia de potencial es mínima si el electrodo de referencia está a uno o dos metros fuera de la línea de la tubería, una correcta



práctica de inspección es hacer lo posible por posicionar correctamente el electrodo de referencia.

En tuberías desnudas, el electrodo de referencia tiene que ser posicionado correctamente, y este posicionamiento puede depender en el tipo de SPC que protege a la línea.

En casos donde el sistema de protección es un lecho de ánodos remoto, el electrodo de referencia debería ser colocado directamente sobre la tubería. Por otro lado, donde el sistema de protección consista de ánodos de corrientes impresas distribuidos junto a la tubería, el posicionamiento del electrodo de referencia puede ser diferente.

Donde los ánodos son colocados a lo largo de un lado de la tubería, el electrodo de referencia debería ser colocado sobre el lado de la tubería en el lado opuesto de los ánodos. Esta ubicación puede ser encontrada por una prueba simple de movimiento del electrodo de referencia cruzando la tubería y observando el menor potencial negativo OFF.



Hay varios tipos de localizadores de tuberías y cables que pueden ser usados para el CIS, y su uso dependerá de la preferencia y experiencia del personal. La localización de la tubería en el CIS puede iniciarse con frecuencia de dos maneras diferentes.

Algunos grupos de trabajo prefieren tener la tubería localizada, se realiza de manera alterna al CIS el marcaje del derecho de vía de la tubería mediante un estacado, colocando cada estaca a cierta distancia. En este caso, el técnico que registra los datos CIS sigue la línea de marcas (estacas) y se hace una observación de cada estaca que se ha pasado.

Un método alternativo involucra a un técnico localizando a la tubería inmediatamente adelante del técnico que colecta los datos CIS.

Normalmente, la ubicación de la tubería sería de no más que de 6 a 10 metros adelante. En este caso ningún marcaje es requerido y la ubicación de la tubería puede ser siempre verificada.

### **Equipo Auxiliar**

A parte del equipo descrito previamente, también es requerido un sistema dispensador de alambre. El cable generalmente usado es



de cobre barnizado AWG #32 SNLR. Este es usado para mantener un constante contacto eléctrico con la tubería a través de una conexión hecha en las estaciones de prueba.

La medición de la distancia puede ser colocando las estacas a una distancia fija, o usando un contador de distancia electrónico del cable usado en el ensayo midiendo cuanto cable ha sido dispensado.

El chaleco para el ensayo CIS es una pieza muy útil del equipo. Está diseñado para portar un dispensador de cable, un contador y un datalogger, además de una bolsa para cable extra, herramientas y otros ítems.

El grupo de trabajo debería también llevar una variedad de pequeñas partes de repuestos, herramientas y cintas aislantes, en caso de que se requiera de alguna reparación de emergencia en campo.

## **2.3 Corriente Directa y Gradiente de Voltaje**

### **Generalidades**

En Protección Catódica, cuando la corriente fluye a través de un suelo resistivo hacia el acero expuesto en las imperfecciones del



revestimiento protector, se genera un gradiente de Voltaje en el terreno. Cuanto mayor es el defecto mayor será la corriente que fluye y por lo tanto el gradiente de voltaje, esto se emplea como técnica de prioridad a la hora de reparación de defectos.

Los materiales y equipos requeridos para la realización de este ensayo son los siguientes, ver Anexos A y B:

- Voltímetro de alta sensibilidad especialmente diseñado para este estudio, incluye un datalogger.
- Electrodo de Referencia de Cobre/Sulfato de Cobre.
- Interruptores de Corriente con GPS incorporado.
- Fuente de corriente directa con un lecho temporal, esto para el caso en que la tubería no esté protegida por un sistema de corrientes impresas o si el sistema no puede ser interrumpido.
- GPS diferencial.



CIB-ESPOL



### Principios de la Técnica

Este ensayo utiliza corriente directa, sea esta la corriente impresa por el propio SPC de la línea o de un sistema temporal, la cual es pulsada por medio de un interruptor de corriente. El Gradiente de

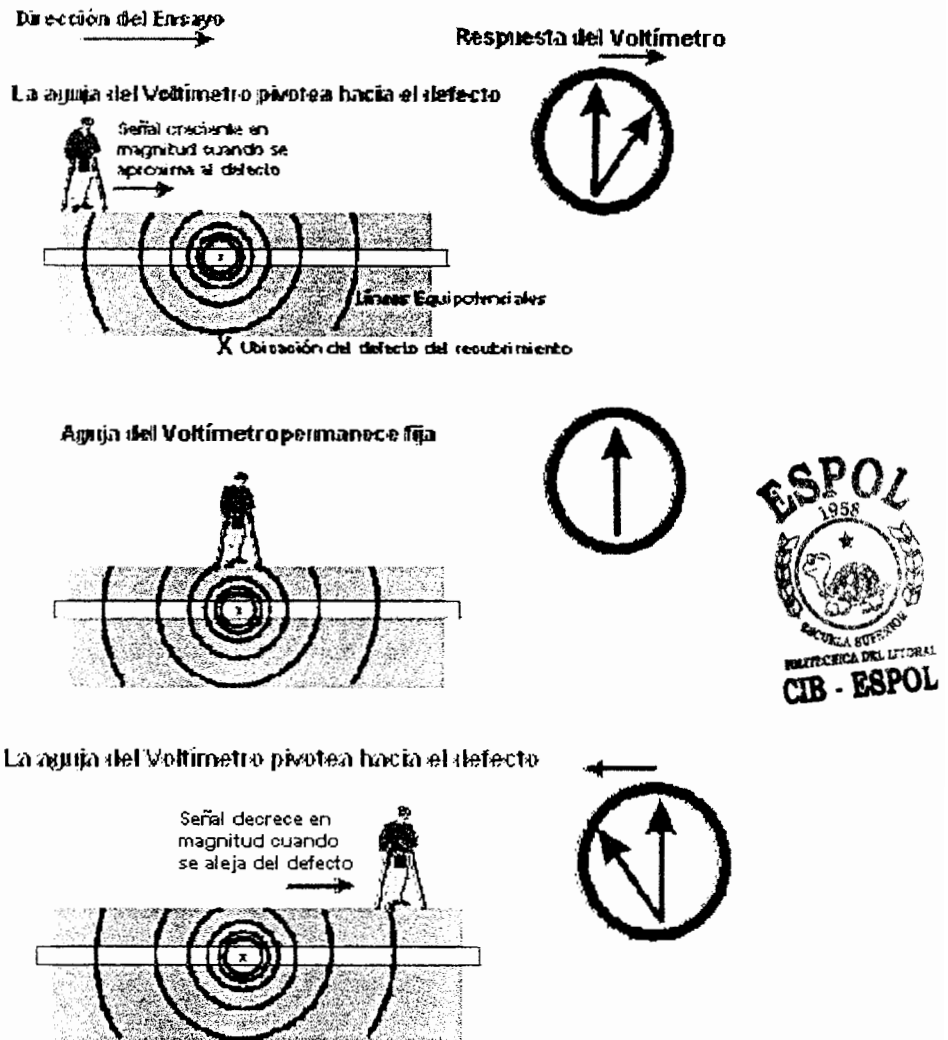
Potencial se comprueba midiendo la diferencia entre dos electrodos de referencia utilizando un mili-voltímetro diseñado específicamente. Cuando los dos electrodos se sitúan alejados 1,5 m aproximadamente en el terreno de un gradiente producido por un defecto en el revestimiento, uno de los electrodos adopta un potencial más positivo que el otro, lo que nos permite conocer la dirección del flujo de corriente y por lo tanto tener localizado el defecto. La alta sensibilidad de los instrumentos de DCVG permite la localización de hasta los más pequeños defectos con una exactitud aproximada de 10 cm.

Para simplificar la interpretación de la localización del defecto, la Protección Catódica aplicada se separa de otras influencias de CC tales como telúricos, tracciones de CC, etc., mediante un interruptor de protección Catódica ON/OFF de forma asimétrica, con ciclos comunes de interrupción "ON" de 300 ms y "OFF" de 700 ms.

En la inspección de la tubería, el operador camina siguiendo el tubo buscando un gradiente de potencial de pulsos en intervalos regulares.







**Figura 2.3.1 Detección de Defectos en Recubrimientos**

Cuando se aproxima al defecto en el revestimiento el operador observará que la aguja del mili-voltímetro empieza a responder a las pulsaciones, apuntando hacia las direcciones del flujo de corriente dirigidas hacia el defecto. Cuando sobrepasamos el defecto, la dirección de la aguja cambia completamente en sentido contrario y disminuye en intensidad al alejarnos de la zona del defecto.

Siguiendo al defecto puede encontrarse una posición de los electrodos donde la aguja no muestra ninguna oscilación en ninguna de las direcciones (movimiento nulo). En ese momento el defecto está situado en el medio de los dos electrodos. Este proceso se repite en ángulos hacia la derecha desde el primer momento de la observación, y el punto donde se cruzan las posiciones es el epicentro del gradiente de voltaje. Este punto se encuentra normalmente justo encima del defecto del revestimiento.

Una vez localizado el defecto se determina su importancia considerando los siguientes cuatro parámetros:

**1. Tamaño del defecto.-** El tamaño del defecto se determina midiendo la diferencia de potencial entre el epicentro del defecto y la tierra remota. Este valor se expresa como una fracción del cambio de potencial de la cañería (el aumento de potencial debido a la aplicación de protección catódica) para calcular un porcentaje denominado %IR.

El %IR puede ser estimado relacionando la señal de voltaje a la tierra remota ( $\tau_1$ ) con respecto al registrado con los dos postes de prueba más cercanos ( $\tau_2, \tau_3$ ). La distancia del defecto a estos dos

postes de prueba ( $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ) son también relacionados, obteniendo de esta manera lo siguiente,

$$\%IR = \frac{\tau_1}{\tau_2 - \left( \frac{\phi_1}{\phi_1 + \phi_2} \right) * (\tau_2 - \tau_3)}$$



Los defectos son designados de acuerdo a las siguientes categorías, según sus respectivos valores de %IR.

#### *Categoría 1: (51-100%IR)*

Los defectos de la Categoría 1 se consideran críticos y se recomienda su reparación a corto plazo. El tamaño del área del acero expuesto al medio (tierra, electrolito) impide el buen funcionamiento de la protección catódica aumentando así el riesgo de corrosión. El inevitable consumo de corriente relacionado con estos defectos también impide la protección adecuada en zonas más remotas de los puntos de suministro de protección catódica.

#### *Categoría 2: (36-50%IR)*

Los defectos de la Categoría 2 se recomiendan para reparación a mediano plazo como parte de un programa progresivo de reparación. Aunque de momento estén adecuadamente protegidos, estos defectos son sensibles a variaciones en la eficiencia de los sistemas

de protección catódica y en el futuro la protección podría resultar insuficiente.



*Categoría 3: (16-35%IR)*

Los defectos de la Categoría 3 se recomiendan para reparación a largo/mediano plazo según los criterios del operador de los ductos.

*Categoría 4: (0-15%IR)*

Los defectos de esta Categoría no se consideran importantes. No se recomienda reparación dado que con un sistema de protección catódica bien mantenido los defectos quedarían bien protegidos a largo plazo.

Las cuatro categorías de %IR son empíricas y se basan en la inspección y subsiguiente excavación de miles de defectos de revestimiento encontrados.

**2. Forma del defecto.-** Operadores experimentados en el sistema de DCVG pueden determinar la longitud de los defectos de revestimiento mediante el examen de los gradientes de potencial alrededor del defecto. Estos datos proveen información crítica en



cuanto a la longitud de la excavación y cantidad de materiales necesarios para efectuar las reparaciones.

**3. Estado de corrosión del defecto.-** El DCVG puede proporcionar en algunas circunstancias información adicional acerca del estado de corrosión de cada defecto. Se mencionó anteriormente que la técnica es capaz de determinar la dirección del flujo de corriente por la tierra que cubre los ductos. Dado que la corrosión resulta en el flujo de corriente desde los defectos y la protección catódica resulta el flujo hacia los defectos, es posible determinar el estado corrosivo sobre la superficie del acero expuesto a la tierra (electrolito).

