

EVALUACIÓN DEL ESTADO DE CORROSIÓN EXTERNA DE UN GASODUCTO
UBICADO AL OCCIDENTE DE COLOMBIA, USANDO TÉCNICAS CIPS Y DCVG

LUISA FERNANDA REYES GONZÁLEZ
JANIS ALEJANDRA TORRES ROA

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ, D.C
2016

EVALUACIÓN DEL ESTADO DE CORROSIÓN EXTERNA DE UN GASODUCTO
UBICADO AL OCCIDENTE DE COLOMBIA, USANDO TÉCNICAS CIPS Y DCVG

LUISA FERNANDA REYES GONZÁLEZ

JANIS ALEJANDRA TORRES ROA

Proyecto Integral de grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO

Director.

TULIO CASTAÑEDA HERRERA

Ingeniero Químico

Asesor.

EDGAR FERNANDO MORENO

Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BOGOTÁ, D.C

2016

Nota de Aceptación

Ing. Edgar Fernando Moreno Torres
Presidente del jurado

Ing. Alejandro Amadeus Castro Vega
Jurado 1

Ing. Edubiel Jhobany Salcedo Varela
Jurado 2

Bogotá DC, 1 agosto 2016

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Secretario General

Dr. Juan Carlos Posada García-Peña

Decano Facultad de Ingeniería

Dr. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director Programa ingeniería

Ing. Leonardo de J. Herrera

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores

DEDICATORIA

A Dios por darme la fuerza y la fortaleza para guiarme en el camino.

A mi madre porque me ha dado todo su apoyo y amor incondicional.

A mi padre porque a pesar de que se han vivido momentos difíciles, regresó en el momento que lo necesitaba.

A mi novio que ha sido mi apoyo incondicional en los momentos más difíciles.

A mi hermano por su colaboración a lo largo de esta etapa.

A mis abuelos por tenerme presente en sus oraciones y darme esas palabras de aliento.

Janis Torres

A Dios por sus bendiciones y por guiarme en el camino del bien.

A mi madre porque a pesar de los momentos difíciles me ha dado todo su apoyo, amor y sabiduría para afrontar los retos de la vida.

A mi padre porque me enseñó a seguir adelante a pesar de los obstáculos que se presentan en la vida y a comprender que las segundas oportunidades existen

A mi hermana porque me alegra cada día con su presencia y no deja que caiga en los momentos difíciles.

A mis abuelos Silvia y Tarcisio que con sus experiencias y consejos me enseñaron que lo más importante es ser feliz y mantener la familia unida.

A mis abuelos Pocho y Anita, aunque no están presentes viven en mi corazón y me ayudan cada día a salir adelante.

A mi tía pelis porque con su apoyo incondicional salimos adelante y con sus consejos crezco como persona de bien cada día.

Luisa Reyes

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan sus agradecimientos a:

La Fundación Universidad de América por nuestra formación profesional.

Al Ingeniero y director de tesis Tulio Castañeda por su interés y confianza.

Al Ingeniero Javier Jara por sus explicaciones y dedicación.

Al orientador ingeniero Fernando Moreno por su colaboración en el desarrollo de este trabajo de grado.

A la empresa Procorr S.A.S por permitirnos realizar esta propuesta y ejecutarla con su apoyo profesional.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	17
OBJETIVOS	18
1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LA CORROSIÓN	19
1.1 EL SUELO	19
1.2 LA TUBERÍA	19
1.3 LA CORROSIÓN	20
1.3.1 Tipos de corrosión	20
1.3.1.1 Corrosión Seca	20
1.3.1.2 Corrosión Húmeda	21
1.3.1.3 Clasificación de Shreir	22
1.3.2 Formas de corrosión	22
1.3.2.1 Corrosión galvánica	23
1.3.2.2 Corrosión uniforme	23
1.3.2.3 Corrosión por picado	23
1.3.2.4 Corrosión por fricción	24
1.3.2.5 Corrosión intergranular	24
1.3.2.6 Corrosión microbiológica	24
1.3.2.7 Corrosión electroquímica	25
1.3.2.8 Corrosión por hendidura (crevice)	25
1.3.3 Comportamiento de la corrosión	25
1.3.3.1 Aspectos electroquímicos	25
1.3.3.2 Aspectos termodinámicos	27
1.3.4 Métodos de protección contra la corrosión	29
1.3.4.1 Corriente Impresa	29
1.3.4.2 Ánodos de sacrificio	31
1.3.5 Técnicas de inspección de la tubería	32
1.3.5.1 Técnica de inspección de intervalo de potencial cerrado (CIPS)	32

1.3.5.2 Técnica de inspección de gradiente de Voltaje (DCVG)	34
2. DIAGNÓSTICO ESTADO DE CORROSIÓN EXTERNA PARA EL AÑO 2013	37
2.1 DATOS OBTENIDOS EN EL 2013	38
2.1.1 Datos CIPS	38
2.1.2 Datos DCVG	41
2.2 DIAGNÓSTICO DEL GASODUCTO PARA EL AÑO 2013	51
3. DIAGNÓSTICO ESTADO DE CORROSIÓN EXTERNA PARA EL AÑO 2016	54
3.1 DATOS CIPS	56
3.2 Datos DCVG	60
3.3 DIAGNÓSTICO DEL GASODUCTO PARA EL AÑO 2016	65
4. ANÁLISIS DE SUELO	67
4.1.1 Cloruros	69
4.1.2 Sulfatos	69
4.1.3 Sulfuros	70
4.1.4 Carbonatos	71
4.1.5 Potencial rédox	72
4.1.6 Resistividad del suelo	73
4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS	78
5. CONCLUSIONES	80
6. RECOMENDACIONES	81
BIBLIOGRAFÍA	82
ANEXOS	84

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Modelo simplificado de corrosión seca	21
Figura 2. Modelo simplificado de corrosión húmeda	22
Figura 3. Oxidación de un metal	26
Figura 4. Reducción de un metal	27
Figura 5. Diagrama de Pourbaix del hierro	29
Figura 6. Esquema de protección catódica con corriente impresa.	30
Figura 7. Mecanismo de protección catódica con ánodo de sacrificio	31
Figura 8. Potencial OFF	33
Figura 9. Configuración CIPS	33
Figura 10. Indicaciones de la aguja del milivoltímetro del DCVG	34
Figura 11. Gradiente de potencial en la superficie del suelo asociado con un defecto	35
Figura 12. Ubicación del gasoducto	37
Figura 13. Monitoreo de Potenciales CIPS sin corrección Regional 1 (2013)	39
Figura 14. Monitoreo de Potenciales CIPS corregidos Regional 1	41
Figura 15. Consolidado CIPS - DCVG Regional 1 para el año 2013	52
Figura 16. Procedimiento CIPS - DCVG	55
Figura 17. Monitoreo de Potenciales CIPS corregidos Regional 2 para el año 2016	57
Figura 18. Monitoreo de Potenciales CIPS corregidos Regional 1 para el año 2016	58
Figura 19. Monitoreo de Potenciales CIPS corregidos Troncal Principal para el año 2016	59
Figura 20. Monitoreo de Potenciales CIPS corregidos Troncal principal para el año 2016	60
Figura 21. Consolidado CIPS - DCVG Troncal Principal para el año 2016	66
Figura 22. Relación entre las variables que afectan la corrosión en el suelo	67
Figura 23. Corrosión de una tubería enterrada	68
Figura 24. Esquema de la medida de resistividad del terreno	74

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Severidad de los defectos y consideraciones de reparación	42
Tabla 2. Comportamiento de los defectos	42
Tabla 3. Datos DCVG Regional 1 para el año 2013	47
Tabla 4. Datos DVCG Troncal 2-2 para el año 2013	47
Tabla 5. Datos DVCG Troncal 1 – 2 para el año 2013	48
Tabla 6. Datos DCVG Regional 2 para el año 2013	49
Tabla 7. Consolidado de defectos 2013	50
Tabla 8. Defectos significativos del gasoducto	53
Tabla 9. Datos DCVG Troncal principal para el año 2016	61
Tabla 10. Datos DCVG Troncal principal para el año 2016	62
Tabla 11. Datos DCVG Regional 1 para el año 2016	63
Tabla 12. Datos DCVG Regional 2	64
Tabla 13. Consolidado de defectos 2016	65
Tabla 14. Grado de corrosión según la concentración de cloruros	69
Tabla 15. Grado de corrosión según la concentración de sulfatos	70
Tabla 16. Determinación de la agresividad de suelos	71
Tabla 17. Clasificación del suelo en función de su contenido en carbonatos.	72
Tabla 18. Clasificación de la corrosividad de suelos respecto al potencial redox	73
Tabla 19. Clasificación de la resistividad del suelo	74
Tabla 20. Datos medición resistividades Troncal principal para el año 2016	77
Tabla 21. Datos medición resistividades Regional 1 para el año 2016	77
Tabla 22. Datos medición resistividades Regional 2 para el año 2016	78
Tabla 23. Resultados del análisis de suelos.	79

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Reacción de oxidación Fe^{+2}	26
Ecuación 2. Reacción de oxidación Fe^{+3}	26
Ecuación 3. Reacción reducción H^+	27
Ecuación 4. Energía libre de Gibbs	27
Ecuación 5. Potencial del electrodo (Nernst)	28
Ecuación 6. Correlación cuando el inspector está aguas arriba del data logger fijo	40
Ecuación 7. Correlación cuando el inspector esta aguas abajo del data logger fijo	40
Ecuación 8. Amplitud de la señal de la tubería a tierra remota	44
Ecuación 9. Porcentaje de severidad	45
Ecuación 10. Porcentaje de severidad	45
Ecuación 11. Relación tipo Arrhenius	46
Ecuación 12. Resistividad del suelo	75
Ecuación 13. Resistividad aparente	75

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Monitoreo de Potenciales CIPS sin corrección para el año 2013	85
Anexo B. Monitoreo de Potenciales CIPS corregidos para el año 2013	87
Anexo C. Consolidado CIPS - DCVG para el año 2013	89
Anexo D. Análisis químico del suelo	91

LISTADO DE ABREVIATURAS

NACE	Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión
DCVG	Gradiente de Voltaje de Corriente Directa
CIPS	Potencial de intervalo cerrado
pH	Potencial de hidrógeno
psi	Unidad de presión en el sistema inglés
pK	Localización del gasoducto
mV	Milivoltios
%IR	Porcentaje de severidad
P/RE	Amplitud de la señal de la tubería a tierra remota
OL/RE	Potencial a tierra remota sobre la línea de estudio
m	Metros
ppm	Partes por millón
Ω	Ohmio, medida de resistencia eléctrica
Ω .cm	Ohmio por centímetro, medida de resistividad

GLOSARIO

DEFECTOS: cualquier anomalía que sufra la tubería por exposición al medio, reacciones indeseadas o naturaleza de los metales que afectan a la estructura externa.

INMUNIDAD: es una fase termodinámicamente estable, es decir la condición en la cual el metal se encuentra en su forma elemental.

POLARIZACIÓN: es cuando una reacción electroquímica se retarda, teniendo en cuenta la cinética característica de las reacciones anódicas y catódicas, sus causas pueden ser muy diferentes según los metales que sufren corrosión y los electrolitos.

POTENCIAL “OFF”: también denominada corriente apagada, físicamente se define como una magnitud que describe un campo físico y se utiliza para eliminar errores de medición causados por el flujo de corriente entre la tubería y la celda de referencia.

POTENCIAL “ON”: físicamente se define como una magnitud que describe un campo físico y se utiliza para determinar la condición aproximada del revestimiento.

RAMAL: conducto que, en forma independiente o interconectada con otros, transporta hidrocarburos con previa regulación de presión, desde un gaseoducto hasta los centros de consumo.

REVESTIMIENTO: capa continua de terminaciones que no presentan uniones y que protege a la tubería a nivel externo.

VOLTAJE AC: la corriente alterna invierte su dirección en forma cíclica, generalmente 100 0 120 veces por segundo. Se usa en la zona urbana.

VOLTAJE DC: la corriente continua circula en una única dirección. Es producida por una batería y tiene apariencia de línea recta y se basan en corriente continua.

RESUMEN

A través del tiempo los gasoductos han sido útiles en el transporte de gases combustibles, es por eso que se debe realizar un mantenimiento adecuado para garantizar que el servicio sea confiable y seguro. Uno de los factores que afecta a esta industria es la presencia de corrosión externa; por tal motivo es necesario evaluar mediante técnicas como Direct Current Voltage Gradient (DCVG) y Close Interval Potencial Survey (CIPS), el estado de la tubería frente al fenómeno de la corrosión; esto permite controlar mediante una estrategia apropiada la probabilidad de falla y aumenta la seguridad de las personas, el medio ambiente y la integridad del gaseoducto.

El desarrollo de este proyecto se presenta una evaluación del estado de corrosión externa del gasoducto a través del análisis de los datos obtenidos en el año 2013 y 2016, de las inspecciones realizadas respectivamente donde la técnica CIPS permite tener un conocimiento de cómo se encuentra la protección catódica en la tubería y la técnica DCVG permite determinar la presencia de algún defecto y el comportamiento corrosivo del mismo. Estas dos técnicas se complementan para determinar un diagnóstico más acertado.

Finalmente, el gasoducto tiene el riesgo de presentar corrosión, debido al deterioro que muestran los metales por acción química, electroquímica y termodinámica; propia de la construcción y del medio que lo rodea; generando un aumento en las velocidades y mecanismos de degradación de los materiales al encontrarse en contacto con el suelo, es por eso que es necesario realizar un análisis del mismo teniendo en cuenta diferentes factores químicos como sulfatos, sulfuros, carbonatos, cloruros y potencial redox; los cuales producen una reacción de oxidación en el metal, haciendo que este retorne a su estado natural. Por tal motivo se evalúa el estado de corrosión externa de un gasoducto ubicado al occidente de Colombia.

Palabras claves: corrosión, inspección, análisis de suelo, protección catódica, porcentaje de severidad, comportamiento corrosivo.

INTRODUCCIÓN

Si se tiene en cuenta que la corrosión es la causa que origina la alteración y destrucción de la mayor parte de los materiales naturales o fabricados por el hombre, este ataque destructivo se genera por reacción química o electroquímica con el medio ambiente; este fenómeno constituye una de las pérdidas económicas más grandes de la civilización moderna y está ligada a problemas de seguridad y de daño ambiental que pone en riesgo la vida de los seres humanos.

Por esta razón, es importante tener conocimientos generales de dos elementos fundamentales en la corrosión como son el suelo y la tubería, los conceptos básicos sobre los tipos, formas y comportamientos de este fenómeno y las alternativas de mitigación y prevención que permita minimizar las pérdidas económicas, que a través del tiempo afectan a la industria y a la sociedad. Por lo tanto, es necesario conocer las técnicas para evaluar y diagnosticar el estado en el que se encuentra un gasoducto.

Con el desarrollo del presente trabajo se propone realizar un estudio del gasoducto ubicado al occidente de Colombia que consta de una tubería de acero al carbón de 10,8 Km de longitud con diámetros de 16, 14, 12, 8, 6 y 4 pulgadas, la cual se encuentra enterrada por seguridad del transporte de gas, puesto que maneja una presión de 1.200 psi; mediante la evaluación directa de la corrosión externa por medio de dos técnicas: la CIPS (técnica de inspección de intervalo de potencial cerrado) y la DCVG (técnica de inspección de gradiente de Voltaje), que hacen parte de los programas de mantenimiento y operación de la tubería de transporte y distribución.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el estado de corrosión externa de un gasoducto ubicado al occidente de Colombia, usando técnicas CIPS y DCVG.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Diagnosticar el estado del gasoducto a través de las técnicas CIPS y DCVG para el año 2013.
2. Determinar el perfil de corrosión presente en el gasoducto y sus variaciones para el año 2016.
3. Evaluar el comportamiento de la corrosión externa presente en el gasoducto.

1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LA CORROSIÓN

Es necesario tener en cuenta algunos aspectos para poder realizar un análisis de las tuberías enterradas tales como el pH, la electrólisis por corrientes externas, la acción bacteriana, la actividad química del suelo, el diferencial de oxígeno y la humedad, debido a que al presentarse uno o más de estos factores se pone en riesgo la vida útil del tubo dando presencia a la corrosión. En este marco, se establecen dos componentes básicos para la corrosión de tuberías enterradas tales como; el suelo y la tubería.

A continuación, se da la caracterización de cada uno de los aspectos haciendo énfasis en la influencia que tienen en la generación de corrosión; con el propósito de dar a conocer los parámetros que determinan el fenómeno y posteriormente definir la corrosión.

1.1 EL SUELO

Para establecer si el suelo es un ambiente corrosivo se debe tener en cuenta aspectos como el oxígeno, sales disueltas y elementos formadores de ácidos. Para esto se deben realizar diferentes procedimientos que incluye la medición de pH, medidas de cloruros y sulfatos, resistividad total, acidez total y el potencial REDOX, en cuanto a contenido de sólidos se realiza el análisis de sólidos volátiles.

1.2 LA TUBERÍA

En el caso del transporte de hidrocarburos se usan ductos metálicos, que se componen de uno o más metales, aunque estos pueden contener un no metal como es el caso del carbono, teniendo en cuenta las micro-estructuras y las propiedades que cada elemento aporte a la construcción. La mayor parte de los diseños de ingeniería que requiere el transporte de fluidos, involucran aleaciones ferrosas. Las aleaciones ferrosas tienen en su composición, en mayor proporción hierro (Fe), la mayor producción de esta aleación son los aceros, contienen entre 2 y 6,67% de hierro y entre 2,5 y 4% de carbono que se puede presentar en forma de libre (grafito) o combinada (cementita)¹ esta aleación (Fe-C) puede variar agregando otro elemento o cambiando el porcentaje de alguno de estos, dándole propiedades específicas en la industria que se vaya implementar.