**4. Influencia del defecto respecto a interferencias.-** Operadores experimentados en DCVG pueden realizar estudios de interferencias de protección catódica a ductos propios así como también de ductos ajenos. Interferencias a ductos ajenos registrarán señales de DCVG anódicas en esos ductos (una reducción de potencial debido a la aplicación de protección catódica). Interferencias de tuberías ajenas serán localizados como defectos anódicos en la tubería propia y se registrarán señales de DCVG catódicas en las tuberías ajenas.

## Ventajas del Sistema

El método DCVG suministra información detallada, tales como:

- Localización de defectos en centímetros.
- Determinación del tamaño y la importancia del defecto, para dar prioridad a su reparación.
- Determinación de las características del defecto por corrosión.
- Identifica de donde reciben la Protección Catódica esos defectos.
- Identifica las interferencias de C.C. de trenes, tranvías u otros sistemas de Protección Catódica.
- Comprueba el aislamiento de las juntas aislantes, cajas de aislamiento de cruces, ánodos de sacrificio, etc.
- Análisis de las condiciones de la tubería.
- Análisis del tamaño del defecto.
- Distribución de los defectos.



Una de las mayores ventajas de este método es que emplea el sistema de PC instalado, siempre que ello sea posible y por lo tanto los resultados reflejan la interacción entre el deterioro del revestimiento protector y la eficacia de la PC en fallos individuales del revestimiento. Esta información es muy valiosa en los métodos de lucha contra la Corrosión. La información detallada dada por la

tecnología DCVG, cuando se analiza conjuntamente con otra información tal como la resistividad del terreno, pH, etc., permite prever los requerimientos de rehabilitación de la tubería, dando prioridad a las reparaciones de la forma más eficaz y económica.

No obstante aunque la inspección DCVG puede localizar defectos y discontinuidades en el recubrimiento de la tubería no es una medida de la efectividad del SPC. Un operador prudente de la línea siempre se asegurará de que ella tenga un adecuado nivel de PC y podrá usar la técnica DCVG para mejorar este nivel, mas esta no es un sustituto de la inspección de potenciales a intervalos.

Entre las principales aplicaciones de la técnica se pueden mencionar ampliamente las siguientes:

- Dar prioridad a la reparación del revestimiento o sistema de PC.
- Verificación de la Garantía del revestimiento de la tubería.
- Solución a problemas con la Protección Catódica.
- Comprobaciones de continuidad eléctrica y ensayos de interferencias.
- Paso de tuberías por debajo de ríos y estuarios.
- Dificultades de verificación en el terreno.

- Supervisión de zonas que serían imposibles mediante otras técnicas tales como calles en ciudades, plantas de procesos, tanques, etc.
- Tuberías múltiples pueden ser supervisadas a la vez siempre que estén unidas eléctricamente.



## 2.4 Mapeo de Corriente en Tubería

### Generalidades

Conocida como la Técnica PCM por sus siglas en inglés (Pipeline Current Mapper), es una técnica de evaluación del estado de recubrimiento en tuberías metálicas enterradas.

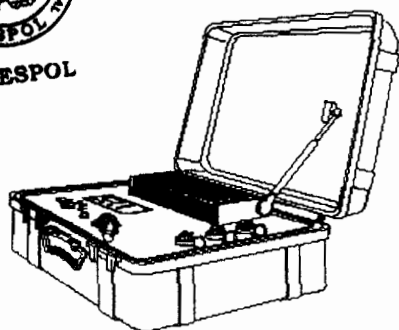
Un mapeo de corrientes se hace fundamentalmente con dos propósitos. El primero se encuentra dirigido al diseño del SPC, ya que permite recabar información acerca de la distribución de corrientes aplicadas a una tubería enterrada, determinar contactos con otras estructuras enterradas y principalmente detectar sectores con problemas de recubrimiento, determinando los requerimientos reales de protección de la estructura. El segundo propósito se dirige a verificar en cualquier momento si se está cumpliendo con lo diseñado en sistemas ya existentes, si no es así entonces detectar la



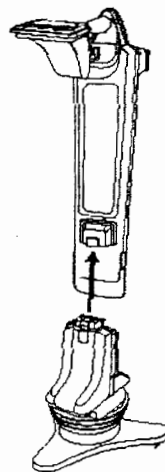
causa o la razón del problema en el SPC para con esto tomar las decisiones correctivas necesarias evaluando el costo beneficio.

El equipo requerido para el desarrollo de esta técnica es el siguiente, ver Anexo C:

- Fuente portátil de corriente.
- Receptor portátil PCM, incluye un magnetómetro, datalogger y un programa especialmente diseñado para su aplicación.
- Equipo Marco A.
- GPS diferencial.



(a)



(b)



**Figura 2.4.1** Equipo para Mapeo de Corriente en Tubería

(a) Equipo Transmisor; (b) Equipo Receptor

El sistema transmisor es capaz de imprimir una señal de corriente muy cercana a la CC (baja frecuencia), lo cual permite eliminar el error causado por el efecto capacitivo y lograr un alcance de hasta 30 Km. De señal. La unidad receptora es usada para localizar la tubería, incluso en áreas altamente congestionadas, además proveen una medida de la magnitud y la dirección de la señal de corriente aplicada por el transmisor.

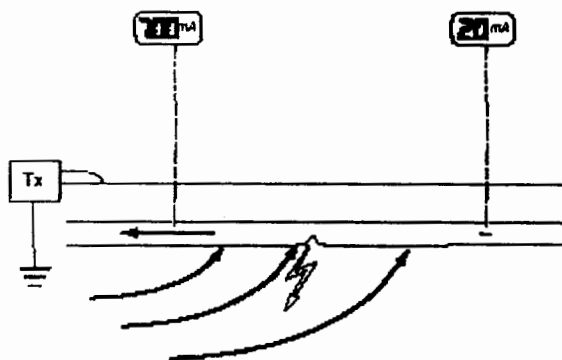
### **Principios de la Técnica**

Se fundamenta en imprimir una corriente alterna conocida de baja frecuencia, 4Hz, a un tubo (conductor con aislamiento eléctrico) que se encuentra inmerso en un medio, como la tierra, agua, concreto; esta corriente tenderá a fugarse por la porosidad del aislante en cuyo caso sería la pérdida normal de corriente contra distancia si el recubrimiento se encuentra en buenas condiciones.

La tasa normal de fuga de la corriente que viaja por el tubo al medio se verá afectada por las fallas que presente el recubrimiento. Siendo así, si el recubrimiento presenta fallas como: fallas locales, peladuras, contactos directos con otros tubos, derivaciones o falla generalizada del recubrimiento, la pendiente o velocidad de fuga de



corriente varía directamente proporcional al daño. La figura 2.4.2 ilustra la caída de corriente por un daño en el recubrimiento.

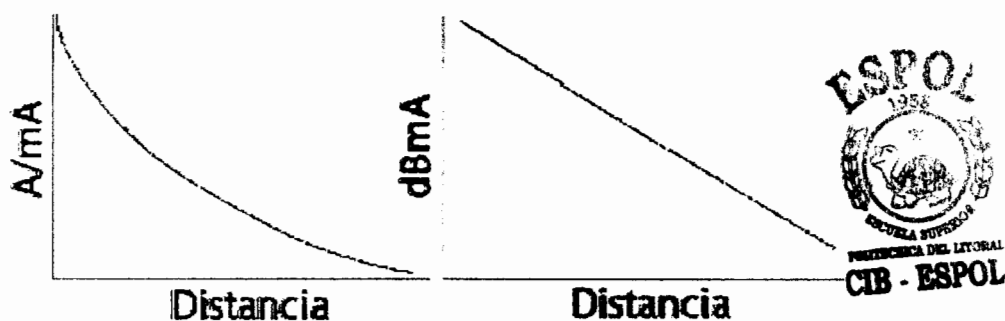


**Figura 2.4.2 Caída de Corriente por Defecto del Recubrimiento**

Para detectar estos cambios de corriente y medirlos, la Técnica de PCM utiliza un magnetómetro que mide la magnitud del campo magnético inherente a la corriente que esté pasando por el tubo, además de determinar la dirección y profundidad a la que se encuentra la estructura y el sentido de la corriente que viaja por él. Cuando una falla es encontrada la corriente rápidamente cae; una falla podría ser un daño en el recubrimiento, un contacto eléctrico con otra estructura, etc.

El receptor PCM puede presentar la corriente como A/mA o dBmA. El gráfico resultante usando A/mA tendrá una pendiente exponencial, esto se debe a que hay una mayor tasa de pérdida de corriente

cerca al transmisor. Convirtiendo el resultado exponencial de mA a logarítmico de dBmA el mismo gráfico mostrado presentará una pendiente de línea recta, figura 2.4.3.



**Figura 2.4.3 Caída de Corriente vs Distancia de la Tubería**

Si se toman varias medidas en un tramo determinado, se puede caracterizar el estado del recubrimiento en ese intervalo determinado si se trata de un daño generalizado o una falla puntual en el recubrimiento. Esta característica también permite determinar si el cambio de pendiente es a causa de una derivación o un contacto con una tubería enterrada que cruza.

Después de obtener los resultados de pérdida de corriente, se decide cual sección de la tubería requiere hacer un ensayo para encontrar las fallas. Para esto se utiliza el Marco A, que es un accesorio con un par de púas que deben estar en contacto con el suelo para realizar las lecturas en dB microvoltaje en el sector donde

se halle un defecto. Cuando el Marco A está conectado al PCM el magnetómetro no puede censar lecturas de corriente.

Se realizan lecturas a los largo y sobre la tubería, se reptarán lecturas de dB microvoltios y se localizará la falla donde se registre el valor más bajo de lectura junto con el cambio de dirección de la flecha indicadora en la pantalla, esto confirmará que la falla está directamente bajo el centro del Marco A. Luego gire el Marco A a 90° respecto a la tubería de modo que atraviese la tubería y repita la etapa previa. Esto permitirá localizar exactamente el punto de falla tanto en la abscisa de la tubería como en su perímetro.

### **Ventajas del Sistema PCM**

Las evaluaciones hechas con esta técnica, además de ser muy certeras generan archivos en hojas electrónicas como información de registros para poder evaluar posteriormente si la protección catódica esta realmente cumpliendo con su objetivo de protección, adicionalmente permite disminuir los costos para futuras inspecciones de recubrimiento.

Entre las aplicaciones típicas del PCM tenemos las siguientes:



- Evaluar el revestimiento de tuberías para definir requerimientos de rehabilitación.
- Detectar contactos y puentes eléctricos con otros servicios metálicos enterrados.
- Definir debilitamientos en el sistema de Protección Catódica.
- Validar que una tubería se ha construido con mínimos defectos de revestimiento, con la finalidad de certificación de licencias de operatividad.
- Investigar efectos de interferencias con otras fuentes de corriente continua y corrientes inducidas de alterna.
- Establecer la efectividad de juntas dieléctricas y otros métodos de aislamiento de tuberías.
- Evaluar e investigar redes complejas de tuberías, lo que no es posible con otras técnicas.
- Evaluar por debajo de hormigón, asfalto en zonas urbanas o lugares inundados.
- Evaluar e investigar por debajo de líneas aéreas de Alta Tensión.
- Técnica no afectada por corrientes telúricas, por lo que es posible investigar tuberías afectadas.
- Evaluar la integridad de las conexiones en los postes de Tomas de Potencial.

- Evaluar la integridad de los cables de conexión en las camas anódicas y el drenaje de corriente de los ánodos enterrados en la misma.
- Detectar derivaciones metálicas de la tubería matriz.
- Localizar con precisión la tubería y hacer el perfil de profundidad de la misma.



## 2.5 Uso del Sistema de Posicionamiento Global

### Generalidades

El sistema GPS (Global Positioning System) es un sistema de posicionamiento que permite, a través de 24 satélites en órbitas alrededor de la tierra, localizar mediante unas coordenadas únicas cualquier equipo radioreceptor terrestre.

El sistema GPS está constituido por tres sectores fundamentales: el espacial, el de control y el de usuario.

**Sector Espacial.-** El sector espacial está constituido por la constelación de 24 satélites NAVSTAR (NAVigation Satellite Timing And Ranning). La constelación GPS consta de 6 órbitas, prácticamente circulares, con inclinación de 55 grados y

uniformemente distribuidas en el plano del Ecuador. Hay 4 satélites por órbita, uniformemente distribuidos y con altitud de 20180 Km.

**Sector de Control.-** Lo constituyen las cinco estaciones oficiales de seguimiento de la constelación NAVSTAR. Para la elección de la ubicación de las cinco estaciones oficiales de seguimiento se buscó que estén regularmente espaciadas en longitud. La estación central se encuentra en Colorado Spring, exactamente en la base de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos. Las otras cuatro estaciones oficiales se denominan estaciones monitoras y están situadas en:

- La isla de Ascencio (Atlántico Sur).
- La isla de Diego García (Océano Índico).
- En Kwajalein (Pacífico Occidental).
- En Hawai (Pacífico Oriental).



**Sector de Usuario.-** Está compuesto por todos los instrumentos que se emplean para el cálculo, mediante el empleo de las señales provenientes de los satélites NAVSTAR, de las coordenadas de un punto, adquirir el tiempo de oscilador atómico o para navegación. El equipo propio del sector de usuario está formado por un *receptor* y una *antena*.



### Funcionamiento del sistema

Una característica importante de los 24 satélites NAVSTAR es que poseen un reloj atómico de extrema precisión. Los satélites emiten ondas en dos frecuencias:  $L1=1575,42$  Mhz y  $L2=1227,60$  Mhz. A su vez las ondas estan moduladas con un código binario. Esta misma onda codificada es generada internamente en los receptores.

Para determinar su posición (latitud, longitud y altura) al receptor GPS le bastaría calcular la intersección de tres esferas cuyos centros son la posición de cada uno de los satélites observados y cuyos radios son las distancias entre receptor y satélite. Por tal motivo todo el sistema de posicionamiento se basa en la medición de distancias entre receptor y satélite.

La distancia individual a un satélite es determinada en función del *tiempo (1)* que tarda en viajar la onda desde el satélite al receptor y la *velocidad (2)* de propagación de dicha onda. Recordar  $\text{Distancia} = \text{tiempo} \times \text{velocidad}$ .

**(1)** El receptor calcula el tiempo midiendo el retraso entre el código que genera y el recibido desde el satélite. El tiempo así calculado

solo tendrá validez si la onda es generada en el satélite y en el receptor en forma simultánea. Esto no es así debido a que el receptor no posee un reloj atómico. Existe por lo tanto un error de tiempo y por ende de distancia.

Este problema se soluciona sincronizando relojes de receptor y satélites. Dicha sincronización se logra gracias a la medición simultánea de cuatro ó más satélites, lo cual permite calcular el error de reloj del receptor, ya que deberá ser un valor tal que las distancias calculadas a partir de dicho valor generen cuatro ó más esferas que se intercepten en un solo punto.

(2) La velocidad de propagación de la onda es la velocidad de la luz (300000km/s)

Además de la técnica ya explicada, existe una segunda forma de medir distancias entre receptor y satélite. Consiste en aprovechar una propiedad física de la onda. A diferencia de la metodología anterior, en donde lo que se medía era el corrimiento entre código recibido y código emitido, ahora lo que se mide es el corrimiento de fase entre la onda generada por el receptor y la onda recibida de cada uno de los satélites. Se entiende que el corrimiento de fase se

mide una vez sincronizados los relojes de receptor y satélite. Si a ese valor de corrimiento de fase le sumamos el número entero de ciclos de onda que existen entre satélite y receptor obtendremos la distancia al satélite con un error que puede ser inferior a un cm. El número entero de ciclos no es un dato conocido (por eso se lo llama ambigüedad) y la forma de calcularlo es mediante diferenciaciones usando al menos dos receptores que estén captando los mismos satélites simultáneamente.



### **Técnicas y Precisiones**

Existen tres tipos de técnicas, que debido a sus diferencias operacionales generan diferentes precisiones al momento de la entrega de resultados.

***Posicionamiento Autónomo.*** El posicionamiento autónomo (con un solo receptor) tiene una precisión que oscila entre los 10 y los 30 m. Los receptores autónomos son de bajo costo y muy utilizados en la navegación deportiva.

***Corrección diferencial.*** También conocido como GPS submétrico. Esta técnica permite obtener las coordenadas de un punto por

debajo de los 3 metros en planimetría y menor precisión en altimetría, mejorando ambas de acuerdo al tipo de receptor utilizado.

El método se basa en la corrección de todas las posiciones tomadas (calculadas con un receptor fijo en un punto conocido), que luego son aplicadas a un receptor itinerante.

La corrección diferencial es un método que, por su precisión, tiene escasa utilidad en mediciones altimétricas, pero es muy solicitado en trabajos que requieren gran precisión bidimensional como lo son los estudios DCVG y PCM.

**Receptores Geodésicos.** Los receptores geodésicos son equipos de alta complejidad, que permiten obtener precisiones que van del rango de los 3 cm a unos pocos mm tanto en planimetría como en altimetría. La distancia a los satélites, a diferencia de los demás métodos, es calculada en función de la fase de la onda portadora que envían los satélites.

#### **Ventajas con los métodos tradicionales**

Ciertamente la medición con GPS tiene algunas ventajas sobre otras técnicas tradicionales.



- No tiene requerimientos de contacto visual entre la estación base y el receptor itinerante. Hasta el apareamiento del GPS, la intervisibilidad era un gran factor limitante en cualquier práctica de medición.
- Permite realizar mediciones dinámicas (por ejemplo con un vehículo en movimiento).
- Cada punto relevado es una medición independiente, por lo tanto no existe arrastre de errores.
- El GPS puede utilizarse *prácticamente* bajo cualquier condición climática.

Este último punto nos lleva a sus condiciones limitantes. Las frecuencias a las que trabaja el GPS L1 y L2 generan respectivamente longitudes de onda de 19 y 24.4 centímetros. Debido a las propiedades físicas de las ondas estas no puede atravesar un agujero si éste es del mismo orden de magnitud o menor que su longitud de onda. Por lo tanto los espacios donde vayan a ser utilizados estos dispositivos deberán presentar espacios mayores a sus longitudes de onda.



## CAPÍTULO 3

### 3. ENSAYO DE POTENCIALES ON - OFF EN LÍNEA DE CRUDOS PESADOS

#### 3.1 Consideraciones Preliminares

##### Antecedentes

Las características de la línea inspeccionada y de la protección catódica aplicada se las muestra en la Tabla I.

TABLA I

CARACTERÍSTICAS DE LA LÍNEA EN ESTUDIO

<i>ESPECIFICACIONES</i>	<i>DETALLES</i>
<i>Tipo de línea</i>	Despacho
<i>Diámetro</i>	24 plg.
<i>Longitud</i>	136 Km.
<i>Recubrimiento</i>	FBE
<i>Año de construcción</i>	2002
<i>Protección catódica aplicada</i>	Corrientes Impresas
<i>Tipos de ánodos</i>	MMO
<i>Tipo de lecho</i>	Remoto
<i>Número de lechos</i>	Dos
<i>Tipo de Rectificador</i>	Enfriado por Aire
<i>Número de Rectificadores</i>	Dos
<i>Distancia entre Estaciones de Prueba</i>	2 Km.

Es pertinente para nuestro estudio conocer el perfil de resistividades sobre el cual se asienta la línea, ya que apoyados en estos valores se pueden explicar comportamientos y aceptar o no estados de polarización en ciertos sectores por debajo de lo normalmente recomendado. Para esto fue necesario realizar paralelo a las mediciones de potenciales, el levantamiento del perfil de resistividades, el cual es presentado en la figura 3.1.1.



**Figura 3.1.1 Medición de Resistividades Paralelo a la Tubería**

En la gráfica se muestran los valores de resistividad a 1,5 y 3 m. de profundidad así como su promedio. La relación entre la resistividad indicada con el nivel de agresividad del suelo se lo obtiene en el Anexo D.



RESISTIVIDADES ELÉCTRICAS A LO LARGO DE LÍNEA EPF-OCP

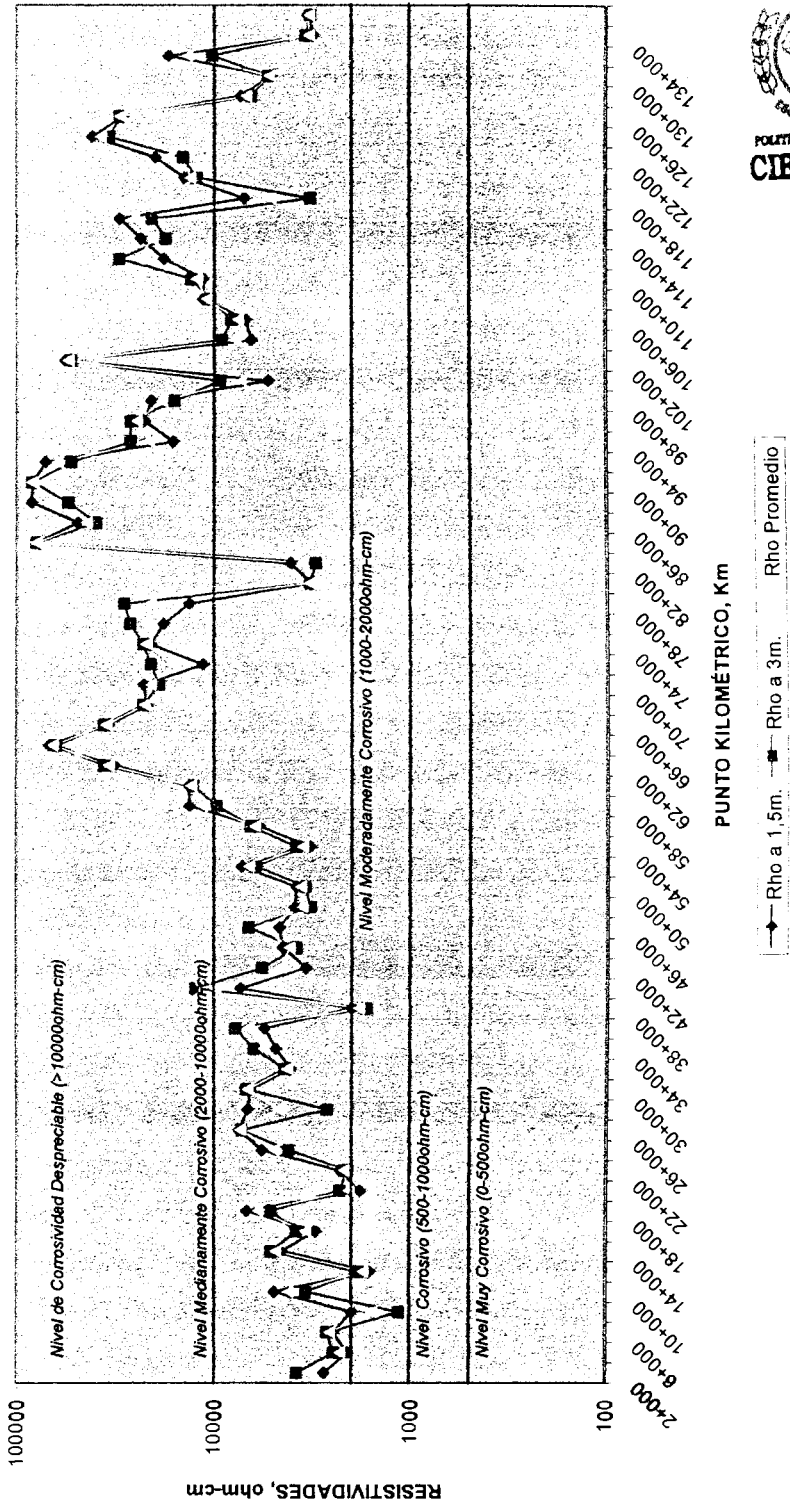


Figura 3.1.2 Resistividades a lo Largo del Derecho de Vía de la Línea



### **Selección del Método a Aplicar**

El método de inspección a usar se selecciona contraponiendo los dos principales criterios para una industria, los cuales son economía y calidad técnica de los resultados a obtener.