¹ RUBEN GUTIERREZ. Metalografía [En línea]
<<http://materias.fi.uba.ar/6750/Resumen%20Fundiciones%20de%20hierro.pdf>>
[Citado el 19 de octubre de 2015]

A su vez la industria del acero se clasifica según el contenido de carbono, los aleantes, las impurezas, la velocidad de enfriamiento o el tratamiento térmico, debido a que estas variables controlan la condición y forma del carbono en la estructura. Se puede clasificar en:

- **Fundición blanca:** No contienen grafito libre, se caracterizan por la resistencia y la dureza a la abrasión, gran rigidez y fragilidad, dificultad para lograr uniformidad de estructuras según el espesor. Se utiliza en industrias donde es muy importante la resistencia a la abrasión y el desgaste, debido a que no admite ninguna deformación.
- **Fundición gris:** Está formada por una matriz que contiene carbono en forma de grafito, las principales características son buena resistencia al desgaste, reacciona positivamente a los tratamientos térmicos de endurecimiento y poca resistencia mecánica.

A pesar de que las aleaciones ferrosas, particularmente el acero, son ampliamente usadas en ingeniería por sus buenas propiedades mecánicas y su bajo costo de producción; sin embargo, existen algunas limitaciones pues son materiales densos, en general no son buenos conductores eléctricos y salvo los aceros inoxidable, son materiales propensos a la corrosión².

1.3 LA CORROSIÓN

Se le denomina corrosión al ataque destructivo que sufre un material, generalmente metálico, por reacción química o electroquímica con el medio ambiente (atmósfera, suelo, fluido). El efecto de la corrosión es una alteración de las propiedades de los materiales afectados, que puede venir acompañado de una pérdida de material³.

1.3.1 Tipos de corrosión. Teniendo en cuenta los ataques corrosivos que se presenta en la tubería se presentan dos tipos de corrosión:

1.3.1.1 Corrosión Seca. Se presenta en las tuberías cuando está sometida a la acción de gases principalmente a temperaturas elevadas, por lo que no presenta un electrolito condensado, se presenta formación de óxidos de carácter iónico (cationes metálicos y aniones de óxido regularmente distribuidos).

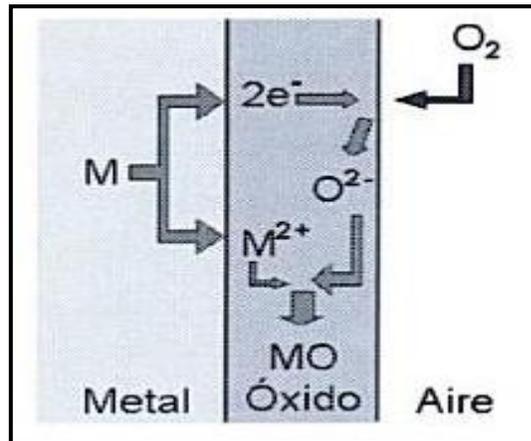
Inicialmente la capa externa del material se recubre del producto de la oxidación al reaccionar con los componentes del medio ambiente como se observa en la

² UNIVERSIDAD AMÉRICA RUM. Capítulo 2 Antecedentes [En línea]
<http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lqi/coatl_p_m/capitulo2.pdf>
[Citado el 23 de octubre de 2015]

³ GÓMEZ DE LEÓN, FÉLIX CASÁREO. Manual Básico de Corrosión para ingenieros. Murcia: Servicio de publicaciones. 13 p. 84-8371-506-6

figura 1, de forma lenta y con dificultad, se da el fenómeno de difusión entre el aire y el metal, donde la estructura cristalina formada evidencia deficiencias iónicas a través de las cuales se producen la difusión de iones, presentándose la oxidación del metal.

Figura 1. Modelo simplificado de corrosión seca

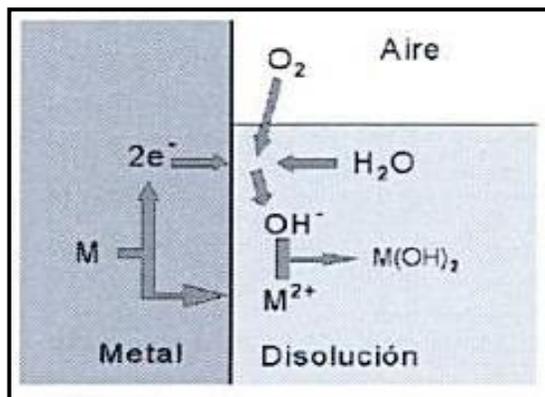


Fuente: GÓMEZ DE LEÓN, FÉLIX CASÁREO. Manual Básico de Corrosión para ingenieros. Murcia: Servicio de publicaciones. 15 p. 84-8371-506-6 .3.1.2

1.3.1.2 Corrosión Húmeda. Se presenta en medios acuosos, normalmente a temperatura ambiente o no muy elevada, esta afecta principalmente a los elementos que usan el acero en el que el metal que constituye al ánodo, produce una reacción de oxidación, este fenómeno se puede evidenciar en la figura 2, donde se presenta una interacción entre la disolución, el aire y el metal. Los cationes pasan a la disolución, mientras que los electrones se desplazan donde el propio metal actúa de conductor eléctrico a zonas catódicas. El conjunto de estas dos reacciones da como resultado la formación de hidróxido ferroso, que es inestable y reacciona con el oxígeno del aire o del agua, produciendo hidróxido férrico que se ve de color marrón anaranjado, el cual corresponde al producto principal de la corrosión húmeda. Para que se de este fenómeno debe cumplir con tres condiciones:

- Dos zonas con distintos potenciales, una zona constituye el ánodo de reacción y cede electrones y la otra zona constituye el cátodo el cual absorbe los electrones cedidos por el ánodo.
- Un conductor eléctrico líquido, denominado electrolito el cual contiene los elementos característicos del medio corrosivo.
- Una conexión eléctricamente conductora entre el ánodo y el cátodo.

Figura 2. Modelo simplificado de corrosión húmeda



Fuente: GÓMEZ DE LEÓN, FÉLIX CASÁREO. Manual Básico de Corrosión para ingenieros. Murcia: Servicio de publicaciones. 25 p. 84-8371-506-6

1.3.1.3 Clasificación de Shreir. Teniendo en cuenta que la corrosión externa se va a calcular mediante las técnicas de medición externa, es necesario nombrar la clasificación de Shreir, que tiene en cuenta la forma como se produce la reacción⁴. Se presenta una reacción directa del metal con el entorno sin que existan películas intermedias ni transporte de cargas. En los sistemas electrolíticos:

- **Ánodo/cátodo inseparable:** Pertenecen a disoluciones uniformes de metales en ácidos, bases o disoluciones neutras. No se diferencian el uno del otro fácilmente.
- **Ánodo y cátodo separados:** Se diferencian las zonas del metal entre el ánodo y el cátodo, aunque la separación entre ellas sea mínima (inferior a 1 mm) y se produce un flujo macroscópico de carga a través del metal.
- **Ánodo/cátodo de tipo funcional:** Una parte de la interface actúa como ánodo, mientras que la otra actúa como cátodo.

1.3.2 Formas de corrosión. Los materiales se corroen de formas muy diversas, esto se debe a la diversidad de localizaciones que puede tener las zonas catódicas y anódicas de un metal en su superficie.

A nivel general se puede presentar cuando el ataque se da en toda la superficie por igual, lo que quiere decir que las zonas anódicas y catódicas son de nivel microscópico y cambian de ubicación con el tiempo⁵, a esto se le conoce como corrosión generalizada y cuando el ataque esté especificado en unas áreas

⁴ GÓMEZ DE LEÓN, FÉLIX CASÁREO. Manual Básico de Corrosión para ingenieros. Murcia: Servicio de publicaciones. 13 p. 84-8371-506-6

⁵ ANDRADE, MARIA CARMEN, FELIU SEBASTIAN. Corrosión y Protección Metálica. España: C.S.I.C de ediciones. Vol I. 84-00-07141-7. (1991)

determinadas se denomina corrosión localizada. Igualmente, de estas se derivan otras formas de corrosión que se especifican a continuación.

1.3.2.1 Corrosión galvánica. Se caracteriza por su poder destructivo y es el resultado de un fenómeno de electrolisis entre dos metales de potencial eléctrico diferente que se encuentran en contacto en presencia de una solución química, el suelo o un fluido que tienen un medio húmedo que actúa como conductor.

Este fenómeno se presenta en una celda galvánica, en donde debe existir un contacto eléctrico entre los metales y al mismo tiempo los metales tienen que estar en contacto con un medio que presente humedad. En este caso al electrodo se le denomina ánodo, el electrolito va a hacer la solución química, el suelo o el fluido y el electrodo hacia donde fluyen los electrones se denomina cátodo.

La corriente eléctrica por la inmersión de distintos metales en un electrolito, en este caso el suelo uniforme, viaja desde el ánodo recorriendo el electrolito hasta el cátodo y retorna a través de un conductor externo, así la corrosión toma lugar en la superficie del electrodo debido a que se presenta una descarga del ánodo al electrolito lo que hace que se presente una pérdida del metal y que haya presencia de corrosión.⁶

1.3.2.2 Corrosión uniforme. La corrosión se puede observar a simple vista, puesto que se presenta en toda la superficie cuando el metal permanece expuesto sin protección alguna a la acción de la atmósfera y a velocidad constante.

Esta forma de corrosión es una de las más comunes que se presenta en los metales y la que genera mayor pérdida del material, un mayor ejemplo de esta es la corrosión atmosférica. Sin embargo, al ser de tipo superficial es la más fácil de controlar y por lo tanto la que menos accidentes provoca.⁷

1.3.2.3 Corrosión por picado. Consiste en un tipo de ataque local que se forma cuando la velocidad de la corrosión es mayor en unas zonas que en otras. Se presentan dos clases de picaduras, la primera se produce por un ataque en un área pequeña encerrada fija en el metal, esta actuará como ánodo y las picaduras que se forman presentan una profundidad de 3,2mm a 6,4mm y con un tamaño de 12,5mm² a 24,5mm². Si el área de ataque es relativamente grande y no tan profunda, las picaduras que se forman se considera superficiales, encontrándose en un intervalo de profundidad de 0,4mm a 0,8mm y un tamaño de 0,5mm² a 2mm².⁸

⁶ VILA CASADO, Gustavo. Corrosión Electroquímica- Mecanismo y Métodos de control. Bogotá: Universidad Nacional, 1990. p.138

⁷ *Ibíd.*, p. 136.

⁸ FONTANA, Mars. Ingeniería de la Corrosión: Ocho formas de corrosión. Tercera edición. Singapore: Editorial Board, 1910. P 63. ISBN 0-07-021463-8.

Varios metales cuando están expuestos a líquidos que se mueven a velocidades elevadas sufren una corrosión del tipo de picaduras teniendo en cuenta dos factores más la cavitación y la erosión-corrosión⁹.

1.3.2.4 Corrosión por fricción. En donde se presenta una erosión, se produce por un movimiento relativamente pequeño puede ser por vibraciones, en la cual se encuentran dos metales en contacto o un metal y una sustancia generando diferentes picaduras a lo largo del contacto del metal. Este contacto produce un residuo de óxidos que se alojan en la picadura lo que hace que no sean visibles fácilmente y se necesite retirar los productos de la corrosión y la cavitación aparece como consecuencia de procesos de ebullición o salida de gases, como consecuencia de cambios bruscos de presión esto se evidencia en la superficie de contacto entre el metal y el líquido por medio de un panel de fisuras de pequeña profundidad.

1.3.2.5 Corrosión intergranular. Este tipo de corrosión consiste en un ataque localizado en los límites o bordes de la frontera de grano cristalina de una aleación. Esta ocurre a causa de impurezas que se alojan en los bordes de la estructura originando pérdida en la resistencia que a su vez desintegran los bordes, se da la formación de micropilas galvánicas las cuales son las que provocan la formación de los productos corrosivos.

Como consecuencia de este fenómeno el material sufre una degradación, cuando por ejemplo efectúa de manera inadecuada las soldaduras o cuando se produce un exceso desde el punto térmico. La corrosión intergranular se inicia en la superficie que está expuesta y se propaga penetrando hasta cubrir toda la extensión de los granos al azar. También se presenta una difusión entre una zona y otra generando una disminución de la resistencia a la corrosión llevando a un fenómeno denominado sensibilización dejando expuesto el metal en ambientes corrosivos.

1.3.2.6 Corrosión microbiológica. Es también llamada corrosión bacteriana y es provocada por la presencia de microorganismos tales como bacterias, hongos y algas y sus actividades en la superficie del material. Los organismos biológicos originan la falla o actúan como aceleradores del proceso corrosivo localizado, acelerando el transporte de oxígeno a la superficie del metal provocando el proceso de la corrosión.

Se origina con mayor probabilidad en presencia de microorganismos quimio autótrofos, mediante procesos biológicos los organismos pueden producir un flujo de electrones o modificar el medio ambiente local, entre las bacterias autótrofas encontramos las Quimiolitótrofas las cuales obtienen su energía a partir de los elementos no orgánicos, como la transformación de los compuestos reducidos de

⁹ UHLIG, HERBET H. Corrosión y Control de Corrosión. España: Urmo S.A. de ediciones. 393 p. 84-314-0149-4. (1979)

azufre, hierro, magnesio, nitrógeno e hidrógeno y tampoco son fotosintéticas lo que quiere decir que se pueden desarrollar en la oscuridad y las Sulfobacterias metabolizan el azufre a partir de azufrados reducidos y los almacenan o pasan al medio formando lodos o bien oxidan el azufre modificando considerablemente el pH del medio produciendo una acción corrosiva importante.¹⁰

1.3.2.7 Corrosión electroquímica. Para que se presente esta corrosión se deben tener tres elementos básicos, el ánodo el cual es el electrodo en el cual la corriente pasiva pasa hacia el electrolito formando la zona que se va a corroer, el cátodo es el electrodo en el cual entra la corriente positiva proveniente del electrolito y por último el electrolito. Tanto el ánodo como el cátodo se deben conectar por medio de una unión eléctrica externa para que se presente la corrosión, debido a que no hay generación de corriente en la celda electrolítica que es la que contiene estos tres elementos y se produce la corrosión electroquímica.¹¹

Se puede evidenciar un proceso igual con la disolución de un metal en un ácido, se considera una de las corrosiones más frecuentes presente en los metales, debido a que resulta de la formación sobre la superficie de varias zonas anódicas y catódicas, sumándole una presencia de humedad considerable.

1.3.2.8 Corrosión por hendidura (crevice). Esta corrosión localizada ocurre frecuentemente en volúmenes de solución estancada en rendijas, grietas o hendiduras formadas entre superficies de metales ensamblados y se manifiesta en forma de picaduras. Inicialmente las reacciones de oxidación del metal y reducción del oxígeno ocurren uniformemente sobre toda la superficie, incluyendo el interior de la rendija; este tipo de ataque se presenta generalmente en un medio donde hay una concentración alta de cloruros.¹²

1.3.3 Comportamiento de la corrosión

1.3.3.1 Aspectos electroquímicos. Actualmente la teoría de la corrosión se basa en el concepto de la distribución de áreas anódicas y catódicas en la superficie del metal, para comprender esto el área de la electroquímica se fundamenta en la cinética del electrón, debido a que el comportamiento del movimiento y su transferencia es la causa de la corrosión.

Por medio de la oxidación – reducción presente entre las sustancias en contacto, se le conoce como oxidación a la pérdida de uno o más electrones en un átomo o en una molécula, que pasa a ser un ion positivo (como se muestra en la ecuación 1 y en la ecuación 2 el hierro, por ejemplo, libera dos y tres electrones,

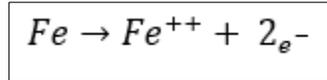
¹⁰ CAMPOS, Humberto, CAMPOS, Claudio. Corrosión bacteriana en metales. Vol.22, no. 1 (ene – jun 2004); p. 31 [citado en 7 de febrero de 2016].

¹¹ VILA, Op.cit, p. 156

¹² Ibíd., p. 145.

respectivamente. Cuando un átomo o una molécula seden electrones, ocurre una reacción de oxidación, reduciendo su carga negativa.¹³

Ecuación 1. Reacción de oxidación Fe⁺²



Ecuación 2. Reacción de oxidación Fe⁺³

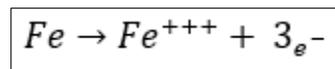
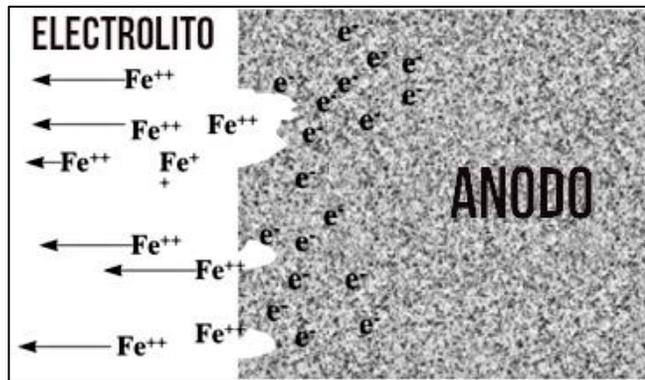


Figura 3. Oxidación de un metal



Fuente: NACE, International. Protección catódica nivel I manual básico. Estados Unidos, 2002. (3/01). 2:5-2:7p.