Considerando la importante premisa de que la línea es relativamente nueva es muy poco probable de que el revestimiento pueda estar deteriorado y con esto de que existan sectores donde los potenciales de protección puedan estar bajos. Por lo tanto, la información obtenida de un estudio de potenciales en estaciones de prueba sería suficiente para desarrollar un perfil del estado del sistema contra la corrosión de la tubería (protección catódica y recubrimiento), por lo que no justificaría el empleo de un método más complejo como lo es el de un paso a paso.

Es así que se decide realizar un Ensayo de Potenciales On-Off con asistencia satelital o también llamado Estudio en Estaciones de Prueba. Esta selección ofrece conocer el nivel de protección catódica de la tubería con un aceptable nivel de confiabilidad así como de manera general el estado del recubrimiento de la tubería, todo esto a un costo razonable para la operadora de la línea.

Al decir “*acceptable nivel de confiabilidad*” se refiere a que el estudio en estaciones de prueba no ofrece conocer los potenciales de protección en toda la tubería, sino que se limita dependiendo del estado del recubrimiento a un sector **relativamente cercano** a la estación de prueba, realizando de esta manera un muestreo de potenciales a lo largo de la tubería.

En cuanto a las conclusiones que se podrían obtener del estado del recubrimiento, se limitan a decir si se encuentra o no en buenas condiciones. De no estarlo, este método no proporciona información cuantitativa de la magnitud del daño ni de su ubicación, pero sería un buen indicativo para poder recomendar la **realización de un estudio especializado** del estado del recubrimiento, como aquellos métodos analizados en este trabajo.



### **Alcance del Estudio**

Se realizarán mediciones de potenciales On-Off respecto a un electrodo de referencia de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ , logrando el estado Off mediante el uso sincronizado de dos interruptores de corriente con GPS, uno para cada rectificador.

Las lecturas se realizarán en 68 estaciones de prueba ubicadas a lo largo de la tubería a una distancia de 2 Km entre estación y estación. Se registrarán las lecturas de CC y voltaje continuo de salida de los dos rectificadores ubicados el primero al inicio de la tubería y el segundo aproximadamente en la parte media de la misma. En el recorrido de la tubería se producen tres cruces con otras líneas, donde por cada cruce se encuentra una estación de prueba para monitorear la posible presencia de corrientes de interferencia entre los sistemas catódicos de cada línea.

En el Anexo E se encuentra el detalle del cronograma seguido para el desarrollo del trabajo así como los tiempos empleados en la realización de cada tarea.

El equipo utilizado para llevar a cabo el trabajo es el siguiente:



- Multímetro, FLUKE 87
- Electrodo de Referencia Cobre Sulfato de Cobre, CSC.
- Interruptores de corriente sincronizados; Marca: Radiodetection, Modelo: Smart Interrupter, unidades de 50 A, rango de On/Off entre 0 a 100 segundos, Protección de polaridad reversa, vida de batería de 300 horas, el GPS permite sincronizar cualquier

número de interruptores remotos, también permite una programación del tiempo de operación de hasta 24 horas.

- Receptor GPS, Marca: Maguellan Modelo: Sport Track.



### Registro de datos en los Rectificadores

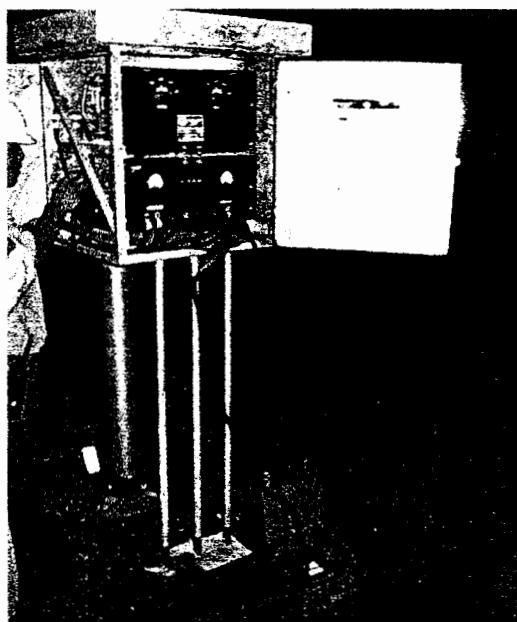
Los modelos de los dos rectificadores usados para la protección catódica de la tubería son los mismos, presentando a continuación los datos de placa, así como los valores de operación registrados al momento de la inspección:

TABLA II

DATOS DE PLACA Y CONDICIONES DE OPERACIÓN DE  
RECTIFICADORES

DATOS DE PLACA	
<b>Marca</b>	Brance-Krachy
<b>Modelo</b>	ASAI
<b>Fases</b>	1
<b>Ciclos</b>	60 Hz.
<b>Entrada de Voltaje</b>	115/230 Vac
<b>Entrada de Corriente</b>	61,7/30,9 Aac
<b>Salida de Voltaje</b>	100 Vdc
<b>Salida máxima de Corriente</b>	50 Adc
<b>Resistencia Nominal del Circuito</b>	2 ohms
CONDICIONES DE OPERACIÓN MEDIDAS R1	
<b>Voltaje de Salida</b>	3,33 Vdc
<b>Corriente de salida</b>	1,70 Adc
<b>Resistencia Real de Circuito</b>	1,96 ohm
CONDICIONES DE OPERACIÓN MEDIDAS R2	
<b>Voltaje de Salida</b>	3,16 Vdc
<b>Corriente de salida</b>	0,99 Adc
<b>Resistencia Real de Circuito</b>	3,19 ohm





**Figura 3.1.3 Conexión del Interruptor en el Rectificador**

### **3.2 Medición de Potenciales Eléctricos mediante Ensayo ON-OFF**

Los trabajos de medición fueron realizados entre el 18 y 25 de Agosto de 2 003, obteniendo los siguientes resultados:



**Figura 3.2.1 Medición de Potenciales en Estación de Prueba**

TABLA III

MEDICIÓN DE POTENCIALES ON-OFF vs CSC

ENSAYO DE POTENCIALES EN ESTACIONES DE PRUEBA (EP) ON - OFF				
No. EP	ABSCISA PK	POTENCIAL ON (-mV)	POTENCIAL OFF (-mV)	DIFERENCIA (mV)
1	2+000	1230	1107	123
2	4+000	1170	1013	157
3	6+000	1160	1032	128
4	8+000	1203	1092	111
5	10+000	1250	1170	80
6	12+000	1260	1055	205
7	14+000	1186	1062	124
8	16+000	1155	1040	115
9	18+000	1040	990	50
10	20+000	1041	978	63
11	22+000	1026	990	36
12	24+000	1052	972	80
13	26+000	1048	967	81
14	28+000	1032	988	44
15	30+000	1015	980	35
16	32+000	1024	988	36
17	34+000	1019	990	29
18	36+000	996	942	54
19	38+000	1014	987	27
20	40+000	1010	976	34
21	42+000	1038	993	45
22	44+000	951	899	52
23	46+000	926	875	51
24	48+000	1017	892	125
25	50+000	994	876	118
26	52+000	1087	983	104
27	54+000	1040	991	49
28	56+000	0	0	0
29	58+000	1023	988	35
30	60+000	980	896	84
31	62+000	923	892	31

Sigue.....



.....Continúa

TABLA III

MEDICIÓN DE POTENCIALES ON-OFF vs CSE

ENSAYO DE POTENCIALES EN ESTACIONES DE PRUEBA (EP) ON - OFF				
No. EP	ABSCISA PK	POTENCIAL ON (-mV)	POTENCIAL OFF (-mV)	DIFERENCIA (mV)
32	64+000	1092	994	98
33	66+000	1060	980	80
34	68+000	978	874	104
35	70+000	975	857	118
36	72+000	978	872	106
37	74+000	1015	996	19
38	76+000	1018	984	34
39	78+000	1056	918	138
40	80+000	1083	970	113
41	82+000	1035	987	48
42	84+000	1032	840	192
43	86+000	1028	866	162
44	88+000	1060	849	211
45	90+000	1090	1054	36
46	92+000	1102	1083	19
47	94+000	997	850	147
48	96+000	1018	957	61
49	98+000	952	851	101
50	100+000	1071	862	209
51	102+000	1043	933	110
52	104+000	995	888	107
53	106+000	1017	976	41
54	108+000	996	906	90
55	110+000	978	860	118
56	112+000	950	869	81
57	114+000	1016	973	43
58	116+000	1010	936	74
59	118+000	1006	997	9
60	120+000	1018	999	19
61	122+000	1007	990	17
62	124+000	1006	980	26
63	126+000	1014	979	35
64	128+000	1035	991	44
65	130+000	1022	970	52
66	132+000	1015	973	42
67	134+000	1095	966	129
68	136+000	1014	988	26

### 3.3 Medición de Corrientes de Interferencia en zonas de cruce con otras líneas

El método que se usó para determinar si existe o no interferencias consistió en medir los potenciales de protección en sentido perpendicular a la tubería y sobre el punto de cruce. La presencia de corrientes de interferencia se detectará al registrar valores de potencial alejados del perfil esperado y por la inestabilidad en converger a un valor fijo.

TABLA IV

#### ENSAYO PARA DETECTAR CORRIENTES DE INTERFERENCIA

ENSAYO PARA DETECCIÓN DE CORRIENTES DE INTERFERENCIA EN PUNTOS DE CRUCE (C) CON OTRAS LÍNEAS				
No. EP	ABSCISA PK	LECTURAS A DISTANC.	POTENCIAL ON (-mV)	POTENCIAL OFF (-mV)
C1	76+750	-3 m.	989	840
		-2 m.	1027	909
		-1 m.	1082	933
		0 m.	1197	976
		1 m.	1048	956
		2 m.	1021	917
		3 m.	971	933
C2	84+800	-3 m.	1000	892
		-2 m.	1031	920
		-1 m.	1043	970
		0 m.	1052	970
		1 m.	1043	965
		2 m.	1037	897
		3 m.	1015	868
C3	135+000	-3 m.	1005	866
		-2 m.	1031	944
		-1 m.	1060	943
		0 m.	1094	973
		1 m.	1046	938
		2 m.	1021	899
		3 m.	1004	898





### 3.4 Ubicación de Puntos Relevantes mediante Coordenadas GPS

En el caso de las coordenadas GPS, el objetivo es registrar todos los puntos relevantes encontrados en el recorrido de la tubería, incluyendo obstrucciones, ciudades, etc., que puedan servir como puntos de referencia para proveer de una mejor orientación al inspector y grupo de trabajo al momento de realizar una nueva inspección o cuando alguna reparación sea requerida.



ESPOL

TABLA V

#### UBICACIÓN DE PUNTOS RELEVANTES MEDIANTE COORDENADAS GPS



COORDENADAS GEOGRAFICAS GPS				
No. EP	ABSCISA PK	COORDEND. GPS	ALTITUD m.	OBSERVACIONES
PTO	---	00°29'52"S - 76°04'20"W	208	Puerto
L	0+000	00°31'46"S - 76°07'36"W	213	Lanzador de partida
TR 1	---	00°31'44"S - 76°07'45"W	224	Rectificador 1
1	2+000	00°31'28"S - 76°08'36"W	236	
2	4+000	00°30'34"S - 76°09'08"W	231	
3	6+000	00°29'48"S - 76°09'47"W	227	
OBST 1	---	00°29'49"S - 76°09'54"W	262	Obstrucción, árbol caído
4	8+000	00°29'39"S - 76°10'52"W	218	
5	10+000	00°29'03"S - 76°11'43"W	241	
6	12+000	00°28'21"S - 76°12'49"W	253	
7	14+000	00°28'15"S - 76°13'34"W	282	
8	16+000	00°27'38"S - 76°14'20"W	217	
9	18+000	00°26'28"S - 76°14'36"W	229	
10	20+000	00°25'39"S - 76°15'00"W	245	
11	22+000	00°25'04"S - 76°15'54"W	221	
OBST 2	---	00°25'03"S - 76°15'58"W	242	Obstrucción, árbol caído
12	24+000	00°24'48"S - 76°16'57"W	216	
13	26+000	00°24'49"S - 76°17'59"W	241	

Sigue.....