Como se muestra en la figura 3, se puede evidenciar que el ánodo o electrodo es el sitio sobre el metal donde ocurre la oxidación, se presenta un flujo de electrones donde hace que se presente un desgaste como se muestra en el borde que está entre el ánodo y el electrolito.

Se presenta la reducción cuando hay ganancia de uno o más electrones por parte de un átomo o molécula, donde pasa de una carga positiva a un ion con una carga negativa o un elemento neutro, este fenómeno se muestra en la figura 4 y no se presenta ningún desgaste en el borde del cátodo y el electrolito.

Donde se presenta la reducción se conoce como cátodo, allí es donde el átomo o molécula ganan los electrones por medio de una reacción de reducción aumentando su carga negativa, la ecuación 3 presenta la reacción que se tiene con el hidrógeno.

¹³ NACE, International. Protección catódica nivel I manual básico. Estados Unidos, 2002. (3/01). 2:5-2:7p.

Ecuación 3. Reacción reducción H^+

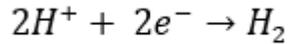
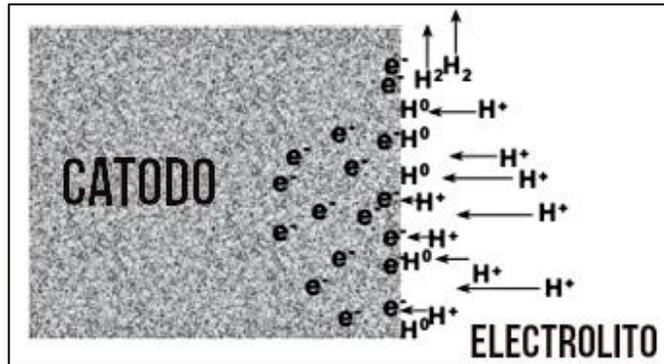


Figura 4. Reducción de un metal



Fuente: NACE, International. Protección catódica nivel I manual básico. Estados Unidos, 2002. (3/01). 2:5-2:7p.

Las ecuaciones de la 1 a la 3 representan la transferencia de electrones en las reacciones tanto de oxidación como de reducción, donde las velocidades de reacción son las mismas en términos de producción y consumo de electrones, complementándose entre sí y no es posible que se presenten individualmente en la forma de la corrosión.

1.3.3.2 Aspectos termodinámicos. Para establecer este aspecto es indispensable entender la termodinámica de la reacción, debido a que eso permite predecir la espontaneidad y dirección de una reacción; relacionando parámetros como la energía libre de Gibbs, la entalpía y la entropía, en la ecuación 3.

Ecuación 4. Energía libre de Gibbs

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Es importante establecer que la tendencia a realizar la reacción se mide por la variación de la energía libre de Gibbs, como se muestra en la ecuación 4. Cuando el valor de ΔG es negativo, la tendencia a realizar la reacción es mayor, si el valor de ΔG es positivo, bajo las condiciones particulares donde se encuentra el sistema no se realizará en lo absoluto a no ser que se al sistema ingrese energía.

El cambio en la energía libre se calcula mediante la ecuación 5 que hace referencia a la ecuación Nernst¹⁴, para cada celda electroquímica se relaciona con el potencial del electrodo y a su vez permite construir el diagrama de Pourbaix.

Ecuación 5. Potencial del electrodo (Nernst)

$$E = E^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[\text{Oxidante}]}{[\text{Reductor}]}$$

Donde,

- E: Potencial del electrodo.
- E^o: Potencial estándar del electrodo.
- R: Constante de gases. (8.314 J/mol K)
- T: Temperatura absoluta.
- F: Constante de Faraday. (96500 C/mol)

Relacionando la variación de la energía libre de Gibbs negativa con el potencial del electrodo que serían los resultados de operar la ecuación 4 y la ecuación 5, se puede establecer que para que la corrosión sea imposible o esté en una condición de inmunidad, se debe cumplir que $E_{\text{reducción}} < E_{\text{oxidación}}$; en el caso contrario $E_{\text{reducción}} > E_{\text{oxidación}}$ el proceso de corrosión es posible. Todos los conceptos tratados en las aplicaciones termodinámicas nombradas anteriormente, parten del supuesto de un estado en equilibrio, lo que permite dar una guía del comportamiento para determinar el fenómeno de la corrosión.¹⁵

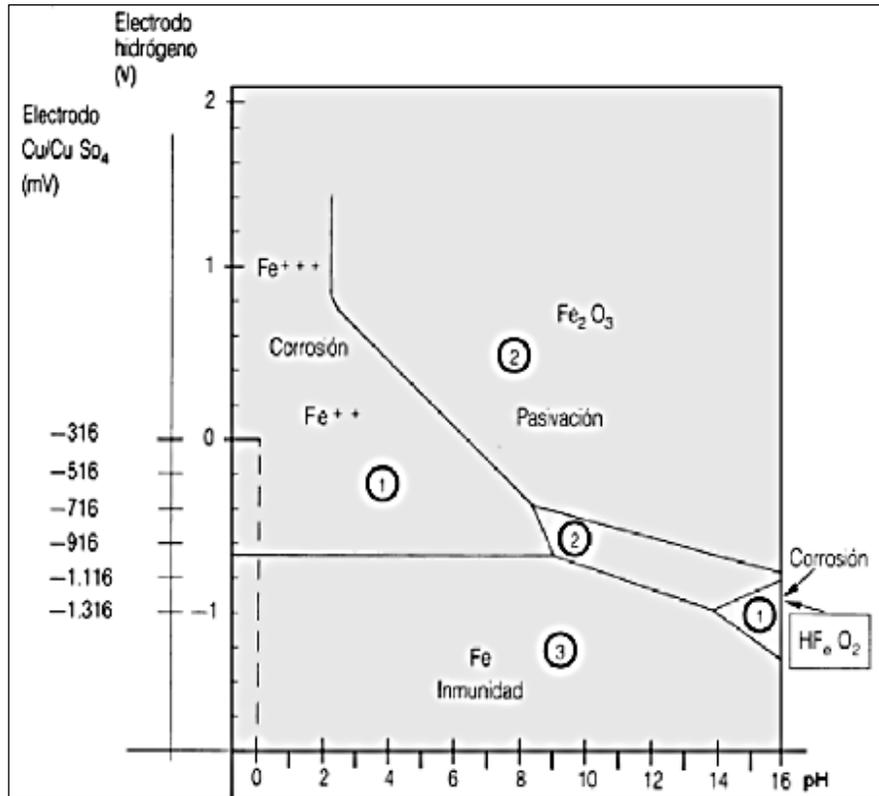
El diagrama de Pourbaix se simplifica generalmente delimitando las regiones de estabilidad de las diferentes especies químicas, como se evidencia en la figura 5. La zona 1 hace referencia a la zona de corrosión donde el hierro se disuelve en la solución y forman sales e hidróxidos solubles, esta es la más peligrosa. La zona 2 de pasivación donde el hierro está protegido por una película de óxidos que lo aísla del medio ambiente, esta es región inestable y la zona 3 de inmunidad donde el hierro permanece en estado metálico y no puede corroerse.¹⁶

¹⁴ MONROY CAMELO, Juan C. PÁEZ LUENGAS, Edgar A. Análisis de las técnicas de monitoreo de corrosión en tubería enterrada para su aplicación industrial. Bogotá, 2001, 9 h. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería Química.

¹⁵ VILA, Op.cit, p. 160

¹⁶ PANCORBO FLORISTÁN, Francisco. Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación: Diagramas de Corrosión. Barcelona: Ediciones técnicas Marcombo, 2011.34 p. ISBN 978-84-267-1576-0.

Figura 5. Diagrama de Pourbaix del hierro



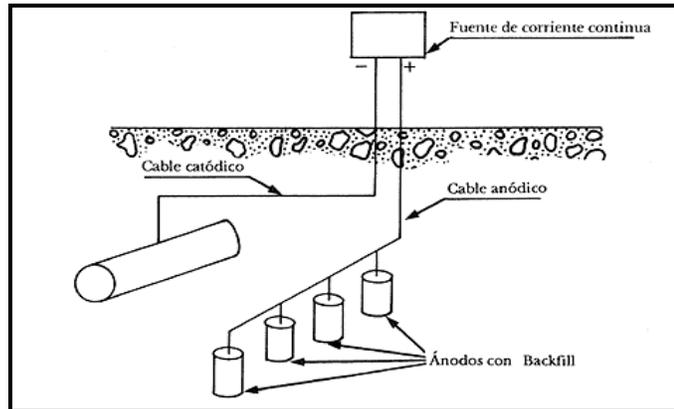
Fuente: PANCORBO FLORISTÁN, Francisco. Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación: Diagramas de Corrosión. Barcelona: Ediciones técnicas Marcombo, 2011.34 p. ISBN 978-84-267-1576-0.

1.3.4 Métodos de protección contra la corrosión. Es necesario proteger las estructuras para retardar el fenómeno de la corrosión, la protección catódica es una técnica que permite retardar el efecto de la corrosión este mecanismo consiste en la polarización del cátodo llevándolo mediante el empleo de una corriente externa, hasta alcanzar el potencial del ánodo en circuito abierto y que los dos adquieran el mismo potencial mitigando la corrosión del sitio. Se puede realizar por medio de corriente impresa o por ánodos de sacrificio.

1.3.4.1 Corriente Impresa. Se entiende por corriente impresa, el mecanismo que consiste en unir eléctricamente la estructura enterrada que protege en la cual externamente se tiene una fuente de alimentación de corriente continua, esta puede ser pura o rectificadora, donde con el polo negativo y el positivo con un electrodo auxiliar cierra el circuito; el intercambio necesario de corriente con el electrolito tiene lugar a través de reacciones electroquímicas y depende del material anódico, del

ambiente que lo rodea y de la densidad de corriente que se suministra¹⁷, teniendo en cuenta que la parte anódica y catódica se encuentran sumergidas, como se ilustra en la figura 6.

Figura 6. Esquema de protección catódica con corriente impresa.



Fuente: HUMBERTO H, UHLIG. Corrosión y Control de Corrosión. España: Urmo, S.A. de Ediciones. 53 p. 84-314-0149-4.

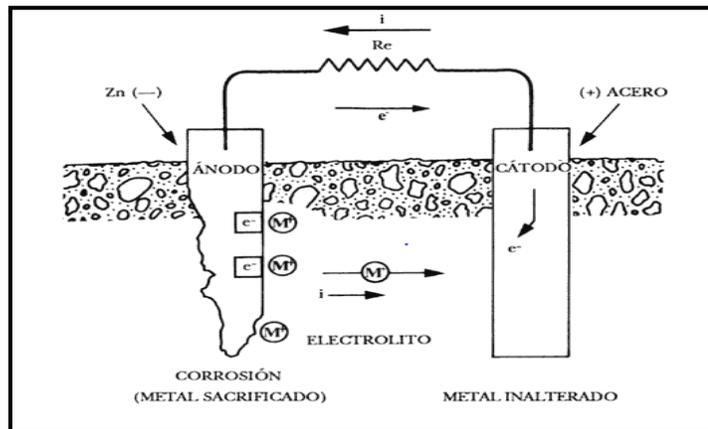
El electrodo que se utiliza en la figura 6 es relativamente económico, puesto que se usa chatarra de hierro o fundición, pero en dimensiones grandes, reemplazándolos en intervalos cortos de tiempo, los cuales contaminan el ambiente y no pueden resistir altas densidades de corriente. En esta técnica el voltaje requerido de una fuente de corriente depende de tres factores; la conductividad eléctrica del medio teniendo en cuenta que a mayor conductividad menor voltaje, área de la estructura a proteger y la naturaleza de las reacciones.

Entre las grandes ventajas que tiene el usar el sistema de corriente impresa se encuentra la capacidad de operar en un amplio rango de tensiones y corrientes de salida, buen funcionamiento en medios de alta resistividad y menor consumo anódico que el sistema de ánodos galvánicos. Sin embargo, presenta desventajas como mayor costo y mantenimiento, requiere de una fuente externa de energía creando un costo constante de suministro y puede causar una sobreprotección, provocando daños en el revestimiento y fatigación por hidrógeno.

¹⁷ HUMBERTO H, UHLIG. Corrosión y Control de Corrosión. España: Urmo, S.A. de Ediciones. 23 p. 84-314-0149-4.

1.3.4.2 Ánodos de sacrificio. La protección catódica por ánodos de sacrificio se lleva a cabo normalmente con tres metales característicos: zinc (Zn), magnesio (Mg), aluminio (Al) y sus aleaciones, en la figura 7 se presenta el montaje del método de la protección catódica por ánodos de sacrificio. Se debe tener en cuenta que esta actúa como una celda galvánica en donde un metal es más activo que el otro y lo que se busca es que los potenciales del ánodo y cátodo sean iguales, esto con el fin de disminuir la probabilidad de que exista corrosión.

Figura 7. Mecanismo de protección catódica con ánodo de sacrificio



Fuente: HUMBERTO H, UHLIG. Corrosión y Control de Corrosión. España: Urmo, S.A. de Ediciones. 60 p. 84-314-0149-4

El uso esencial de los ánodos de sacrificio sirve como una fuente de energía eléctrica transportable y se utiliza cuando no es posible obtener energía eléctrica con facilidad en condiciones en las que no son conveniente o no es factible económicamente instalar las líneas de energías necesarias para tal fin. Es común que se instalen los ánodos galvánicos como se muestra en la figura 6 en cada uno de los puntos donde se repare un desgaste en la tubería en lugar de instalar un sistema de protección catódica completo. Ya depende del presupuesto de la empresa y el costo que implica colocar el sistema de protección a todo el sistema.

Las ventajas que se tienen al usar el sistema de la figura 7, ánodos de sacrificio como la protección catódica del sistema son: pocos requerimientos de mantenimiento, no es necesario una fuente externa de energía, fácil instalación y menor probabilidad de una interferencia de factores externos. Las desventajas que presenta este método consisten un drenaje de corriente y potenciales de salida bajos, en medios de alta resistividad no es muy recomendable, reponer ánodos gastados resulta difícil y costoso y para estructuras mal revestidas se requiere de muchos ánodos.

Cabe aclarar que algunas estructuras con sistemas de protección catódica por corriente impresa pueden necesitar en algunos puntos pequeñas cantidades

adicionales de corriente, las cuales se pueden suplir colocando ánodos galvánicos. Utilizando las dos técnicas cuando sea indispensable, por ejemplo, en válvulas enterradas o secciones aisladas con un desgaste en el revestimiento.

1.3.5 Técnicas de inspección de la tubería. La medición directa de la corrosión externa es un proceso que permite conocer el estado de las tuberías a partir de la información que entregan diferentes métodos, existen métodos directos e indirectos. En este proyecto se tienen en cuenta los métodos directos entre los cuales se encuentran las técnicas CIPS y DCVG. Debido a que el recubrimiento o sistema de protección primario sufren una degradación, ya que esto se refleja por medio de la presencia de defectos, ya sea por las incidencias externas o por la interacción con el sistema de protección catódica, se presentan las generalidades de las técnicas nombradas anteriormente, para posteriormente aplicarlas.

1.3.5.1 Técnica de inspección de intervalo de potencial cerrado (CIPS). En la figura 7 se presenta el montaje de la inspección CIPS para la medición de potenciales a lo largo de la tubería protegida catódicamente la cual es equipada con estaciones de prueba y el suelo con celdas de referencia, para así realizar el análisis detallado de los niveles de protección catódica en tuberías subterráneas.

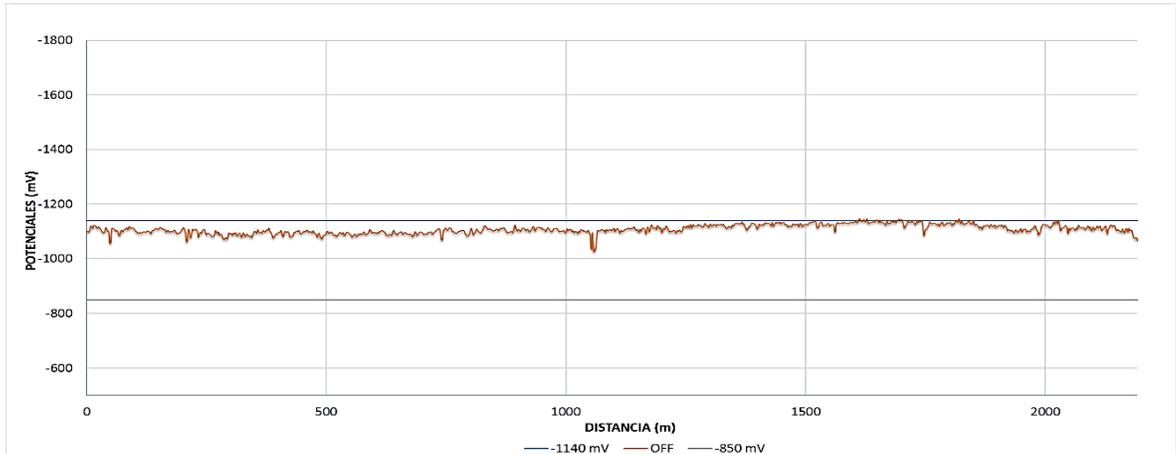
Se utiliza una diferencia de potencial, donde se aplica una corriente encendida “potencial ON” para determinar la condición del revestimiento y una corriente apagada “potencial OFF”, como se evidencia en la figura 10 en el voltímetro registrador, esto necesita de temporizadores cíclicos para dar la eliminación de errores de medición e identificar los niveles de polarización sobre la tubería.¹⁸

En la técnica CIPS el “potencial ON” debe ser mayor al “potencial OFF”, debido a que el “potencial OFF” permite identificar con precisión los niveles de polarización de la cañería, donde:

- Potenciales OFF que estén por debajo del valor de -850 mV, como se evidencia en la figura 8 determina una insuficiencia en la polarización del acero, lo que quiere decir que hay una presencia de corrosión.
- Potenciales OFF que estén por encima del valor de -1140 mV, como se muestra en la figura 8 quiere decir que se presenta una excesiva polarización del acero, perjudicando el revestimiento con efectos de despegue catódico.