.....Continúa



TABLA V

UBICACIÓN DE PUNTOS RELEVANTES MEDIANTE  
COORDENADAS GPS

COORDENADAS GEOGRAFICAS GPS				
No. EP	ABSCISA PK	COORDEND. GPS	ALTITUD m.	OBSERVACIONES
14	28+000	00°25'10"S - 76°19'00"W	226	
15	30+000	00°24'57"S - 76°20'03"W	242	
VLA 1	---	00°24'45"S - 76°20'26"W	256	Válvula 1
16	32+000	00°24'36"S - 76°21'02"W	232	
17	34+000	00°24'15"S - 76°22'03"W	284	
18	36+000	00°24'02"S - 76°23'06"W	242	
OBST 3	---	00°23'54"S - 76°23'19"W	245	Obstrucción, cruce de río
19	38+000	00°23'45"S - 76°24'04"W	242	
20	40+000	00°23'22"S - 76°25'03"W	237	
VLA 2	---	00°22'48"S - 76°25'50"W	242	Válvula 2
21	42+000	00°22'44"S - 76°25'55"W	231	
22	44+000	00°21'56"S - 76°26'58"W	238	
23	46+000	00°21'08"S - 76°27'42"W	249	
24	48+000	00°20'25"S - 76°28'28"W	243	
25	50+000	00°20'01"S - 76°29'21"W	245	
26	52+000	00°19'05"S - 76°29'52"W	239	
27	54+000	00°18'03"S - 76°30'13"W	236	
28	56+000	00°16'56"S - 76°30'11"W	241	
29	58+000	00°16'46"S - 76°31'07"W	250	
30	60+000	00°16'45"S - 76°32'12"W	250	
31	62+000	00°16'44"S - 76°33'17"W	248	
32	64+000	00°16'42"S - 76°34'21"W	249	
33	66+000	00°16'41"S - 76°35'25"W	252	
34	68+000	00°16'39"S - 76°36'30"W	255	
35	70+000	00°16'01"S - 76°37'16"W	265	
36	72+000	00°15'10"S - 76°37'59"W	414	
37	74+000	00°14'05"S - 76°38'49"W	259	
38	76+000	00°13'32"S - 76°39'01"W	258	
C 1	76+750	00°13'10"S - 76°39'06"W	263	Punto de cruce 1
39	78+000	00°12'42"S - 76°39'32"W	261	
40	80+000	00°11'46"S - 76°39'48"W	262	
TR 2	---	00°11'35"S - 76°39'20"W	266	Rectificador 2
41	82+000	00°11'25"S - 76°39'55"W	265	

Sigue.....

.....Continúa



TABLA V

UBICACIÓN DE PUNTOS RELEVANTES MEDIANTE  
COORDENADAS GPS

COORDENADAS GEOGRAFICAS GPS				
No. EP	ABSCISA PK	COORDEND. GPS	ALTITUD m.	OBSERVACIONES
42	84+000	00°11'04"S - 76°40'48"W	264	
C 2	84+800	00°10'47"S - 76°41'03"W	265	Punto de cruce 2
43	86+000	00°10'11"S - 76°41'21"W	316	
44	88+000	00°09'26"S - 76°42'03"W	287	
45	90+000	00°09'17"S - 76°42'52"W	289	
46	92+000	00°08'44"S - 76°43'47"W	271	
47	94+000	00°08'32"S - 76°44'58"W	294	
48	96+000	00°08'51"S - 76°45'48"W	300	
49	98+000	00°08'37"S - 76°47'04"W	292	
50	100+000	00°08'41"S - 76°48'05"W	291	
51	102+000	00°08'43"S - 76°49'07"W	294	
52	104+000	00°08'20"S - 76°50'05"W	291	
Pb 1	---	00°10'42"S - 76°50'08"W	293	Pueblo 1
53	106+000	00°07'22"S - 76°50'35"W	295	
54	108+000	00°06'27"S - 76°51'04"W	307	
Pb 2	---	00°08'15"S - 76°51'11"W	293	Pueblo 2
55	110+000	00°06'03"S - 76°52'23"W	309	
56	112+000	00°06'03"S - 76°52'26"W	309	
Pb 3	---	00°04'04"S - 76°52'44"W	293	Pueblo 3
57	114+000	00°04'40"S - 76°52'48"W	313	
58	116+000	00°03'28"S - 76°53'19"W	322	
VLA-3	---	00°03'40"S - 76°53'07"W	296	Válvula 3
59	118+000	00°02'45"S - 76°53'08"W	299	
60	120+000	00°01'36"S - 76°53'18"W	313	
61	122+000	00°00'36"S - 76°53'25"W	307	
62	124+000	00°00'34"N - 76°53'29"W	329	
63	126+000	00°01'23"N - 76°53'13"W	305	
64	128+000	00°02'21"N - 76°53'29"W	302	
65	130+000	00°03'06"N - 76°54'04"W	308	
66	132+000	00°03'49"N - 76°54'53"W	305	
67	134+000	00°04'58"N - 76°55'09"W	317	
C 3	---	00°04'58"N - 76°55'09"W	317	Punto de cruce 3
68	136+000	00°05'35"N - 76°55'00"W	310	
R	---	00°05'37"N - 76°55'00"W	312	Receptor de llegada

# CAPÍTULO 4



## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### **Estudio de los puntos de operación de los Rectificadores**

Con base a la información tomada en campo se observa que el sistema de protección catódica se encuentra sobredimensionado, ya que los valores registrados de voltajes y corrientes de salida en los rectificadores se encuentran muy por debajo de sus valores límite, estos no se encuentran trabajando ni al 3,5% de sus capacidades.

Esto implica que el sistema se encuentra en condiciones de asumir problemas de fugas de corrientes que se puedan presentar con el tiempo, o de proteger estructuras adicionales que puedan ser construidas, tales como ampliaciones o nuevas líneas.

El que la resistencia real de circuito sea mayor a la nominal en el rectificador 2, implica que estará limitado por voltaje, es decir que si las

demandas de corriente aumentan el rectificador no podría entregar los 50 A. de diseño sino solo 31,35 A., que es la máxima corriente que podría ofrecer con una resistencia de 3.19 ohms a su máxima capacidad que es de 100 V. Si bien es cierto que más conveniente es que la resistencia real del circuito sea menor a la nominal, esto no implica que a 100 V. el rectificador pueda entregar más de 50 A., ya que internamente tiene un fusible que por seguridad impide que se sobrepase de este valor.



### **Estudio de potenciales ON – OFF**

Ayudados de la gráfica adjunta se pueden realizar las siguientes observaciones:

- Los valores ON registrados son todos más electronegativos que el mínimo requerido (-850 mV); de igual manera esto se cumple para los valores OFF, ya que aunque se registran dos cantidades por debajo de este valor sus magnitudes son muy cercanos a -850 mV. y principalmente los valores de resistividad para ambos puntos se encuentra en el orden de Despreciable según la referencia NACE Corrosion Basics, con lo que se descarta problemas de corrosión en estas zonas. Esto es ilustrado en la figura 4.1.



POTENCIALES DE PROTECCIÓN A LO LARGO DE LA TUBERÍA

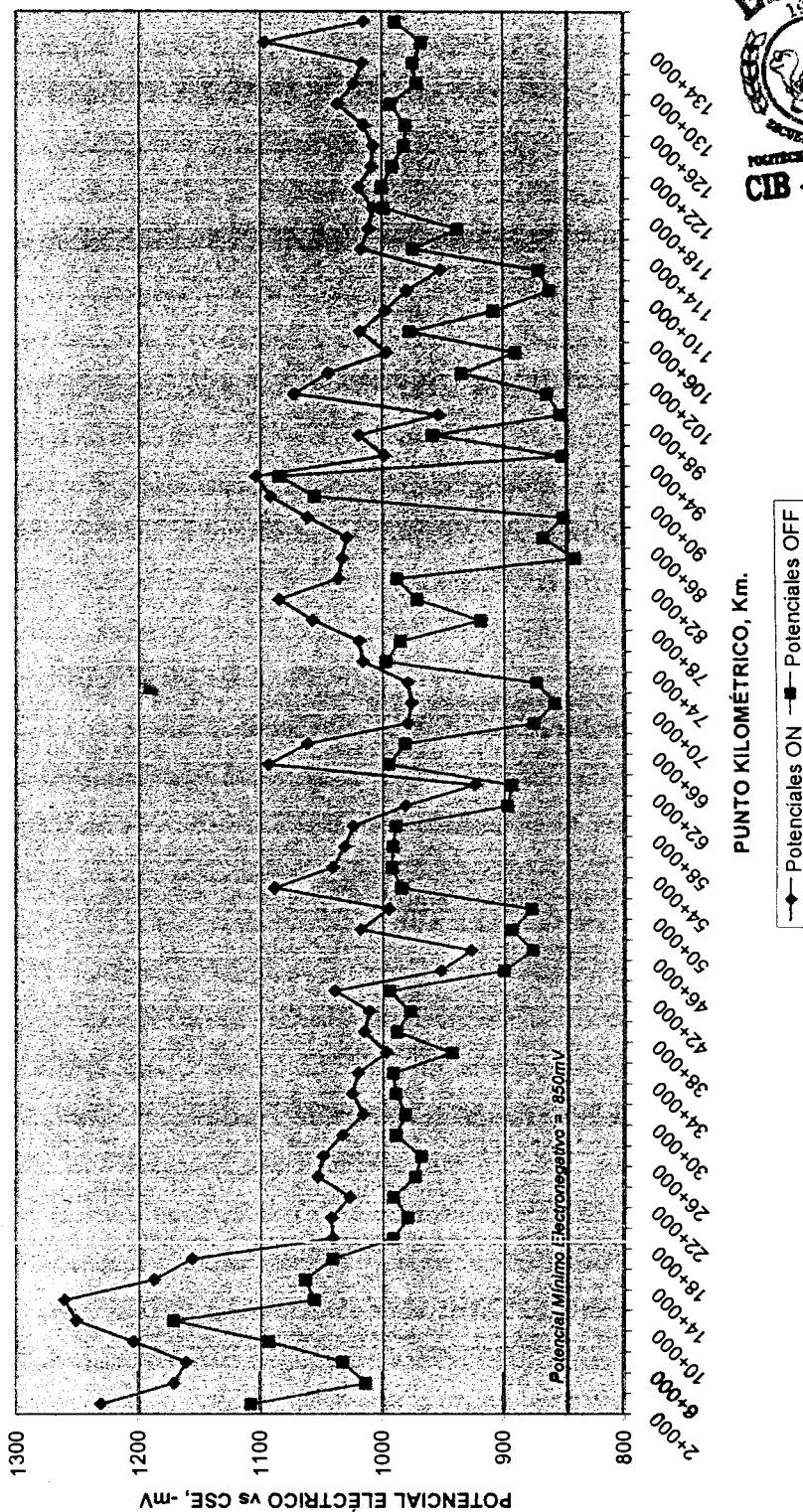
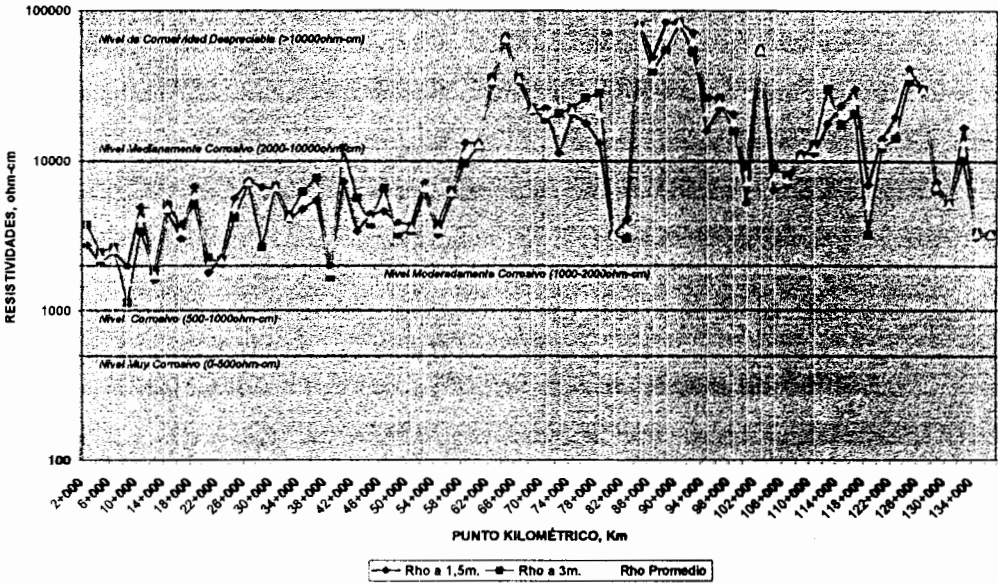
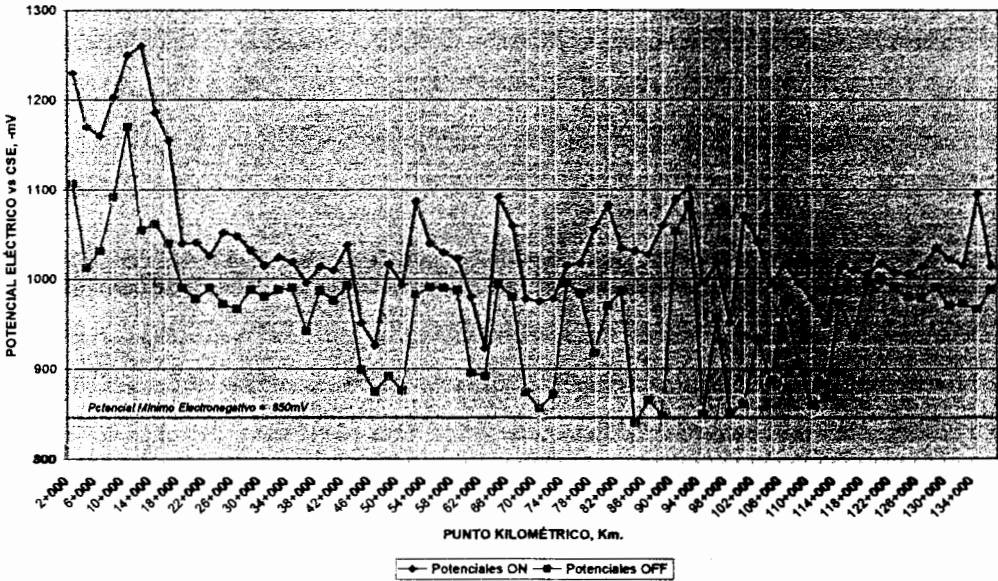