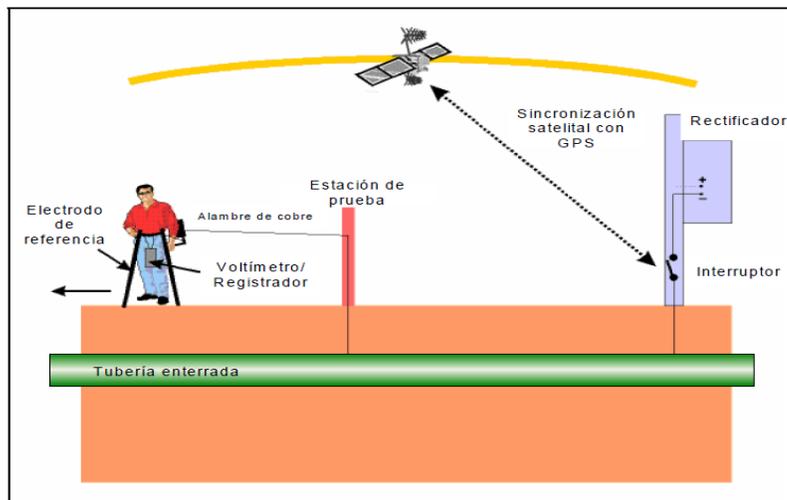
¹⁸ EMPRESA DE INGENIERÍA EN INTEGRIDAD DE DUCTOS. Auditoría de sistemas de protección catódica y estados de conservación de revestimientos anticorrosivos en gasoductos y oleoductos. [En línea].

Figura 8. Potencial OFF



Los potenciales ON permite evaluar el estado del revestimiento de la tubería, teniendo en cuenta varios aspectos como; un potencial estable lo que quiere decir que existe una diferencia constante entre los potenciales “ON-OFF”, reducción en la diferencia entre los perfiles de potenciales “ON-OFF” y en el perfil de potencial en las zonas donde existen defectos se presentan valles, el tamaño de estos es proporcional a la severidad de los defectos.

Figura 9. Configuración CIPS



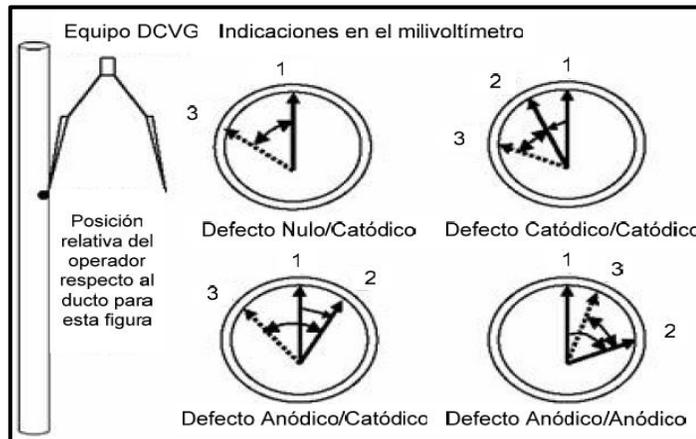
Fuente: BALETA JIMENEZ, Fabian José y JACANAMIJOY, Wilmer Arrieta. Desarrollo de una metodología para la evaluación directa de la corrosión exterior para ser usada como alternativa para determinar la integridad de tuberías usadas en el transporte de hidrocarburos. Bucaramanga, 2007, 144 h. Trabajo de grado (Ingeniero de petróleos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas.

1.3.5.2 Técnica de inspección de gradiente de Voltaje (DCVG). Se desarrolla para el análisis de los defectos del revestimiento en tuberías subterráneas, mediante una inspección basada en la técnica de registro de potenciales en la tierra sobre la tubería con protección catódica y la determinación de la dirección del flujo de la corriente que está directamente relacionado con la sensibilidad del voltímetro.

La técnica DCVG se pueden llevar a cabo de dos maneras, la primera de modo perpendicular, en donde se dibuja una línea imaginaria entre los electrodos de referencia en la superficie del suelo de forma perpendicular a la dirección de la tubería y en la segunda de modo lineal o paralelo, en esta manera la línea imaginaria es dibujada entre los electrodos de referencia, estará de forma paralela con el centro directamente sobre la tubería.

La sensibilidad de los instrumentos permite localizar los defectos más pequeños aproximadamente de 10 cm y la gravedad del defecto hace relación a la amplitud de gradiente de voltaje, entre el epicentro del defecto y la tierra. Según el tamaño del efecto se clasifica en cuatro categorías como se evidencia en la tabla 1; donde la categoría unos se consideran críticos y la categoría cuatro no se consideran importantes¹⁹

Figura 10. Indicaciones de la aguja del milivoltímetro del DCVG



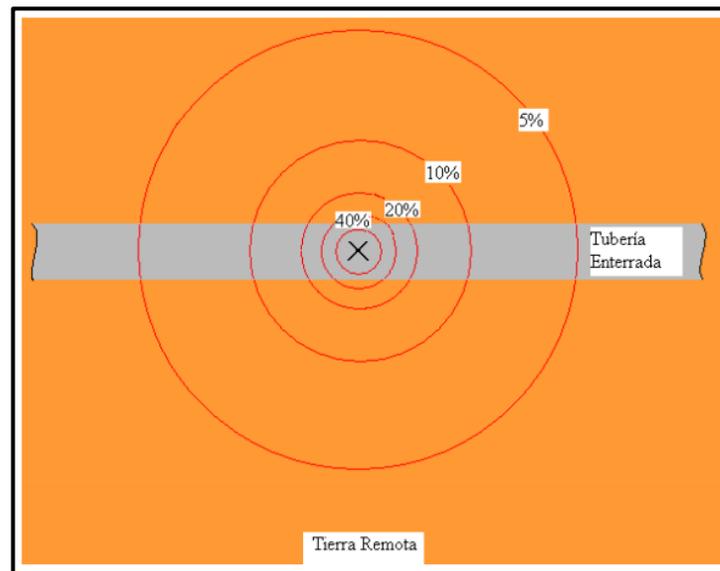
Fuente: BALETA JIMENEZ, Fabian José y JACANAMIJOY, Wilmer Arrieta. Desarrollo de una metodología para la evaluación directa de la corrosión exterior para ser usada como alternativa para determinar la integridad de tuberías usadas en el transporte de hidrocarburos. Bucaramanga, 2007, 144 h. Trabajo de grado (Ingeniero de petróleos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas.

¹⁹ EMPRESA DE INGENIERÍA EN INTEGRIDAD DE DUCTOS. Auditoría de sistemas de protección catódica y estados de conservación de revestimientos anticorrosivos en gasoductos y oleoductos. [En línea].

Por otra parte, en la figura 8 la posición y el movimiento de la aguja en el equipo DCVG permite determinar el comportamiento del defecto, ya sea catódico – catódico, catódico – anódico y anódico – anódico. Este carácter y el porcentaje de severidad que se clasifican en la tabla 1 establecen las medidas a tomar sobre el defecto encontrado.

Debido a que el sitio del defecto está rodeado de suelo, se presenta un gradiente de voltaje por el alto flujo de corriente hacia el defecto, el potencial al nivel del suelo sobre la tubería puede ser significativamente mayor que cero. Esto se conoce como la tierra remota y se ejemplifica en la figura 11, en la cual se puede evidenciar la perturbación del defecto donde la explicación se da por medio de una serie de esferas concéntricas y en cada superficie de las esferas tiene un potencial constante.

Figura 11. Gradiente de potencial en la superficie del suelo asociado con un defecto



Fuente: MILLER, M. Manual de entrenamiento DCVG – versión Gx Estados Unidos. 2015; p. 8.

En la figura 11, la x es el defecto localizado en la tubería enterrada y los círculos concéntricos equipotenciales con los gradientes sobre la superficie de la tierra que aparecen como consecuencia del defecto, entre más cerca del defecto los círculos estarán estrechamente separadas y al alejarse del epicentro el potencial caerá cada vez más al alejarse, obteniendo una disminución de la caída del potencial hasta llegar a una diferencia constante o máximo del 5%. Esto se realiza desde donde se localiza el defecto hasta una distancia, dejando un electrodo de referencia y avanzando hacia un hemisferio de la tubería aproximadamente por metro.

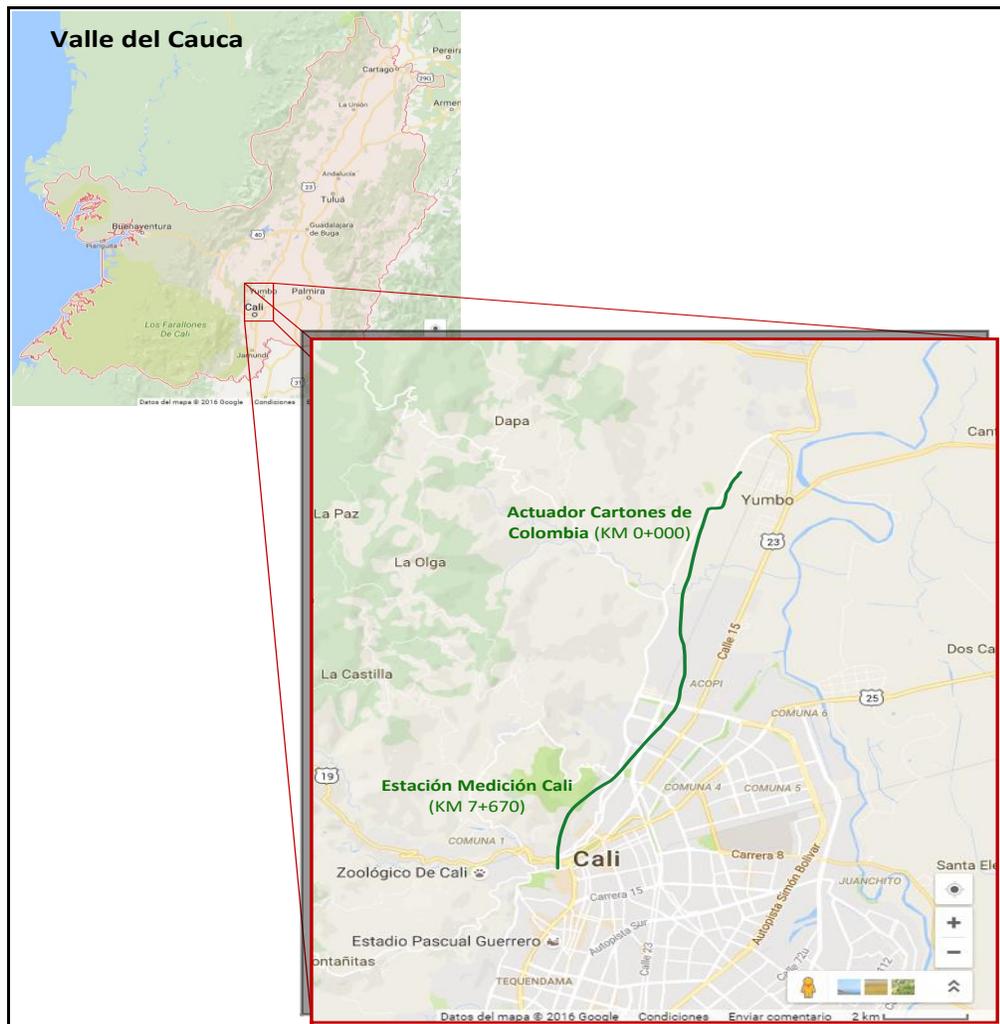
A continuación se presentan los datos obtenidos de las técnicas CIPS y DCVG tanto en el año 2013 como en el 2016, diagnosticando el estado de corrosión en cada año respectivamente, teniendo en cuenta los defectos presentes y el comportamiento corrosivo, posteriormente se realiza un análisis del suelo, (ver página 65), donde se tienen en cuenta 5 factores en los que se encuentran cloruros, carbonatos, potencial redox, sulfatos y sulfuros; para analizar simultáneamente el comportamiento del suelo con respecto al gasoducto ubicado en la vía férrea entre Cali y Jumbo, enterrado aproximadamente 1,2 metros. Se analiza todas las mediciones simultáneamente para poder determinar el comportamiento de la corrosión a través de la tubería.

2. DIAGNÓSTICO ESTADO DE CORROSIÓN EXTERNA PARA EL AÑO 2013

En este capítulo se realiza una recopilación de los datos, donde se presenta por medio de gráficas los datos obtenidos de la técnica CIPS y con tablas los datos de la técnica DCVG, se determina el estado del gasoducto por medio del cálculo del porcentaje de severidad en los defectos localizados a lo largo de la tubería, cabe aclarar que el comportamiento corrosivo de los defectos encontrados es muy importante para poder diagnosticar el estado en el que se encuentra el gasoducto y posteriormente tomar las medidas adecuadas.

Es importante tener en cuenta la ubicación del gasoducto, en la figura 12 se presenta un mapa de localización en donde se encuentran dos puntos principales del gasoducto en estudio.

Figura 12. Ubicación del gasoducto



2.1 DATOS OBTENIDOS EN EL 2013

Como se ha venido desarrollando se sabe que los fenómenos de corrosión externa en tuberías son de gran importancia, es por esto que se deben implementar programas de operación y mantenimiento, para garantizar el estado del recubrimiento, evaluar los cambios que este sufre a lo largo del tiempo y evidenciar los factores que afectan la probabilidad de que exista corrosión.

De acuerdo con lo expuesto en el capítulo anterior, es de suma importancia para la industria petrolera y específicamente para la de gas, implementar programas de operación y mantenimiento para minimizar la probabilidad de que ocurran los fenómenos de corrosión externa en tuberías garantizando el estado de recubrimiento, evaluando los cambios que este sufre a través del tiempo e identificar los factores que la originan.

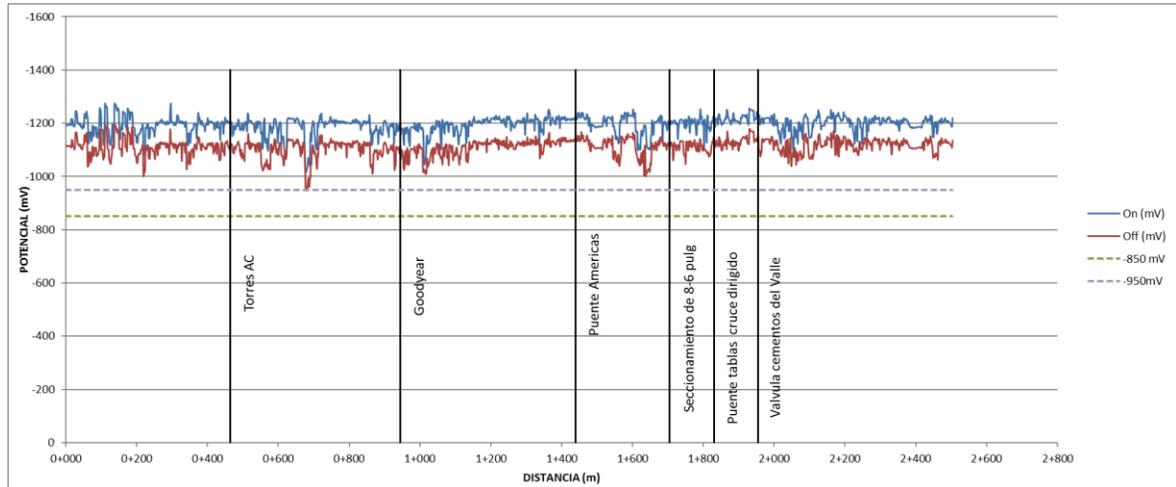
Por tanto, es pertinente realizar una evaluación del estado de corrosión externa mediante las técnicas Direct Current Voltage Gradient (DCVG), Close Interval Potencial Survey (CIPS); lo que permite identificar el estado en el que se encuentra el gasoducto y comparar los resultados a través del tiempo.

2.1.1 Datos CIPS. La inspección CIPS es una técnica de medida de potenciales de polarización “paso a paso” para una tubería enterrada con intervalos definidos por el inspector no mayores a 2 metros, también cabe señalar que la eficiencia para localizar una falla es función de la distancia entre cada medición y está directamente relacionado con el potencial obtenido. Este método se usa generalmente para evaluar el estado de protección catódica, ubicar posibles daños del revestimiento y para detectar interferencias, ya sean por corrientes foráneas o telúricas.

Según la Nace RP-0169-02 el potencial de una tubería versus la distancia debe estar entre -850 mV y -1140 mV, es decir, potenciales “off” por debajo de (-850 mV) muestran que los niveles de polarización donde existe la probabilidad de corrosión en la superficie externa de la tubería son inadecuados y los potenciales “off” encima de (-1140 mV) indican una polarización excesiva que resulta sumamente perjudicial para el revestimiento del gaseoducto, debido a que se presenta un despegue catódico. Hay que mencionar además que en el recorrido de la tubería existen la presencia de bacterias sulfato-reductoras, por tal motivo los niveles de protección catódica deben estar en -950mV para el potencial Off mínimo de polarización sugerido en el estándar NACE SP0169-07.

A continuación, se recopilan los datos que se midieron en el año 2013, en la figura 13, se establecen los puntos de referencia en cuanto a la ubicación del gasoducto para la regional 1. En el anexo A se encuentran las mediciones para cada uno de los tramos de estudio, entre los cuales están las troncales 2 – 2, troncal 1 – 2 y regional 2 respectivamente.

Figura 13. Monitoreo de Potenciales CIPS sin corrección Regional 1 (2013)



Fuente: Procorr S.A.S

En la figura 13 se evidencia el perfil de potencial CIPS para la regional 1, el potencial Off se encuentra dentro del rango establecido por la NACE (-850 mV y -1140 mV) y que se ha explicado anteriormente. Por otra parte, hay que tener en cuenta que los potenciales de protección catódica tomados durante la inspección CIPS deben ser corregidos, debido a que muestran un ingreso de corriente foránea a la tubería, alterando los niveles de protección catódica, esto se evidencia en la variación de los datos medidos en los potenciales tomados paso a paso durante la inspección en el data logger fijo

Para realizar la corrección de los datos el método que se recomienda consiste en trabajar con 3 data loggers, estos son registradores de datos que permiten supervisar valores de potencial en una zona específica de los cuales dos están fijos y uno móvil relevando datos paso a paso.²⁰ En el caso de la inspección CIPS para el gasoducto en estudio, se utilizaron dos data loggers y procedimiento de realizó de la siguiente manera:

- Se obtiene una línea base que es un promedio de todos los datos On y Off del data logger fijo.
- Se relacionan los datos obtenidos paso a paso con los del data logger fijo, sincronizando la hora de inicio para cada uno de los equipos. Almacenando los datos cada dos segundos.
- Con la línea base y la relación anterior se calcula la “actividad” que es la diferencia entre la línea base y el dato tomado paso a paso.

²⁰ OWEN, Sneath y TREVOR, place. Practical Telluric Compensation for Pipeline Close-Interval Surveys. En: onepetro [base de datos en línea]. (maz.2000); p.5 [citado en 27 de mayo de 2016] Disponible en Onepetro.

- Se calcula una “ponderación”, conociendo el abscisado, inicial y final del data logger móvil y del data logger fijo; para utilizar alguna de las siguientes correlaciones.

Ecuación 6. Correlación cuando el inspector está aguas arriba del data logger fijo

$$P = \frac{(x_2 - xx)}{(x_2 - x_1)}$$

Fuente: PROCORR S.A.S. Manual interno de procedimiento. Bogotá, Colombia: 2000. p. 69.

Ecuación 7. Correlación cuando el inspector esta aguas abajo del data logger fijo

$$P = \frac{(xx - x_1)}{(x_2 - x_1)}$$

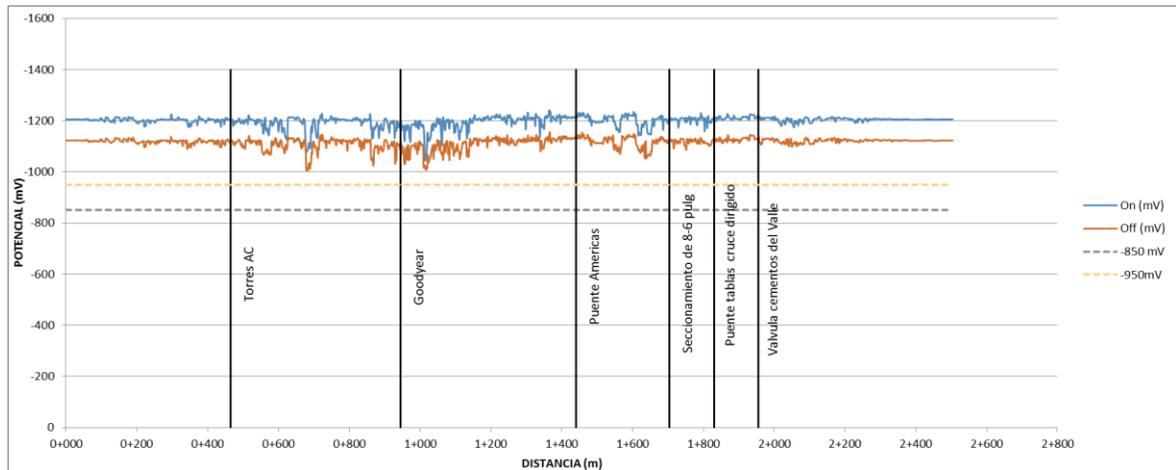
Fuente: PROCORR S.A.S. Manual interno de procedimiento. Bogotá, Colombia: 2000. p. 69.

Donde:

- ✓ xx: es la posición del inspector que lleva el data logger móvil.
- ✓ X₁: posición inicial
- ✓ X₂: posición final
- Luego de esto se calcula la “contribución”, que es el producto entre la actividad y la ponderación.
- Para finalizar la corrección se hace con la suma de la contribución tanto para On y Off a los datos sin corregir, obteniendo así un nuevo potencial On y Off corregidos.

Desarrollando el procedimiento anterior se obtiene la figura 14 de CIPS corregido para la regional 1, en ella se enseña el comportamiento de los potenciales eléctricos On (en azul) y Off (en rojo) a lo largo del tramo del gasoducto; esta información puede ser empleada para obtener un perfil de los niveles de protección catódica e identificar las áreas donde exista problemas en el recubrimiento, interferencias, cortos y niveles bajos de protección; cabe mencionar que en el Anexo 1 se encuentran las correcciones de CIPS para cada uno de los tramos de estudio, entre los cuales están las troncales 2 – 2, troncal 1 – 2 y regional 2.

Figura 14. Monitoreo de Potenciales CIPS corregidos Regional 1



Fuente: Procorr S.A.S

En la figura 14, se evidencia el perfil de potencial CIPS para la Regional 1, el potencial Off se encuentra dentro del rango de -850mV y -1150mV; es decir que no existe una suficiente polarización y no se perjudica el revestimiento por despegue catódico, es decir para este caso está protegido. La variación de potenciales On – Off presenta una estabilidad si existe una protección adecuada del revestimiento o zonas donde hay probables defectos en el gasoducto; en la figura 11 se presentan valles en el perfil de potencial esto se relaciona directamente con los defectos, siendo proporcionales el tamaño de los valles con la severidad de este; es indispensable mencionar que existen valles que no están en el punto exacto donde se localiza el defecto, esto se genera debido a que se presentan interferencias por corrientes telúricas.

En el anexo B se evidencian los cambios por la influencia de corrientes telúricas, en el anexo G se exhiben las variaciones más severas esto se presenta cuando la inspección CIPS pasan por la estación de monitoreo Sidelpa y la estación de medición de Cali; este cambio se confirma por el resultado que expone el data logger el cual presenta un incremento en los potenciales (On y Off) lo que ratifica el ingreso de una corriente a la tubería.

2.1.2 Datos DCVG. La inspección DCVG evalúa el estado del recubrimiento de la tubería, detectando fallas que estén en contacto directo con el electrolito; los datos que se presentan fueron tomados en el año 2013 y están expuestos de la tabla 3 a la tabla 6, donde se especifican por regionales y troncales. Es indispensable clasificar el defecto según la severidad y el comportamiento como se explica a continuación.

La relación entre el porcentaje de severidad y la cantidad del daño en el revestimiento depende de varios factores; entre los cuales se puede considerar la resistividad del terreno, la protección que tiene la tubería, la localización,

interferencias del medio, entre otras. Por esta razón se establece una clasificación, que se puede evidenciar en la tabla 1, esta tiene unos rangos en cada categoría y según esto se realiza la corrección que sea adecuada para cada defecto. Otro aspecto que se debe tener en cuenta a la hora de reparar un defecto es el comportamiento corrosivo, esta clasificación se exhibe en la tabla 2 en donde se presentan tres clasificaciones diferentes: catódico – catódico, catódico – anódico y anódico – anódico.

Tabla 1. Severidad de los defectos y consideraciones de reparación

%IR SEVERIDAD DEL DEFECTO	CLASIFICACIÓN GENERAL	ACCIÓN PROPUESTA
0	Recubrimiento Perfecto	Ninguna
1 – 15	Pequeña Severidad	No requiere reparación
16 – 35	Severidad Media	Considerar reparación
36 – 60	Severidad Media / Grande	Requiere reparación
61 – 100	Severidad Grande	Reparación Inmediata
100	Área de Acero expuesto de Gran Tamaño	Reparación e investigación inmediata

Fuente: PROCORR S.A.S. Manual interno de procedimiento. Bogotá, Colombia: 2000. p. 67.

Tabla 2. Comportamiento de los defectos

COMPORTAMIENTO	ESTADO
Catódico – Catódico	PC apagada (OFF) y PC encendida (ON), el defecto siempre está protegido.
Catódico – Anódico	El defecto está protegido cuando la URPC (Unidades rectificadores de la protección catódica) está en operación, pero desprotegida cuando está apagada. PC (OFF) desprotegido y PC (ON) protegido.
Anódico – Anódico	PC (OFF) y PC (ON), el defecto no está protegido en ningún caso.

Fuente: PROCORR S.A.S. Manual interno de procedimiento. Bogotá, Colombia: 2000. p. 69.

En la tabla 3, se evidencian los datos tomados en el año 2013, en esta se realiza una descripción que hace referencia al lugar específico en donde se efectuó la inspección, pK (m) es la distancia de medición respecto al gasoducto, el potencial en tierra remota (ON – OFF), gradiente de potencial (ΔP), total en el cual se tiene en cuenta T remota, valoración del comportamiento (anódico – catódico), %IR (Porcentaje de severidad). A continuación, se describen los cálculos ejecutados para obtener cada uno de los parámetros.

Para que el procedimiento quede claro es indispensable mostrar un cálculo, por eso se va a tomar como ejemplo el inicio del actuador cartón de Colombia que se encuentra en la regional 1 y está localizado al inicio del gasoducto (pK=0 Km), de esta zona se obtienen los siguientes datos:

- Potencial On=1133 mV
- Potencial Off=898 mV
- $\Delta P=235$ mV

Estos potenciales se establecen de la siguiente manera, el potencial on medido en la estructura (utilizando un electrodo de referencia e instrumental calibrado), para este caso es de cobre/sulfato de cobre, cuando la protección se encuentra activada y se han estabilizado las variables. El potencial off medido durante el intervalo de corte del interruptor sincronizado, cabe aclarar que es un interruptor de corriente continua o alterna que tiene la capacidad de reproducir una función periódica en el tiempo; el tiempo de conducción se denomina ON y el de interrupción OFF; en este tipo de inspección la frecuencia que se usa es de en la proporción de 1/3 encendido (ON) y 2/3 apagado (OFF).²¹

El total es la suma entre el gradiente de potencial y la tierra remota, esta es la medida completa del gradiente de voltaje ocasionada por el defecto y tiene relación directa con la magnitud del mismo; el flujo de corriente depende de la magnitud del defecto y de la cercanía que este tiene con al punto de drenaje de corriente,²² este procedimiento se realiza con dos electrodos que se ubican en el suelo y se mueven en sentido de la variación del potencial, como se ilustra en la figura 9, uno de estos se localiza en el epicentro de gradiente de voltaje y el otro se desplaza hasta llegar a la magnitud de la tierra remota; cabe señalar que la tierra remota no se determina para algunos defectos, puesto que su valor no es significativo por la variación que este tiene sobre el medio.

Para valorar el comportamiento del defecto se tiene en cuenta la figura 8 donde se encuentran las diferentes posiciones de la aguja del equipo DCVG y según el movimiento de las estas se puede clasificar el defecto de la siguiente manera.

- Si es nulo/catódico la aguja está en el valor cero del medidor y se desplaza a la zona catódica.
- Si es catódico/catódico la aguja siempre se desplaza hacia zona catódica.

²¹ PROCORR S.A.S. Manual interno de procedimiento. Bogotá, Colombia: 2000. p. 160.

²² CUBILLOS PACHÓN, Yeni Carolina. Implementación de la integridad de corrosión en ductos de transporte de hidrocarburos para Tecnología total LTDA. Bogotá, 2006, 240 h. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Departamento de Ingeniería Química.

- Si es anódico/catódico la aguja está en el valor cero del medidor, luego se desplaza hacia la zona anódica y por último permanece en la posición en la zona catódica.
- Si es anódico/anódico la aguja está en el valor cero del medidor y se desplaza a la zona anódica.

En la tabla 2 y con las características nombradas anteriormente se puede evidenciar el comportamiento, las variaciones que existen en los potenciales On – Off y la protección del defecto según su estado.

La amplitud de la señal de la Tubería a Tierra Remota (P/RE) en el defecto se calculará a partir de las medidas eléctricas obtenidas durante el reconocimiento usando la ecuación 8:

Ecuación 8. Amplitud de la señal de la tubería a tierra remota

$$\frac{P}{RE} = S_1 + \frac{d_x(S_1 - S_2)}{(d_2 - d_1)}$$

- S_1 = Amplitud de la Señal de DCVG a Tierra Remoto en la Caja de Medida de Potenciales 1.
- S_2 = Amplitud de la Señal de DCVG a Tierra Remoto en la Caja de Medida de Potenciales 2.
- d_1 = Distancia de la Caja de Medida de Potenciales 1 (Esta distancia será cero en el inicio de la Tubería).
- d_2 = Distancia de la Caja de Medida de Potenciales 2.
- d_x = Distancia del defecto medida desde la Caja de Medida de Potenciales 1.

Mediante la ecuación 8, se desarrolla el siguiente cálculo entre el inicio de actuador Cartón Colombia y la estación de monitoreo (Puente Américas)

$$\frac{P}{RE} = 238 \text{ mV} + \frac{(-238 \text{ mV} + 219 \text{ mV})(0 \text{ Km} - 0 \text{ Km})}{(1439 \text{ Km} - 0 \text{ Km})}$$

$$\frac{P}{RE} = 238 \text{ mV}$$

La severidad (%IR) de cada defecto del revestimiento se calculará a partir de la ecuación 9, teniendo en cuenta las mediciones eléctricas realizadas durante la inspección de DCVG.

Ecuación 9. Porcentaje de severidad

$$\% IR = \frac{(Amplitud\ de\ la\ señal\ del\ epicentro\ a\ tierra\ remota) * 100}{Amplitud\ de\ la\ señal\ de\ la\ tubería\ a\ tierra\ remota\ calculada\ en\ el\ defecto}$$

Fuente: PROCORR S.A.S. Manual interno de procedimiento. Bogotá, Colombia: 2000. p. 78.

Es decir,

Ecuación 10. Porcentaje de severidad

$$\% IR = \frac{\left(\frac{OL}{RE}\right) * 100}{\frac{P}{RE}}$$

Fuente: PROCORR S.A.S. Manual interno de procedimiento. Bogotá, Colombia: 2000. p. 78.

Mediante la ecuación 10, se determina el valor del porcentaje de severidad teniendo en cuenta que la relación (OL/RE); es el potencial a tierra remota sobre la línea de estudio, la toma de este dato depende directamente de la variación del pulso con la distancia. A continuación, se describe el cálculo del porcentaje de severidad para el defecto 1 frente al poste de Cupón, este se encuentra entre el inicio del actuador Cartón Colombia y la estación de monitoreo (Puente Américas).

$$\% IR = \frac{(3\ mV) * 100}{238\ mV}$$

$$\% IR = 1,3\ \%$$

Es importante mencionar que en la tabla 3 se efectúa el cálculo del porcentaje de severidad para la Regional 1, el 16,67% de estos porcentajes no se tienen en cuenta como defectos por las razones que se explican a continuación. Las causas que genera esta selección es la instalación de una soldadura exotérmica, esta consiste en hacer conexiones eléctricas de cobre a cobre o de cobre a acero sin requerir ninguna fuente exterior de calor o de energía. Este proceso de ignición de las partículas (reacción exotérmica) produce una temperatura superior a 1400 °C y en consecuencia la liberación de humo localizado.²³ Teniendo en cuenta lo anterior, se

²³ PILLAJO PILLAJO, Gonzalo J. Diagnóstico y propuesta de mejoramiento del sistema de puesta a tierra existente en el laboratorio del centro de metrología del ejército ecuatoriano. Sangolquí, 2013. Trabajo de grado (Tecnología en Electromecánica). Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Departamento de Eléctrica y Electrónica.

puede decir que el aumento de temperatura se debe a una serie de aspectos que se describen a continuación:

- Adsorción de un componente gaseoso
- Disociación de la molécula gaseosa y transferencia de electrones
- Nucleación y crecimiento de cristales
- Difusión y transporte de cationes, aniones y electrones a través de la costra

En este caso la temperatura de fusión genera un aumento en la misma, lo que produce un crecimiento acelerado de la costra a través del tiempo, dejando expuesta la superficie al medio exterior. Siendo la oxidación un proceso cinético es de esperarse que se cumpla la ecuación 11 tipo Arrhenius, que se enuncia a continuación.