Figura 4.1 Perfil de Potenciales de Protección Catódica

- En la gráfica anterior se observa que la influencia del rectificador 1 parecería llegar solo hasta el cruce del Río Napo (Km 18+000), ya que se produce una caída en los valores de los potenciales para luego estabilizarse en valores similares a los obtenidos en sectores cercanos al rectificador 2, indicando que se estaría perdiendo continuidad eléctrica entre el rectificador 1 y el resto de la tubería.
- El 63,2% de los potenciales de polarización medidos registran un gradiente de potencial menor a los 100 mV, indicando que un porcentaje mayoritario del revestimiento se encuentra en muy buenas condiciones, a esto se suma la baja demanda de corriente requerida en el rectificador, lo que indicaría que el otro porcentaje del revestimiento se encuentra en condiciones aceptables.
- De la figura 4.2 se puede inferir una relación entre los potenciales de polarización, resistividades del suelo a lo largo de la tubería y el estado del recubrimiento. Cada línea vertical representa un punto con un gradiente de polarización mayor a 100 mV, entonces cada intersección de estas líneas verticales con suelos de altas resistividades y bajos valores de potencial polarizado off serían un indicativo de los sectores donde el revestimiento se encuentre con mayores problemas en cuanto a su eficiencia.



(a) Resistividades Eléctricas a lo Largo de la Tubería



(b) Potenciales de Protección a lo largo de la Tubería

**Figura 4.2 Identificación de Puntos con Posibles Problemas de Revestimiento**



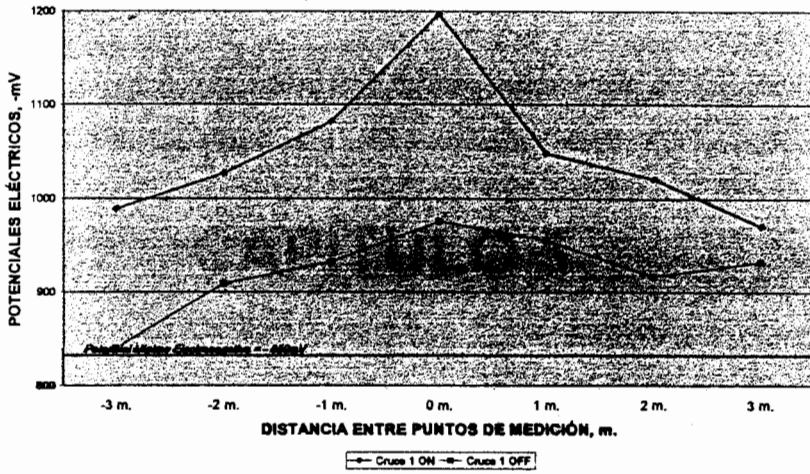
### **Estudio de Interferencias Eléctricas**

Las lecturas son realizadas perpendiculares a la tubería, colocando el eje de esta sobre el valor cero de las mediciones.

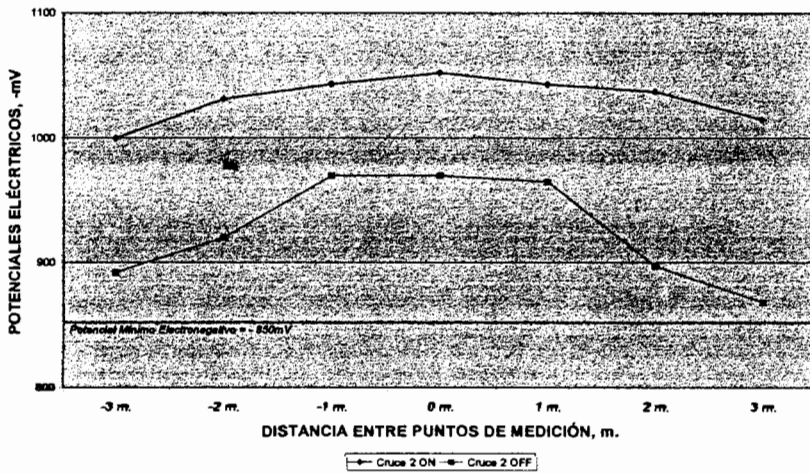
Los perfiles ON obtenidos en (a), (b) y (c) de la gráfica 4.3 son los esperados, presentándose el valor más alto sobre la abscisa cero y disminuyendo gradualmente conforme las distancias aumentan.

En lo que respecta a los valores OFF, se registraron sin presenciar evidencias de inestabilidad lo que indica que no existen corrientes de interferencias.

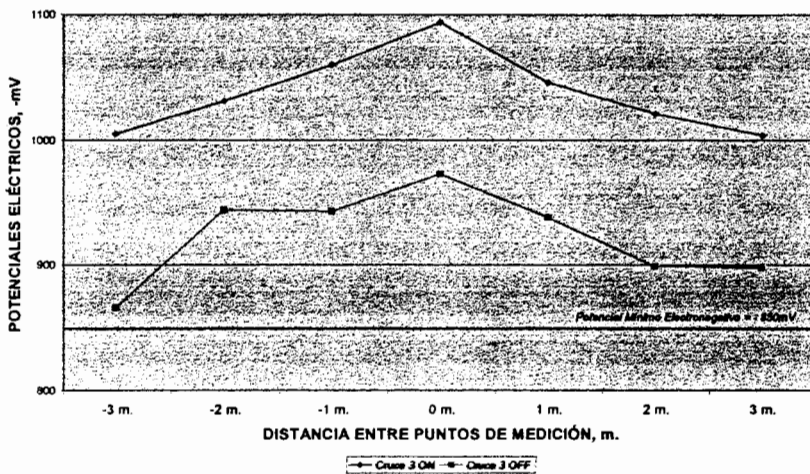




(a) Estudio de Interferencia en Punto de Cruce 1 con Otras Líneas



(b) Estudio de Interferencia en Punto de Cruce 2 con Otras Líneas



(c) Estudio de Interferencia en Punto de Cruce 3 con Otras Líneas

Figura 4.3 Análisis de Corrientes de Interferencia en Puntos de Cruce

# CAPÍTULO 5




## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

1. De acuerdo al criterio expresado en la norma NACE RP 0169-00, la tubería se encuentra protegida contra la corrosión ya que los potenciales OFF alcanzados en todas las estaciones de prueba satisfacen las condiciones de inmunidad.
2. En base a los valores de potenciales de polarización obtenidos y los puntos de operación registrados para los rectificadores se concluye que el revestimiento de la tubería se encuentra en buen estado.
3. No existe evidencia de presencia de corrientes de interferencia ya que los potenciales registrados en las zonas de cruces con otras líneas son estables.

4. El sistema de protección catódica se encuentra sobredimensionado, lo que le permitiría asumir a futuro aumentos de la demanda de corriente por deterioro de revestimiento o por aplicación de nuevas cargas a proteger.
5. Se demuestra la eficacia de la técnica con el aporte de la sincronización GPS al registrar valores de notoria convergencia ON-OFF, ya que esto no era eficazmente logrado con los métodos de sincronización anteriores que introducían errores en las lecturas obtenidas.

### Recomendaciones

1. Programar ensayos ON-OFF anualmente y solo ON cada  para contar con información estadística del comportamiento de la protección catódica en todo el recorrido de la línea, y poder estimar como varía la eficiencia del recubrimiento con el tiempo tal que se puedan realizar inspecciones e incluso reparaciones de manera programada.
2. Realizar pruebas en cada rectificador en la condición de que uno esté apagado al menos un mes y viceversa, de tal manera de que se aprecie el alcance que tenga cada uno de los rectificadores



operando individualmente. Esta prueba podría generar información valiosa de las caídas de potencial que se están dando en el cruce del río Napo.