Ecuación 11. Relación tipo Arrhenius

$$K = K_o e^{\left(\frac{-Q}{RT}\right)}$$

Fuente: AVERY, H. Cinética química básica y mecanismos de reacción: Cinética química. Barcelona: Editorial Reverte S.A, 1982. 256 p. ISBN 84-291-7030-8.

Entendiendo como polarización, el cambio en el potencial de un electrodo a medida que la corriente fluye de o hacia él. La polarización disminuye la diferencia de potencial entre las superficies anódica y catódica, causando una reducción en la corriente de corrosión y en la velocidad de corrosión.²⁴ Enfocando estos conceptos hacia la corrosión se puede decir que, la velocidad de corrosión tiende a aumentar con la temperatura, por lo tanto, a mayor temperatura se reduce la polarización de la tubería, generando un aumento en el requerimiento de corriente.²⁵

A continuación, se evidencian los datos de la inspección DCVG para el año 2013 estos están divididos por regionales y tramos, es decir por la ubicación en la que se encuentran respecto al gasoducto.

²⁴ UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES. Trabajos prácticos de laboratorio [en línea] <http://materias.fi.uba.ar/6303/TPN3.pdf> [citado en 21 de marzo de 2016]

²⁵ MARTINEZ VILLAFAÑE, A. CHACÓN NAVA, J. ALMERAYA CALDERÓN, F. Oxidación de alta temperatura [en línea] <<http://depa.fquim.unam.mx/labcorr/libro/OXIDACIONALTATEMPERATURA.PDF>> [citado en 21 de marzo de 2016]

Tabla 3. Datos DCVG Regional 1 para el año 2013

DESCRIPCIÓN	pK (m)	POTENCIAL Y TIERRA REMOTA					OL/RE mV	VALORACION (ANODICO O CATODICO)		SEVERIDAD	
		ON	OFF	ΔP	T REMOTA	TOTAL		ON (mV)	OFF(mV)	P/RE	%IR
Inicio actuador Cartón Colombia	0+000	1133	898	235	3	238	-	-	-	238,0	-
DEF1 frente a poste cupón	0+003	-	-	0	-	0	3	2,4A	4,4A	238,0	1,3%
DEF2 Torres AC	0+466	-	-	0	-	0	4	1,8A	1,6A	231,8	1,6%
Estación de Monitoreo (Puente Américas)	1+439	1115	896	219	-	219	-	-	-	219,0	-
Seccionamiento de 8" a 6"	1+704	-	-	0	-	0	-	-	-	218,3	-
DEF3	1+794	-	-	0	-	0	7	1C	0C	218,0	3,2%
Estación de Monitoreo L6	1+806	1144	926	218	-	218	-	-	-	218,0	-
DEF4 caño de aguas negras cruce dirigido	1+852	-	-	0	-	0	2	1,8C	2C	219,3	0,7%
DEF5	1+943	-	-	0	-	0	2	-	-	221,9	0,8%
Caja válvula cementos del Valle	1+955	-	-	0	-	0	14	-	-	222,3	6,3%
Estación de Monitoreo Cartón Colombia	2+500	1141	905	236	2	238	-	-	-	238,0	-
Válvula de entrega Cartón Colombia	2+505	-	-	0	-	0	-	-	-	238,0	-

Fuente: Procorr S.A.S

Si se realiza la respectiva clasificación para la Regional 1, como se muestra en la tabla 3, se obtiene que hay seis porcentajes de severidad de los cuales el 83,33% de estos se consideran defectos y se encuentran en la categoría de 1 – 15%, es decir corresponde a una pequeña severidad que no requiere reparación; cabe aclarar que el defecto 5 está directamente relacionado con el defecto 4, es decir el comportamiento es similar, debido a que la distancia que hay entre ellos es menor a 100 m. Existe un porcentaje de severidad que no se toma como defecto, esto se debe a que en la caja de válvula de cementos del Valle se instaló una soldadura exotérmica.

Tabla 4. Datos DVCG Troncal 2-2 para el año 2013

DESCRIPCION	pK (m)	POTENCIAL Y TIERRA REMOTA					OL/RE mV	VALORACION (ANODICO O CATODICO)		SEVERIDAD	
		ON	OFF	ΔP	T REMOTA	TOTAL		ON (mV)	OFF(mV)	P/RE	%IR
Inicio Km 3+200 Estacion de	3+143	1178	879	299	3	302	-	-	-	243,0	-
Estacion de Monitoreo	2+110	1143	900	243	-	243	-	-	-	243,0	-
Gradiente Anodo	2+106	-	-	0	-	0	22	3,5A	2,5A	243,0	9,1%
DEF6	1+608	-	-	0	-	0	11	0,8A	2C	241,6	4,6%
Estacion de Monitoreo Propal	1+401	1132	891	241	-	241	-	-	-	241,0	-
DEF7	1+308	-	-	0	-	0	2,5	1,6A	2,0A	240,0	1,0%
DEF8	1+230	-	-	0	-	0	0,8	0,6C	0,2C	239,2	0,3%
DEF9	1+200	-	-	0	-	0	0,5	0,3C	0,1C	238,9	0,2%
Actuador Carton Colombia	1+020	1117	882	235	2	237	-	-	-	237,0	-
DEF10 debajo de pavimento	0+750	-	-	0	-	0	1,5	-	-	237,0	0,6%
DEF11 pavimento	0+432	-	-	0	-	0	2	3,6A	3A	236,5	0,8%
PK 0+280	0+249	1111	875	236	-	236	-	-	-	236,0	-
PK 0+217	0+183	-	-	0	-	0	-	-	-	234,5	-
DEF12 antes de cruce caño aguas	0+143	-	-	0	-	0	5	0,2C	0C	233,5	2,1%
Estacion de Monitoreo 0+150	0+121	1088	857	231	2	233	-	-	-	233,0	-
DEF13 Asociado a cables de estación	0+090	-	-	0	-	0	14	-	-	137,1	10,2%
Estacion de Monitoreo 0+120	0+089	1119	985	134	-	134	-	-	-	134,0	-
DEF14	0+035	-	-	0	-	0	2,2	4C	1C	121,3	1,8%
DEF15	0+020	-	-	0	-	0	9	3C	4C	117,7	7,6%
DEF16 salida del tubo City Gate	0+000	673	562	111	2	113	60	30C	16C	113,0	53,1%

Fuente: Procorr S.A.S

Para la troncal 2 – 2 la respectiva clasificación se evidencia en la tabla 4, hay doce porcentajes de severidad de los cuales el 91,67% se toman como defectos y se

encuentran repartidos de la siguiente manera, 83,33% en la categoría de 1 – 15%, es decir corresponde a una pequeña severidad que no requiere reparación; 8,33 % en la categoría 36 – 60%, en otras palabras, requiere reparación, hay que mencionar, además que en esta zona se encuentra el defecto con mayor porcentaje de severidad (53,1%) en todo el gasoducto. Existe un porcentaje de severidad que no se toma como defecto, esto se debe a que en la estación de monitoreo hay un gradiente de voltaje por la instalación de una soldadura exotérmica.

Tabla 5. Datos DVCG Troncal 1 – 2 para el año 2013

DESCRIPCION	pK (m)	POTENCIAL Y TIERRA REMOTA					OL/RE mV	VALORACION (ANODICO O)		SEVERIDAD	
		ON	OFF	ΔP	T REMOTA	TOTAL		ON (mV)	OFF(mV)	PIRE	%IR
ESTACION DE MEDICION CALI	7+670	-	-	0	2	0	115	-	-	235,1	48,3%
Estación de Monitoreo TSO 7+650	7+668	1099	863	236	-	236	-	-	-	236,0	-
Gradiente ánodos 7+500	7+520	-	-	0	-	0	3	1,6A	1A	299,9	1,0%
Estación de Monitoreo Sidelpa TSO	7+346	1236	861	375	2	375	-	-	-	375,0	-
Estación de monitoreo Sidelpa	7+346	1266	907	359	3	362	-	-	-	362,0	-
DEF17	7+318	-	-	0	-	0	15,0	0C	3C	360,9	4,2%
DEF18 Centro de caño	6+690	-	-	0	-	0	3	-	-	336,1	0,3%
Gradiente Válvula de entrega MAC	6+676	-	-	0	-	0	1,2	-	-	335,5	0,4%
DEF 19 Debajo de árbol	6+580	-	-	0	-	0	1,2	1,4C	1C	331,7	0,4%
Gradiente Actuador	6+504	-	-	0	-	0	0,8	-	-	328,7	0,2%
DEF20 Gradiente Cruce de Pavimento cerca a MAC	6+440	-	-	0	-	0	4	-	-	326,2	1,2%
DEF21	6+255	-	-	0	-	0	1	C0,7	C0,4	318,9	0,3%
Válvula de entrega Cr 34	6+177	-	-	0	-	0	1,2	-	-	315,8	0,4%
DEF22 caño	6+061	-	-	0	-	0	9	5C	2,5A	311,2	2,3%
Estación de monitoreo caño	6+056	1190	881	309	2	311	-	-	-	311,0	-
Estación de monitoreo km 5+500	5+500	1190	881	309	-	309	-	-	-	300,7	-
DEF23	5+297	-	-	0	-	0	6	4C	3C	296,9	2,0%
DEF24 Km 4+500 cerca a CV Lloreda	4+536	-	-	0	-	0	70	76C	10A	282,8	24,8%
Gradiente Ánodo Zn 4+450	4+439	1166	876	290	-	290	8	3A	6,5A	281,0	2,8%
Gradiente Ánodo Zn 4+400	4+354	1159	891	268	-	268	15	4A	2A	279,4	5,4%
Gradiente Ánodo Zn 4+300	4+266	1170	901	269	-	269	22	15A	20A	277,8	7,3%
Gradiente Ánodo Zn 4+100	4+181	1147	881	266	-	266	11	0,4A	4A	276,2	4,0%
Actuador 3+764	3+764	1140	870	270	-	270	1,2	-	-	268,5	0,4%
Estación de Monitoreo Km 3+200	3+200	1146	890	256	2	258	-	-	-	258,0	-

Fuente: Procorr S.A.S

Para la troncal 1 – 2 la respectiva clasificación se muestra en la tabla 5, hay dieciocho porcentajes de severidad de los cuales el 44,44% se asignan como defectos y se encuentran repartidos de la siguiente manera, el 38,88% en la categoría de 1 – 15%, es decir corresponde a una pequeña severidad que no requiere reparación y el 5,55% en la categoría 16 – 35%, en efecto, se debe considerar una posible reparación; cabe señalar que la mayoría de los defectos se encuentran en el kilómetro 6 y que en esta zona no se encuentran un comportamiento con carácter anódico – anódico. El 55,56% de los porcentajes de severidad no se toman como defectos, entre los cuales se encuentran: la estación de monitoreo, los gradientes de ánodos, gradiente de válvula y gradiente de actuador, esto se debe a que se presenta una diferencia de voltaje o por la instalación de una soldadura exotérmica.

Tabla 6. Datos DCVG Regional 2 para el año 2013

DESCRIPCION	pK (m)	POTENCIAL Y TIERRA REMOTA					OL/RE mV	VALORACION (ANODICO O CATODICO)		SEVERIDAD	
		ON	OFF	ΔP	T REMOTA	TOTAL		ON (mV)	OFF(mV)	P/RE	%IR
Válvula Acopi (Gradiente de Voltaje)	8+370	-	-	0	-	0	6	-	-	868,9	0,7%
Estación de Monitoreo	8+368	1664	795	869	3	869	-	-	-	869,0	
Válvula entrega Acopi (Gradiente de Voltaje)	8+325	-	-	0	-	0	2,5	-	-	870,1	0,3%
DEFECTO25	8+303	-	-	0	-	0	3	24C	23C	870,6	0,3%
DEFECTO26	8+250	-	-	0	-	0	110	30C	14A	872,0	12,6%
DEFECTO27	8+112	-	-	0	-	0	1,8	4,5C	5C	875,5	0,2%
DEFECTO28	7+963	-	-	0	-	0	1	0,4C	0,5C	879,2	0,1%
DEFECTO 29	7+948	-	-	0	-	0	12	5C	8C	879,6	1,4%
PK 0+000 GDO	7+733	1650	765	885	2	885	-	-	-	885,0	-

Fuente: Procorr S.A.S

Si se realiza la respectiva clasificación para la Regional 2, como se exhibe en la tabla 6, se obtiene que hay siete porcentajes de severidad de los cuales el 71,42% de estos se consideran defectos y se encuentran en la categoría de 1 – 15%, es decir pertenecen a una pequeña severidad que no requiere reparación; se debe agregar que en esta zona no hay presencia del estado anódico – anódico de los defectos y que se encuentra uno de los defectos con mayor porcentaje de severidad (12,6%) a lo largo del gasoducto. El 28,57% de los porcentajes de severidad no se toman como defectos, esto se debe a que en las válvulas Acopi muestran una diferencia en el voltaje (gradiente) o por la instalación de una soldadura exotérmica.

En la tabla 7 se muestra un consolidado de los defectos encontrados a lo largo del gasoducto, clasificándolos por categorías y por el comportamiento de los defectos; se tienen 27 (93,10%) defectos en la severidad pequeña, un (3,45%) defecto en la severidad media y un (3,45%) defecto en la severidad media/grande; para un total de 29 defectos. Lo que permite indicar que el estado de corrosión en el que se encuentra el gasoducto teniendo en cuenta el comportamiento corrosivo, debido a que los defectos encontrados no están en categorías severas o requieren una intervención inmediata para generar una excavación y analizar directamente en la tubería la presencia de corrosión, lo que permite determinar que no hay presencia de corrosión avanzada, se recomienda realizar un monitoreo para controlar la evolución de los defectos.

Tabla 7. Consolidado de defectos 2013

CATEGORIA	DEFECTO	%SEVERIDAD	TOTAL	COMPORTAMIENTO
1 – 15 % SEVERIDAD PEQUEÑA	DEFECTO 28	0,10%	27	Catódico – Catódico
	DEFECTO 27	0,20%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 9	0,20%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 21	0,30%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 8	0,30%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 25	0,30%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 19	0,40%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 10	0,60%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 4	0,70%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 5	0,80%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 11	0,80%		Anódico – Anódico
	DEFECTO 18	0,90%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 7	1,00%		Anódico – Anódico
	DEFECTO 20	1,20%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 1	1,30%		Anódico – Anódico
	DEFECTO 29	1,40%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 2	1,60%		Anódico – Anódico
	DEFECTO 14	1,80%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 23	2,00%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 12	2,10%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 22	2,90%		Catódico – Anódico
	DEFECTO 3	3,20%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 17	4,20%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 6	4,60%		Catódico – Anódico
DEFECTO 15	7,60%	Catódico – Catódico		
DEFECTO 13	10,20%	Catódico – Catódico		
DEFECTO 26	12,60%	Catódico – Anódico		
36 – 60 % SEVERIDAD MEDIA	DEFECTO 24	24,80%	1	Catódico – Anódico
36 – 60 % SEVERIDAD MEDIA / GRANDE	DEFECTO 16	53,10%	1	Catódico – Catódico
	TOTAL		29	

2.2 DIAGNÓSTICO DEL GASODUCTO PARA EL AÑO 2013

Con los resultados obtenidos a través de las inspecciones realizadas, la evaluación directa de la corrosión externa (ECDA), hace parte de los programas de mantenimiento y operación de tubería de transporte y distribución. La correcta aplicación de esta metodología y las diversas técnicas de inspección que la integran garantiza un diagnóstico confiable del estado de una tubería enterrada.

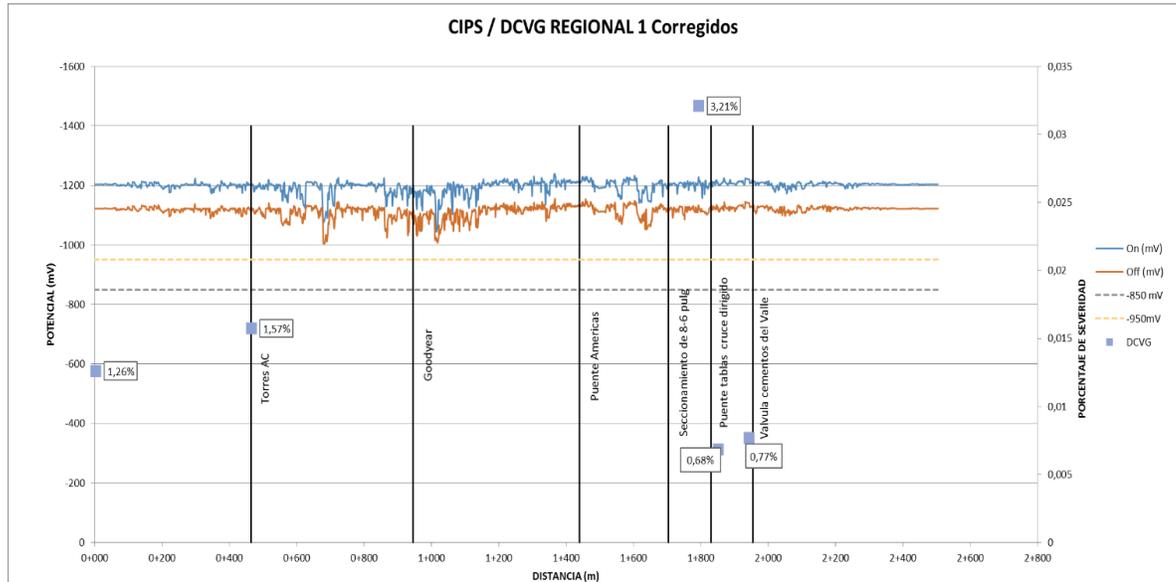
Para efectuar un diagnóstico acertado es necesario, identificar los siguientes parámetros, las características físicas del terreno, zonas con posible presencia de corrosión y las herramientas de inspección usadas. Después de ejecutar este procedimiento se conocen las condiciones en las que se encuentra del gasoducto, información sobre el nivel de protección de catódica y el estado del recubrimiento.