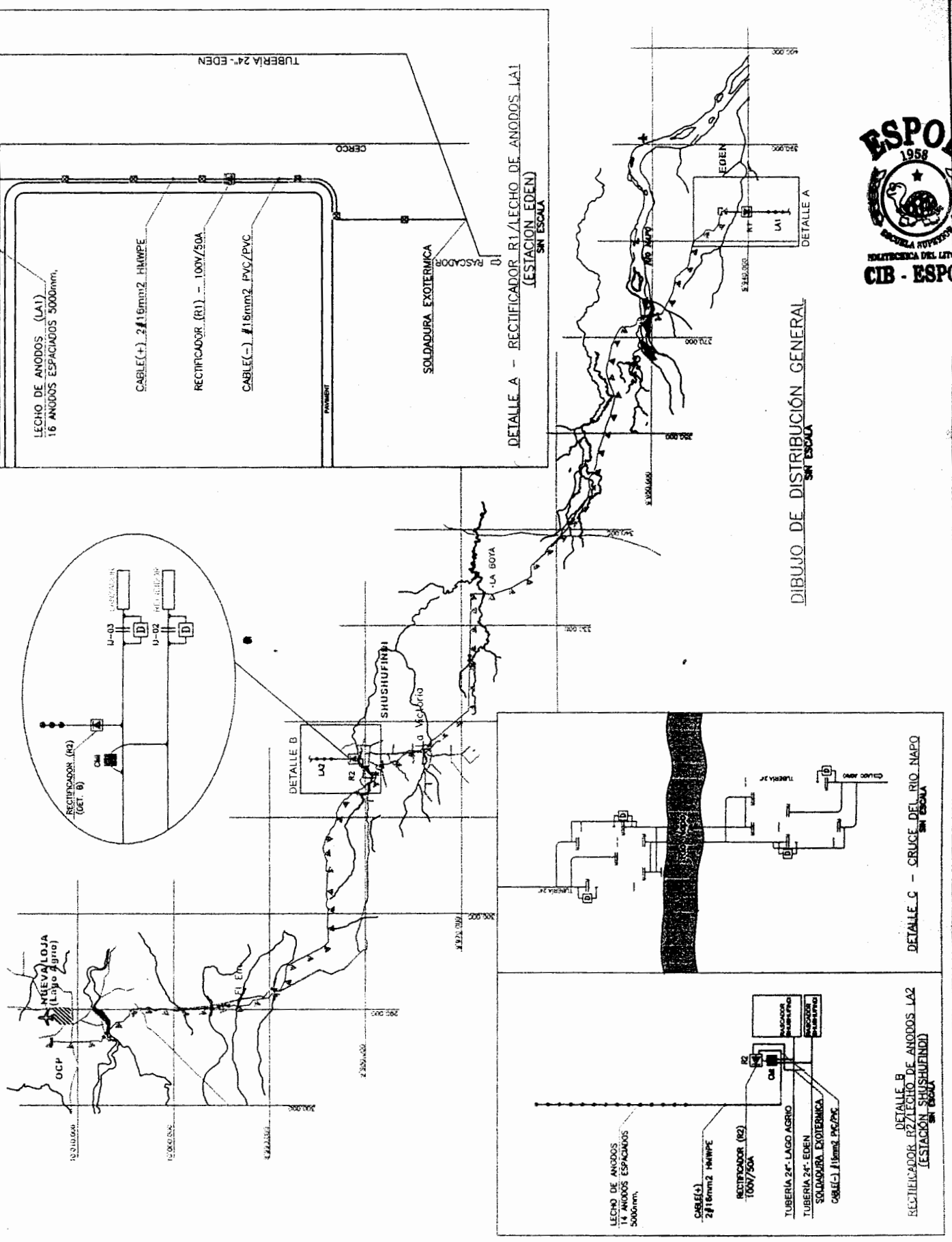
3. Con base a la información recabada, no se requiere realizar inspecciones adicionales para conocer el estado del recubrimiento de la línea. Aun cuando se presentaran problemas de recubrimiento que aumentaran las demandas de corrientes, el sistema de protección catódica es capaz de asumir esos requerimientos por la gran capacidad disponible.
4. No obstante en caso de que sea un requerimiento del cliente, el realizar una inspección de revestimientos, se recomienda limitarla a los sectores comprendidos entre las abscisas 68+000 a 72+000, 84+000 a 88+000, 94+000, 98+000 a 100+000, 104+000 y 110+000, coordenadas obtenidas de la comparación realizada entre las gráficas de resistividades, potenciales y gradientes de potenciales de polarización mayores a 100 mV.
5. Considerar las técnicas de inspección de recubrimientos aquí estudiadas como la alternativa óptima para el análisis de estos, ya que sin necesidad de realizar excavaciones pueden detectar con

gran exactitud defectos en el orden de los centímetros, conociendo que en nuestro país existen estructuras de mas de 30 años sin haber sido completamente inspeccionadas, ejemplo de ello es el SOTE.





**PLANO**



## Escuela Superior Politécnica del Litoral

Elaborado por  
Paúl Cabadiana

Aprobado por  
Ing. Julian Peña

Archivo

Fecha  
2004 - 05 - 26

Edición  
1

Escala  
S/E

**ESPOL**

Sistema de Protección Catódica

Hoja





# ANEXOS

ANEXO A

INTERRUPTOR DE CORRIENTE CON GPS SMART INTERRUPTER

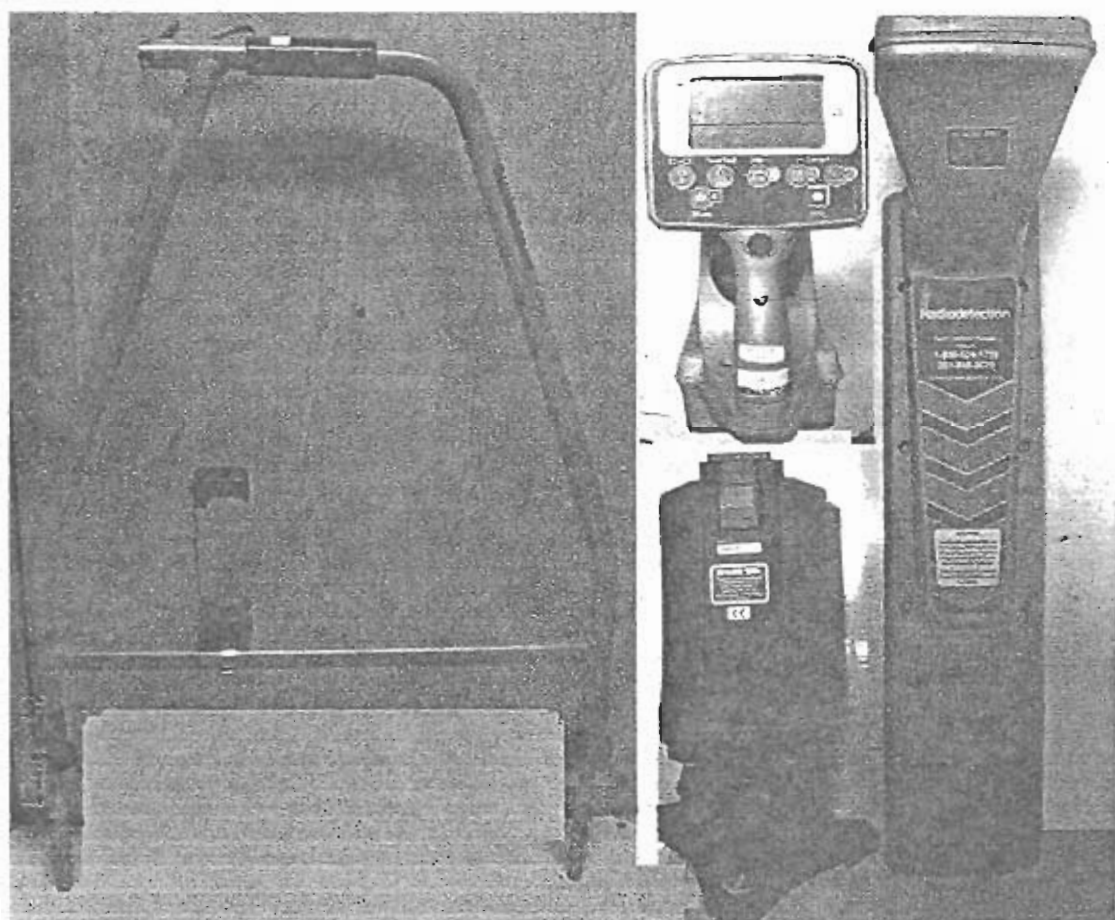


ANEXO B

EQUIPOS PARA PRUEBAS CIS Y DCVG



ANEXO C  
EQUIPO PCM





## ANEXO D

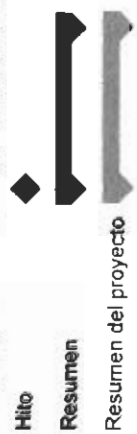
### RESISTIVIDAD DEL TERRENO VS GRADO DE CORROSIVIDAD

Resistividad del Terreno (ohm-cm)	Grado de Corrosividad
0 - 500	Muy Corrosivo
500 - 1000	Corrosivo
1000 - 2000	Moderadamente Corrosivo
2000 - 10000	Medianamente Corrosivo
Arriba de 10000	Despreciable

Referencia: *NACE Corrosion Basics*.

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES PARA MEDICIÓN DE POTENCIALES ON-OFF EN LÍNEA EDÉN YUTIRI-LAGO AGRIO

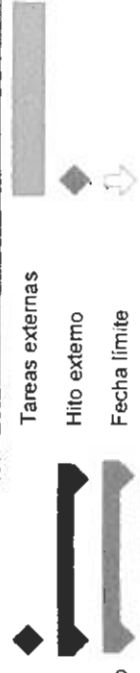
ID	Nombre de tarea	Duration	Start	Wed 13 Aug W	Thu 14 Aug T
1	<b>DIA 1</b>	0,31 days	Mon 18/8/03		
2	Inicio de actividad	0 hours	Mon 18/8/03		
3	Llegada a Rectificador Shushufindi. Registro de lecturas de corriente dc y voltaje dc de salida de transformadores Shushufindi	2 hours	Mon 18/8/03		
4	Colocación del primer interruptor en rectificador Shushufindi	0,5 hours	Mon 18/8/03		
5	Fin de la actividad día 1, 18H30	0 hours	Mon 18/8/03		
6	<b>DIA 2</b>	1,38 days	Tue 19/8/03		
7	Inicio de actividad 06H00	0 days	Tue 19/8/03		
8	<b>GRUPO 1</b>	0,6 days	Tue 19/8/03		
9	Viaje en lancha por Río Napo a Puerto Edén.	4 hours	Tue 19/8/03		
10	Registro de lecturas de corriente dc y voltaje dc de salida del rectificador Edén.	0,3 hours	Tue 19/8/03		
11	Colocación del segundo interruptor en rectificador Edén	0,5 hours	Tue 19/8/03		
12	Fin de actividad día 2, Grupo 1, 19H00	0 hours	Tue 19/8/03		
13	<b>GRUPO 2</b>	1,38 days	Tue 19/8/03		
14	Viaje hasta base OCP en Lago Agrío	2 hours	Tue 19/8/03		
15	Lectura de potencial On-Off de 1 poste ubicado un km antes de llegar a OCP sobre carretera + medición de interferencia por cruce con otras líneas	1 hour	Tue 19/8/03		
16	Lectura de potenciales On-Off desde EP68 OCP (PK=135+853) a EP58 (PK=116+000) más medición de resistividad eléctrica junto a cada poste. Total 11 EP.	8 hours	Tue 19/8/03		
17	Fin de Actividad día 2, Grupo 2, 18H00	0 hours	Tue 19/8/03		
18	<b>DIA 3</b>	1,25 days	Wed 20/8/03		
19	Inicio de actividad 06H00	0 hours	Wed 20/8/03		
20	<b>GRUPO 1</b>	1,13 days	Wed 20/8/03		
21	Viaje en lancha hasta San Roque Sur.	1 hour	Wed 20/8/03		
22	Lectura de potenciales On-Off desde EP8 Río Napo (PK=16+000) a EP1 Edén (PK=2+000) más medición de resistividad eléctrica junto a cada poste. Recorrido en campo a pie. Total 8 EP	8 hours	Wed 20/8/03		
23	Fin de actividad día 3, Grupo 1, 17H00	0 hours	Wed 20/8/03		
24	<b>GRUPO 2</b>	1,25 days	Wed 20/8/03		
25	Lectura de potenciales On-Off desde EP57 (PK=114+000) a EP46 (PK=92 +000) más medición de resistividad eléctrica junto a cada poste. Total 12 EP	10 hours	Wed 20/8/03		



Proyecto: Ensayos de Polarización  
Fecha: Thu 3/6/04

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES PARA MEDICIÓN DE POTENCIALES ON-OFF EN LÍNEA EDÉN YUTIRI-LAGO AGRIO