El análisis de la información inicia estableciendo los aspectos de la tubería, entre los cuales están, los diámetros dentro de su red de transporte con las diferentes propiedades fisicoquímicas que presentan, los 16 años de operación del gasoducto, la protección catódica con corriente impresa como sistema principal y ánodos galvánicos como refuerzo.

Las técnicas usadas para evaluación del gasoducto fueron CIPS y DCVG, con el fin de obtener información sobre los niveles de protección catódica de la tubería e identificar las zonas donde se presentan defectos, sin embargo, es preciso aclarar que la técnica CIPS tiene la particularidad de que se debe hacer bajo correcciones de los datos relevados en campo, con respecto a una serie de datos fijos, de esta forma se controla que los potenciales reportados son los reales y no están afectados por la incidencia de una corriente foránea. Se debe agregar que, los puntos fijos del datalogger se ubicaron en:

- Km 1+070 Actuador Cartón Colombia.
- Km 5+500
- Km 6+776 Caja válvula Cr 36.

Figura 15. Consolidado CIPS - DCVG Regional 1 para el año 2013



Fuente: Procorr S.A.S

A partir de las inspecciones realizadas y del diagnóstico para el año 2013, se puede concluir que:

- Como se observa en la figura 15 del CIPS corregido, los potenciales de protección catódica cumplen con los criterios que sugiere NACE, es decir, se encuentran dentro del intervalo de -850mV a -1150mV. Cabe aclarar que para la regional 2, no se cumple con todos los criterios sugeridos en el estándar NACE SP0169-07; esto se debe a que existe la probabilidad de que se presente una interferencia en la protección catódica del tramo de este gasoducto, esto se puede evidenciar en la figura 8 del Anexo 1
- El cambio de potenciales On – Off permite establecer si existe una protección adecuada del revestimiento o zonas donde hay probables defectos en el gasoducto; en la figura 24 se presentan valles en el perfil de potencial esto se relaciona directamente con los defectos, siendo proporcionales el tamaño de los valles con la severidad del defecto.
- Se encontraron 41 gradientes de voltajes en la inspección DCVG, de los cuales el 29,27% están asociados a cajas válvulas, actuadores, puestas a tierra y estaciones de monitoreo y el 70,73% restantes corresponden a los defectos que hay sobre el recubrimiento y que han sido clasificados anteriormente según su porcentaje de severidad y comportamiento corrosivo, como se evidencia en la tabla 7.

Tabla 8. Defectos significativos del gasoducto

DESCRIPCIÓN	% SEVERIDAD	UBICACIÓN		COMPORTAMIENTO CORROSIVO
City Gate	53	Troncal 2 - 2	0+000	Catódico - Catódico
Puesta a tierra de lloreda	24,8	Troncal 1 - 2	4+536	Catódico - Anódico
Cerca a la Válvula de Acopi	12,6	Regional 2	8+325	Catódico - Anódico
Cerca a cables de estación de monitoreo	10,2	Troncal 2 - 2	0+090	Catódico - Catódico

- En la tabla 8, se exponen los defectos significativos en el gasoducto para el año 2013, que se determinaron a través del porcentaje de severidad, la ubicación y el comportamiento corrosivo que permite reparar el defecto de la manera correcta; sin embargo, los defectos más relevantes no requieren reparación inmediata pues la clasificación que tiene estos no se encuentran en un comportamiento anódico-anódico, lo que quiere decir que a pesar de presentar un porcentaje de severidad, la tubería se encuentra protegida lo que permite determinar que el estado de corrosión no es crítico.

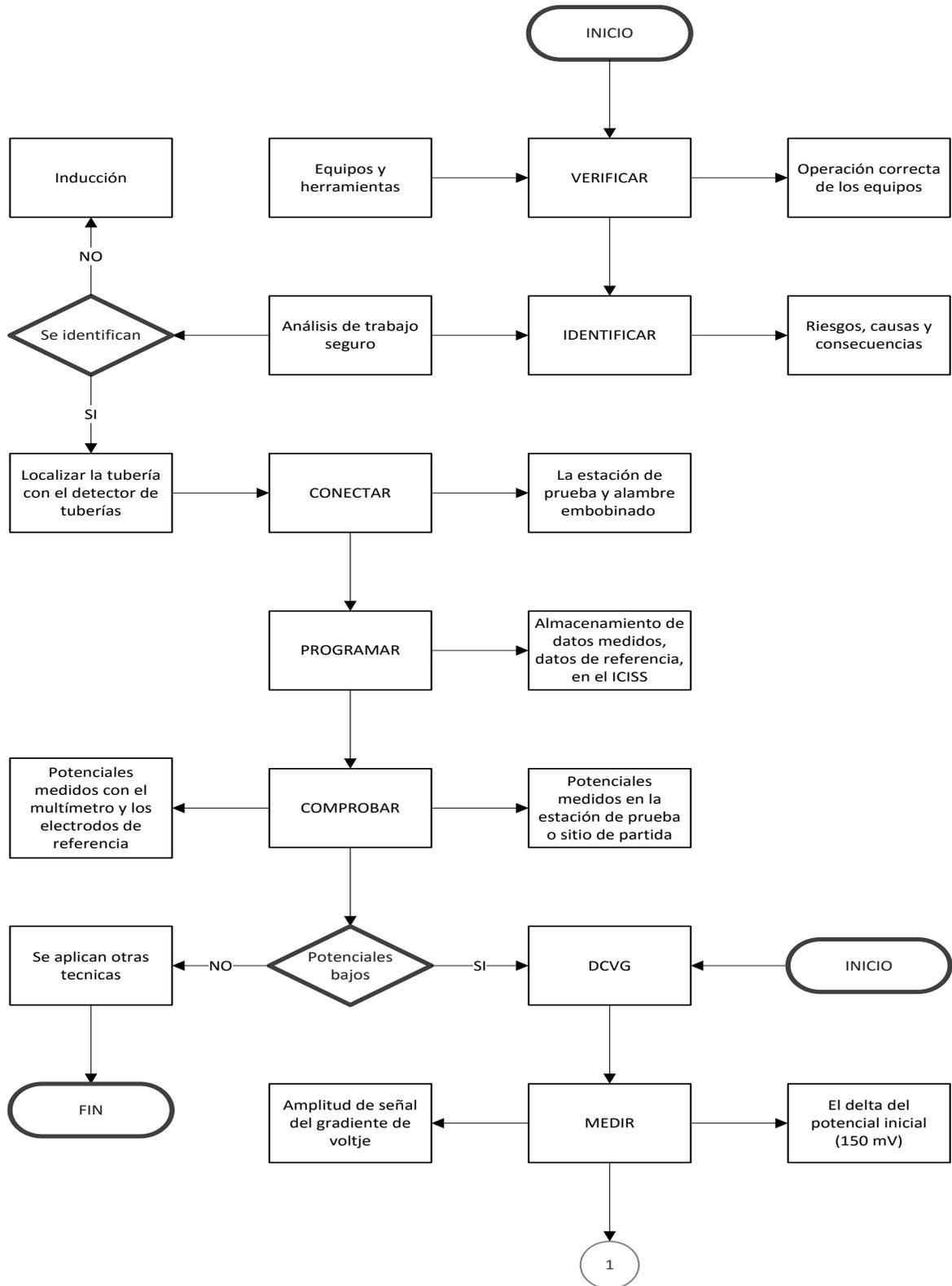
3. DIAGNÓSTICO ESTADO DE CORROSIÓN EXTERNA PARA EL AÑO 2016

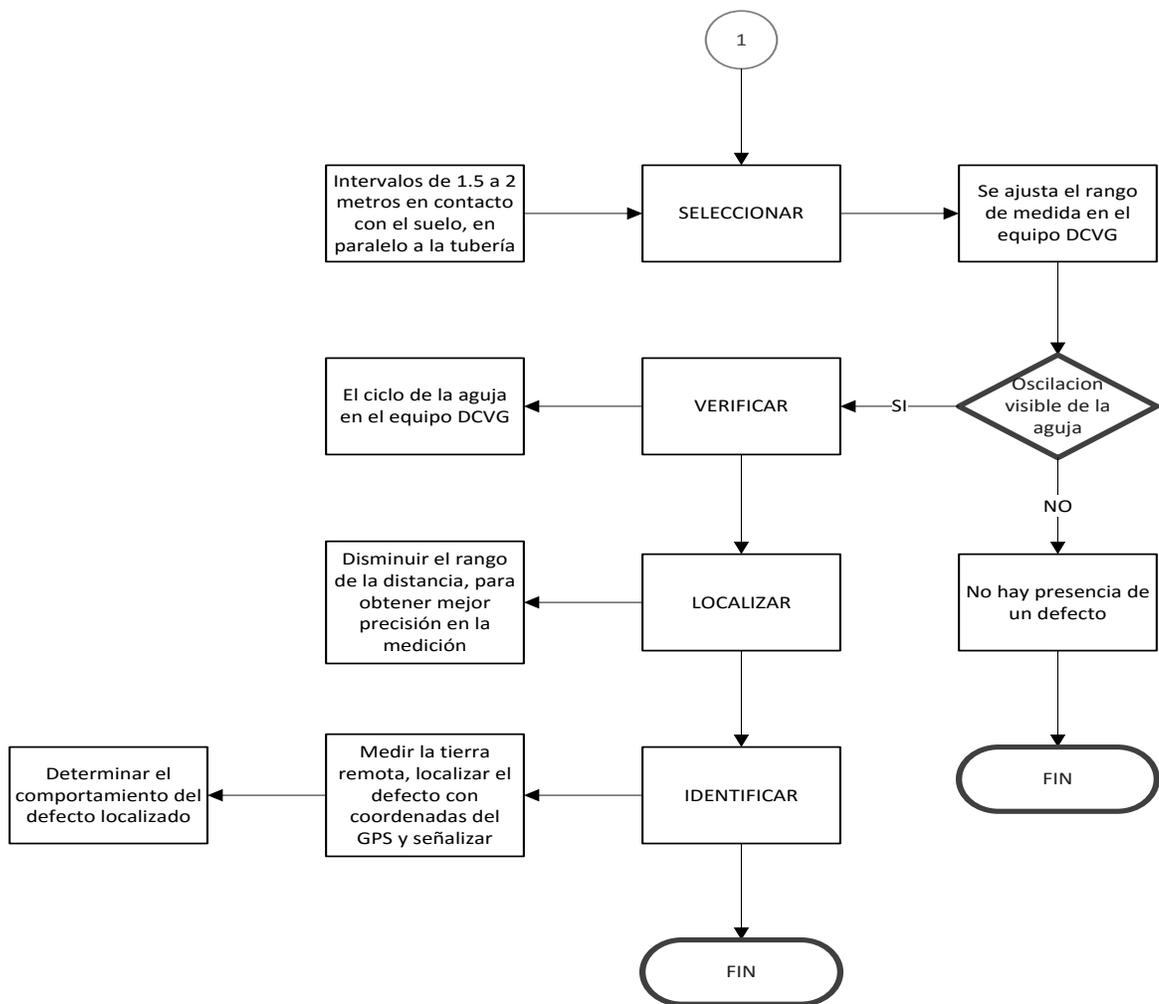
Como se ha planteado a lo largo de este proyecto es necesario evaluar el estado de corrosión del gasoducto; ya se han analizado los datos obtenidos en el año 2013 ahora es importante realizar una comparación exhaustiva con los datos que se reportan para el año 2016 y así evaluar los cambios que se han presentado y diagnosticar el estado de corrosión en la actualidad. A continuación, se muestran los resultados conseguidos a través de las inspecciones CIPS y DCVG.

Las técnicas de inspección se pueden escoger teniendo en cuenta el acceso a esta, la sensibilidad del método que se va a aplicar y la selección de los equipos, cabe mencionar que estos deben cumplir con unos parámetros establecidos, es decir que se encuentren debidamente calibrados para obtener una medición más precisa y así garantizar un resultado confiable.

Considerando que se cumplen las recomendaciones expuestas anteriormente, es necesario establecer el procedimiento y metodología que se implementa para realizar las técnicas CIPS y DCVG, como se muestra en la figura 16; el cual está basado en procedimientos internos de Procorr S.A.S y la norma NACE.

Figura 16. Procedimiento CIPS - DCVG





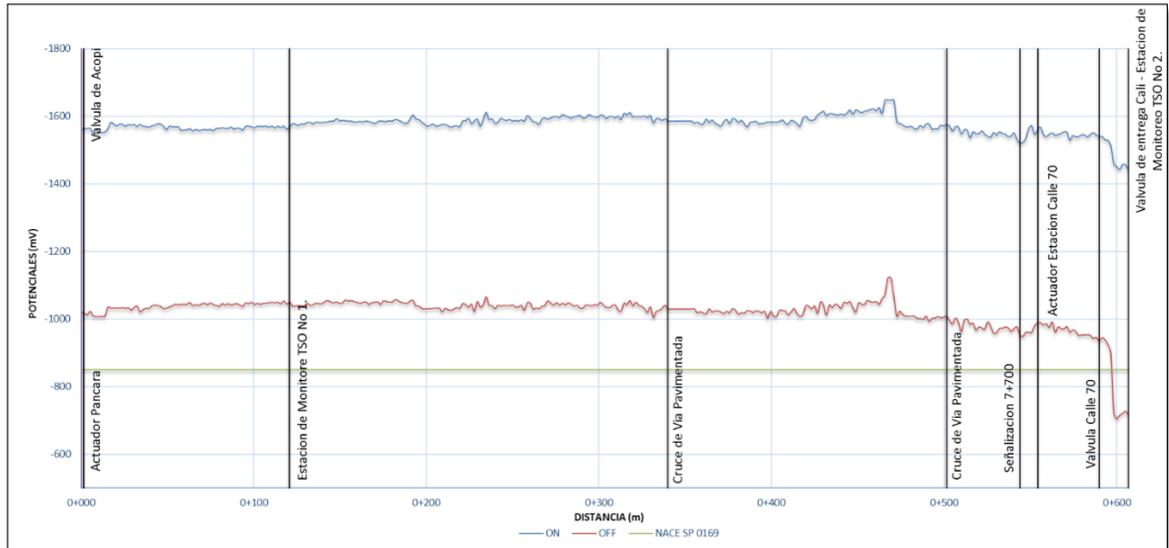
Fuente: Procorr S.A.S – Autores

Hay que mencionar, además, que para realizar tanto la inspección CIPS como DCVG se intervinieron los rectificadores que se encuentran ubicados en el sector la Flora y sector calle 37. El ciclo de interrupción para realizar el relevamiento CIPS es; On: 1.5 segundos y Off: 0.5 segundos; y para el DCVG se utiliza un ciclo On: 1 segundos y Off: 3 segundos.

3.1 DATOS CIPS

La inspección CIPS permite medir los potenciales de polarización “paso a paso” para una tubería, cabe mencionar que los intervalos de estudio no deben ser mayores a 2 metros, también evalúa el estado de protección catódica ubicando los posibles daños del revestimiento y detecta las interferencias que existan, como ya se sabe hay presencia de corrientes telúricas por estudios realizados anteriormente por ende si inicia directamente con la técnica del CIPS corregido.

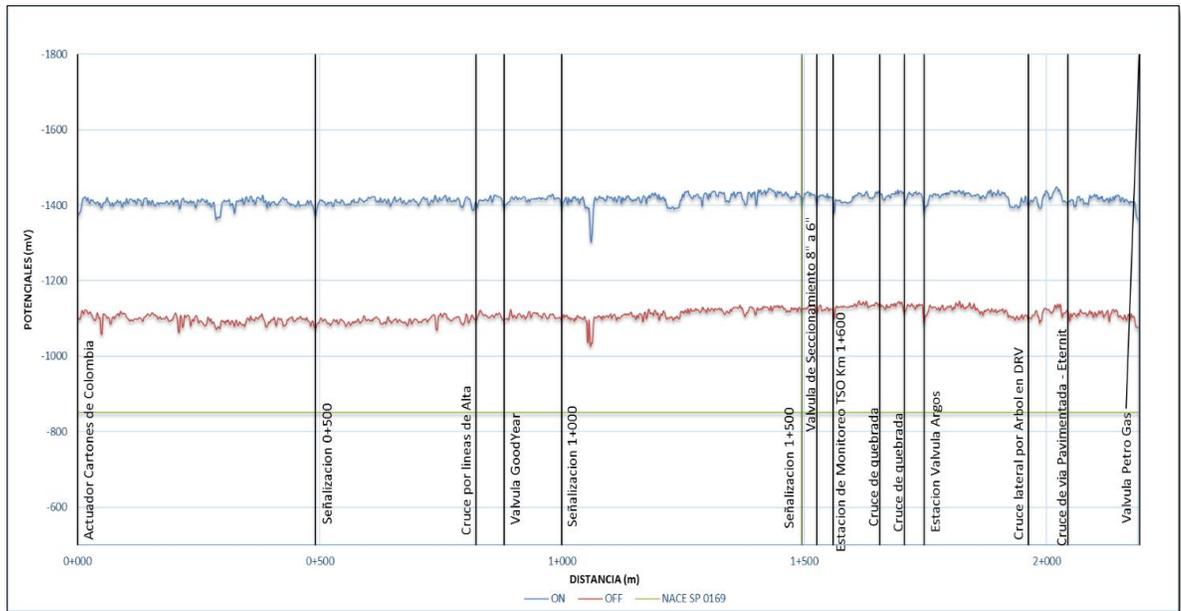
Figura 17. Monitoreo de Potenciales CIPS corregidos Regional 2 para el año 2016



Fuente: Procorr S.A.S

En la figura 17, se presenta el perfil CIPS para la regional 2 para el año 2016 en este tramo de la tubería se verifica el promedio de los potenciales donde On es de -1574 mV y Off de -1020 mV cumpliendo con el segundo criterio de la NACE SP0169 de 2013, el valor del potencial off quiere decir que la polarización en el tubo está en buenas condiciones debido a que presenta un valor entre el rango de -850 mV y -1150, esta derivación la inspección inicia en la Válvula Acopi y finaliza en la válvula Calle 70, la caída de los potenciales con mayor importancia se presenta cerca de la válvula de la calle 70 en donde los potenciales presentan una disminución que pueden relacionarse con pérdida de gradientes, es decir una puesta a tierra o fallas en el revestimiento entre tubería y concreto de la caja válvula. Se puede apreciar que los niveles de protección catódica cumplen con el segundo criterio NACE norma SP0169 de 2013, de mantener un potencial en el instante OFF mayor o igual a -850mV de polarización.