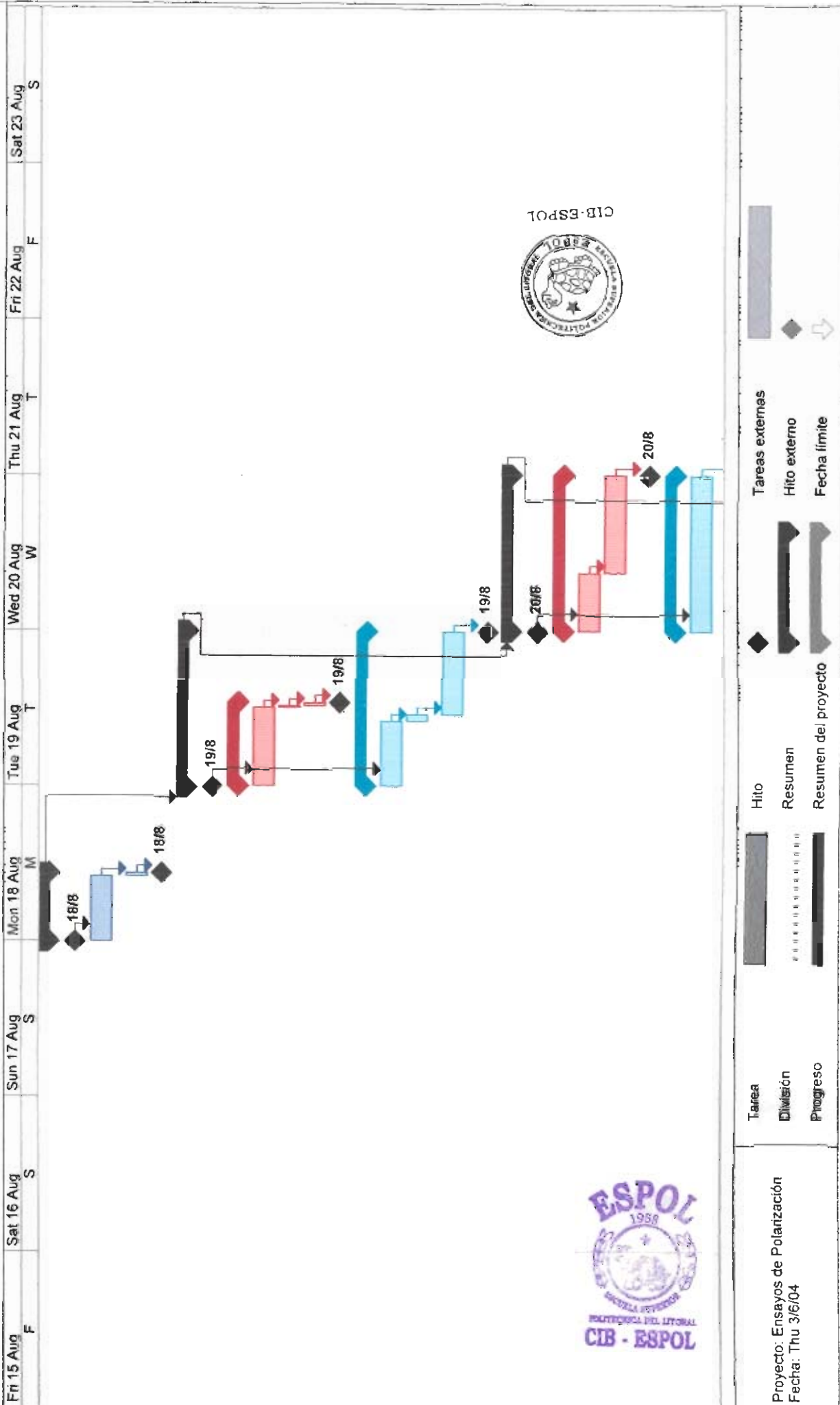
ID	Nombre de tarea	Duration	Start	Wed 13 Aug W	Thu 14 Aug T
26	Fin de Actividad día 3. Grupo 2. 18H00	0 hours	Wed 20/8/03		
27	<b>DIA 4</b>	1,31 days	Thu 21/8/03		
28	Inicio de actividad 06H00	0 hours	Thu 21/8/03		
29	<b>GRUPO 1</b>	1,19 days	Thu 21/8/03		
30	Viaje en lancha hasta San Roque Norte.	1 hour	Thu 21/8/03		
31	Lectura de potenciales On-Off desde P9 Rio Napo (PK=18+000) a P15 (PK=30+000) más medición de resistividad eléctrica junto a cada poste. - Recorrido en campo a pie. Total 7 EP. Dormida en Selva.	8 hours	Thu 21/8/03		
32	Fin de actividad día 4. Grupo 1. 18H00	0,5 hours	Thu 21/8/03		
33	<b>GRUPO 2</b>	1,31 days	Thu 21/8/03		
34	Lectura de potenciales On-Off desde EP45 (PK=90+000) a EP32 (PK=64+000) más medición de resistividad eléctrica junto a cada poste. Total 14 EP	10 hours	Thu 21/8/03		
35	Fin de Actividad día 4. Grupo 2. 18H00	0,5 hours	Thu 21/8/03		
36	<b>DIA 5</b>	1,44 days	Fri 22/8/03		
37	Inicio de actividad 06H00	0 hours	Fri 22/8/03		
38	<b>GRUPO 1</b>	0,69 days	Fri 22/8/03		
39	Lectura de potenciales On-Off desde P16 (PK=32+000) a P21 (PK=42+000) más medición de resistividad eléctrica junto a cada poste. - Recorrido en campo a pie. Total 6 EP.	5 hours	Fri 22/8/03		
40	Encuentro con Grupo 2. 12H00	0,5 hours	Fri 22/8/03		
41	<b>GRUPO 2</b>	0,56 days	Fri 22/8/03		
42	Lectura de potenciales On-Off desde EP27 (PK=54+000) a EP22 (PK=44+000) más medición de resistividad eléctrica junto a cada poste. Total 6 EP	4 hours	Fri 22/8/03		
43	Encuentro con Grupo 1. 12H00	0,5 hours	Fri 22/8/03		
44	Lectura desde EP28 (PK=56+000) a EP31 (PK=62+000) más medición de resistividad eléctrica junto a cada poste. Total 4 EP.	3 hours	Fri 22/8/03		
45	Lecturas de potencial en 2 postes cerca al campo conducto Shushufindi y cementerio después de Shushufindi. + medición de interferencia por cruce con otras líneas en cada poste.	2 hours	Fri 22/8/03		
46	Retiro de interruptores en rectificadores Edén y Shushufindi. 18H00.	1 hour	Fri 22/8/03		
47	Fin de actividad ambos grupos día 5. 18H00	0 hours	Fri 22/8/03		



**Tarea**  
**División**  
**Progreso**

Proyecto: Ensayos de Polarización  
 Fecha: Thu 3/6/04

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES PARA MEDICIÓN DE POTENCIALES ON-OFF EN LÍNEA EDÉN YUTIRI-LAGO AGRIO



CIB-ESPOL

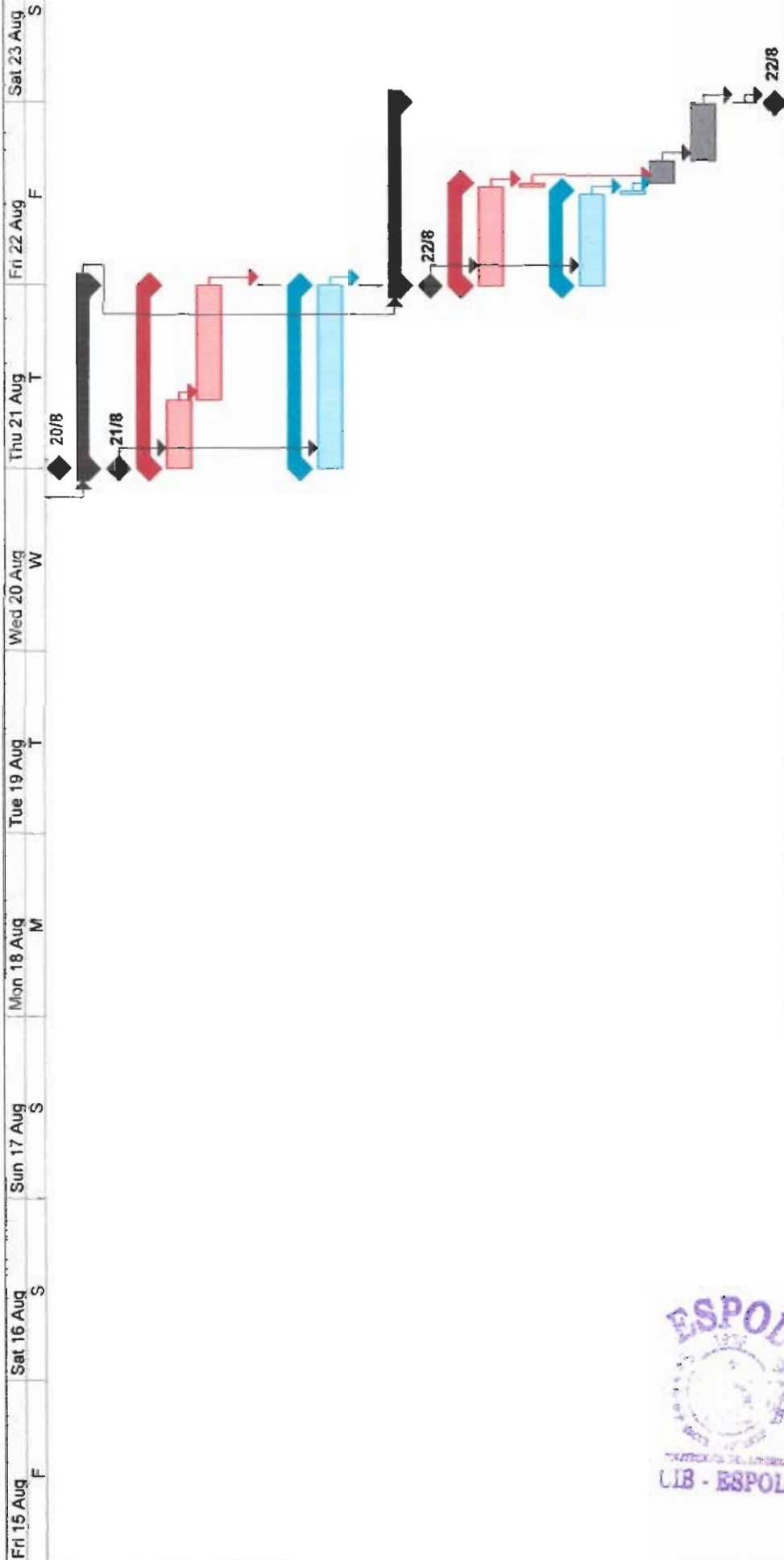


Tarea	Hito	Resumen	Resumen del proyecto	Tareas externas
División	Resumen	Hito externo	Hito externo	Hito externo
Progreso	Resumen del proyecto	Fecha límite	Fecha límite	Fecha límite

Proyecto: Ensayos de Polarización  
Fecha: Thu 3/6/04



CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES PARA MEDICIÓN DE POTENCIALES ON-OFF EN LÍNEA EDÉN YUTIRI-LAGO AGRIO



Proyecto: Ensayos de Polarización  
 Fecha: Thu 3/6/04

- Tarea
- División
- Progreso
- Hito
- Resumen
- Resumen del proyecto
- Tareas externas
- Hito externo
- Fecha limite



## BIBLIOGRAFÍA

1. A. W. PEABODY, Control of Pipeline Corrosion, Second Edition, 2001
2. CORDEIRO DUTRA A., Proteção Catódica Técnica de Combate à Corrosão, Tercera Edição, 1999
3. E. W. MCALLISTER, Handbook of Pipeline Rules of Thumb, First Edition, 2002
4. NACE RECOMMENDED PRACTICE 0169, Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems, Seventh Edition, 2002
5. NACE TEST METHOD 0497, Measurement Techniques Related to Criteria for Cathodic Protection on Underground or Submerged Metallic Piping Systems, Sixth Edition, 2002

6. PIERRE R. ROBERGE, Handbook of Corrosion Engineering, First Edition, 2000
7. R. L. PAWSON, Cathodic Protection Close Interval Survey Field Manual, First Edition, 2001
8. R. S. TRESEDER, Nace Corrosion Engineer's Reference Book, Third Edition, 1996
9. RADIODETECTION, Pipeline Current Mapper User Guide, First Edition, 2001
10. THOMAS J. BARLO, Origen y Validación del Criterio de Polarización de 100 mV, Paper 01581, 2001