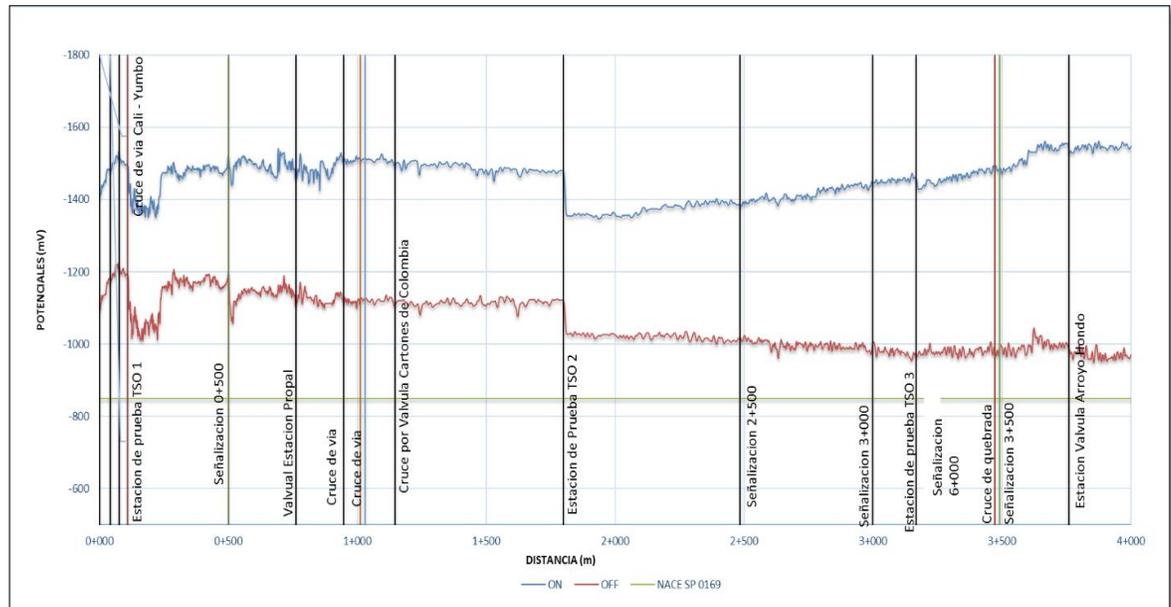
Figura 18. Monitoreo de Potenciales CIPS corregidos Regional 1 para el año 2016



Fuente: Procorr S.A.S

En la figura 18 se presenta la inspección para la regional 1, este tramo inicia en el actuador cartones de Colombia, termina en la válvula Petrogas y cuenta con cuatro estaciones de monitoreo; la tubería presenta un promedio de potenciales On de -1414 mV y Off de -1110 mV, por lo tanto, los niveles de protección catódica cumplen con el tercer criterio NACE norma SP0169 de 2013, de mantener un potencial instant OFF mayor o igual a - 850mV de polarización. Sin embargo, se presentan diferentes valores de los potenciales creando una variación, esto se debe a que el rectificador no tiene una filtración adecuada en la salida DC, lo que genera que la función no sea completamente lineal y se formen ondas de baja longitud.

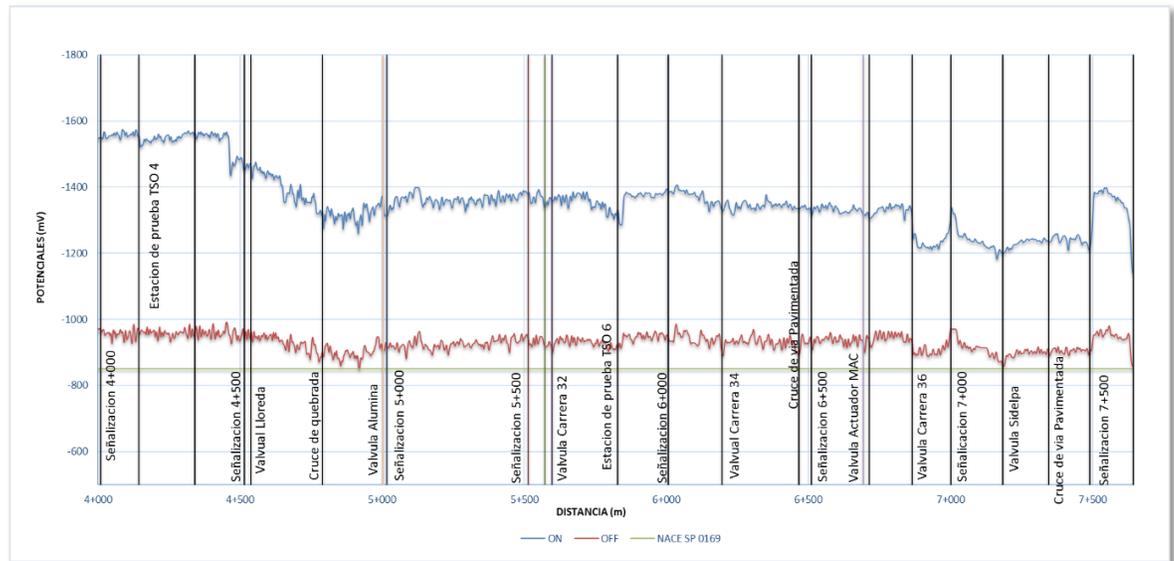
Figura 19. Monitoreo de Potenciales CIPS corregidos Troncal Principal para el año 2016



Fuente: Procorr S.A.S

En la figura 19, se presenta la inspección para la troncal principal del kilómetro 0+000 hasta 4+000 este procedimiento se desarrolló en dos días, en el primer día de inspección se estimó el potencial On registrando un valor de -1479 mV y el potencial Off de -1335 mV y en el siguiente día de inspección el potencial On registra un valor de -1392 mV y el potencial Off -952 mV; lo que genera una variación en los potenciales entre los kilómetros de 1+500 hasta 2+000, esto se debe a que existe un cambio en el ciclo del interruptor, lo que causa una despolarización de la tubería.

Figura 20. Monitoreo de Potenciales CIPS corregidos Troncal principal para el año 2016



Fuente: Procorr S.A.S

En la figura 20, se presenta la inspección para la troncal principal del kilómetro 4+000 hasta 7+500, se ve la diferencia entre el potencial On y el potencial Off, esto se refleja en el estado de protección catódico donde posiblemente hay fallas en el revestimiento de la tubería, es por esta razón que se debe realizar el método DCVG. La variación que se presenta entre los kilómetros 4+500 hasta 5+000 se puede dar por la despolarización que se realiza para la inspección CIPS durante un tiempo determinado, debido a que no es un comportamiento constante se presenta el mismo efecto que se describe en la figura 15, es decir el fenómeno de la corriente continua (DC) no se presenta totalmente lineal. Además, se puede apreciar que, en este trayecto inspeccionado, aunque se presenten niveles o caídas en los potenciales estos mantienen una polarización y cumplen con el segundo criterio NACE norma SP0169 de 2013, de mantener un potencial instant OFF mayor o igual a -850mV de polarización.

3.2 Datos DCVG

La inspección DCVG evalúa el estado de recubrimiento de la tubería, detectando fallas que estén en contacto con el electrolito (suelo), los datos que se presentan a continuación fueron tomados en el año 2016 y es indispensable que se realice el mismo procedimiento que se planteó en este proyecto para los medidos en el año 2013.

Habría que agregar también, que es de suma importancia que se evalué el defecto, es decir, clasificarlo según la severidad y su estado; existen porcentajes de

severidad que no son considerados como defectos, esto se debe a que hay un cambio significativo en el potencial, un cambio de temperatura en el medio o la instalación de soldaduras exotérmicas.

A continuación, se presentan los datos obtenidos durante la inspección DCVG para cada uno de los tramos en estudio.

Tabla 9. Datos DCVG Troncal principal para el año 2016

DESCRIPCION	pK (m)	POTENCIAL Y TIERRA REMOTA				OL/RE mV	VALORACION (ANODICO O CATODICO)		SEVERIDAD	
		ON	OFF	ΔP	TOTAL		ON (mV)	OFF(mV)	P/RE	%IR
Estacion de Entrega TDO a TSO	0+000	-	-	-	-	-	-	-	423,4	-
Defecto No 1.	0+020	-	-	-	-	8,0	0,5A	1A	394,2	2,0%
Defecto No 2.	0+036	-	-	-	-	10,0	1A	1,5A	370,8	2,7%
Cruce de via Cali - Yumbo Pavimentada	0+054	-	-	-	-	-	-	-	344,5	-
Valvula actuador Gaso	0+093	-	-	-	-	-	-	-	287,5	-
Estacion de Prueba TS No 1.	0+094	-1156	-870	-286	286	-	-	-	286,0	-
Estacion de Prueba TS No 2.	0+107	-1220	-953	-267	267	-	-	-	267,0	-
Defecto No 3. Soldadura en TS No 2.	0+108	-	-	-	-	16,0	1,5C	1C	272,2	5,9%
Defecto No 4.	0+126	-	-	-	-	3,0	0,5C	1C	364,9	0,8%
Estacion de Prueba TS No 3.	0+127	-1209	-839	-370	370	-	-	-	370,0	-
Estacion de Prueba TS No 3.	0+127	-1209	-839	-370	370	-	-	-	370,0	-
Defecto No 5.	0+385	-	-	-	-	3,0	0,5C	1C	351,7	0,9%
Cruce de via pavimentada	0+821	-	-	-	-	-	-	-	320,7	-
Poste de Señalización	0+923	-	-	-	-	-	-	-	313,4	-
Valvula actuador Carton de Colombia	0+997	-	-	-	-	-	-	-	308,1	-
Estacion de Prueba TS No 4.	0+999	-1133	-825	-308	308	-	-	-	308,0	-
Estacion de Prueba TS No 4.	0+999	-1133	-825	-308	308	-	-	-	308,0	-
Cruce de via pavimentada	1+045	-	-	-	-	-	-	-	311,0	-
Valvula Propal	1+374	-	-	-	-	-	-	-	332,7	-
Poste de Señalización 1+500	1+500	-	-	-	-	-	-	-	340,9	-
Defecto No 6.	1+660	-	-	-	-	12,0	6C	4C	351,5	3,4%
Valvula Andesia	2+067	-	-	-	-	-	-	-	378,2	-
Defecto No 7. Soldadura en TS No 5.	2+067	-	-	-	-	12,0	2C	0,5C	378,2	3,2%
Estacion de Prueba TS No 5..	2+155	-1166	-782	-384	384	-	-	-	384,0	-
Estacion de Prueba TS No 5.	2+115	-1027	-756	-271	271	-	-	-	271,0	-
Poste de Señalización 2+500	2+500	-	-	-	-	-	-	-	288,2	-
Poste de Señalización 3+000	3+000	-	-	-	-	-	-	-	310,6	-
Estacion de Prueba TS No 6.	3+189	-1044	-725	-319	319	-	-	-	319,0	-
Estacion de Prueba TS No 6.	3+378	-1044	-725	-319	319	-	-	-	319,0	-
Poste de Señalización 3+500	3+500	-	-	-	-	-	-	-	313,8	-
Valvual Unipapel	3+559	-	-	-	-	-	-	-	311,2	-
Valvula actuador arroyo hondo	3+753	-	-	-	-	-	-	-	302,9	-
Poste de Señalización 4+000	4+000	-	-	-	-	-	-	-	292,3	-
Estacion de Prueba TS No 7.	4+169	-1020	-735	-285	285	-	-	-	285,0	-
Estacion de Prueba TS No 7..	4+338	-1020	-735	-285	285	-	-	-	285,0	-

Fuente: Procorr S.A.S

Tabla 10. Datos DCVG Troncal principal para el año 2016

Poste de medicion caido, gradiente en cables de medicion.	4+256	-	-	-	-	110,0	-	-	-261,7	42,0%
Estacion de Prueba TS No 8..	4+344	-1145	-820	-325	325	-	-	-	325,0	-
Estacion de Prueba TS No 9..	4+434	-1132	-810	-322	322	-	-	-	322,0	-
Poste de Señalización 4+500	4+500	-	-	-	-	-	-	-	320,3	-
Valvula Lloreda	4+525	-	-	-	-	-	-	-	319,7	-
Valvula Alumina	4+958	-	-	-	-	-	-	-	308,5	-
Poste de Señalización 5+000	5+000	-	-	-	-	-	-	-	307,5	-
Defecto No 8.	5+324	-	-	-	-	4,5	3A	4A	299,1	1,5%
Poste de Señalización 5+500	5+500	-	-	-	-	-	-	-	294,6	-
Gradiente en poste metalico de TSO, en su estrucutra externa. Defecto No 9.	5+563	-1009	-716	-293	293	95,0	20A	60A	293,0	32,4%
Valvula Carrera 32	5+578	-	-	-	-	-	-	-	292,6	-
Poste de Señalización Km 6+000	6+000	-	-	-	-	-	-	-	281,8	-
Estacion de Prueba TS No 10..	6+051	-1144	-775	-369	369	-	-	-	280,5	-
Estacion de Prueba TS No 10..	6+051	-1292	-876	-416	416	-	-	-	416,0	-
Defecto No 10.	6+173	-	-	-	-	4,0	1,5C	1C	421,3	0,9%
Valvula Carrera 34	6+174	-	-	-	-	-	-	-	421,4	-
Defecto No 11.	6+440	-	-	-	-	45,0	25C	15C	432,9	10,4%
Cruce de via la 35	6+444	-	-	-	-	-	-	-	433,1	-
Valvula Acopi Carrera 35	6+448	-	-	-	-	-	-	-	433,3	-
Poste de Señalización Km 6+500	6+500	-	-	-	-	-	-	-	435,6	-
Valvula actuador Mac	6+672	-	-	-	-	-	-	-	443,0	-
Gradiente de Voltaje en Cruce de Quebrada	6+684	-	-	-	-	8,0	-	-	443,6	1,8%
Valvula Carrera 36	6+855	-	-	-	-	-	-	-	451,0	-
Cruce de via la 36	6+867	-	-	-	-	-	-	-	451,5	-
Poste de Señalización Km 7+000	7+000	-	-	-	-	-	-	-	457,3	-
Valvula Sidelpa	7+187	-	-	-	-	-	-	-	465,5	-
Cruce de via Calle 12 - Carrera 37	7+361	-	-	-	-	-	-	-	473,0	-
Defecto No 12.	7+407	-	-	-	-	7,0	0,5A	1A	475,0	1,5%
Rectificador TSO	7+406	-1354	-879	-475	475	-	-	-	475,0	-
Defecto No 13.	7+413	-	-	-	-	20,0	1C	0,5C	474,2	4,2%
Gradiente fuera de eje de tubería, presente en columna de fabrica.	7+459	-	-	-	-	20,0	-	-	468,8	4,3%
Poste de Señalización Km 7+500	7+500	-	-	-	-	-	-	-	464,1	-
Defecto No 14, en TS No 2, Soldaduras	7+561	-	-	-	-	14,0	6C	2C	457,0	3,1%
Estacion de Prueba TS No 2.	7+561	-1335	-878	-457	457	-	-	-	457,0	-
Estacion de Prueba TS No 2.	7+561	-1335	-878	-457	457	-	-	-	457,0	-
Defecto No 15.	7+618	-	-	-	-	10,0	4C	1C	361,4	2,8%
Estacion de Prueba TS No 1.	7+626	-1234	-886	-348	348	-	-	-	348,0	-
Estacion Entrega de Cali, Gradiente por cables	7+629	-	-	-	-	30,0	-	-	343,0	8,7%

Fuente: Procorr S.A.S

En la tabla 9 y tabla 10, se obtiene que hay diecinueve porcentajes de severidad de los cuales el 78,95% de estos se consideran como defectos y se encuentran en la categoría de 1 – 15%, es decir corresponde a una pequeña severidad que no requiere reparación; el 5,26% de los defectos se encuentra en el rango de severidad media 16 – 35%, es decir se debe considerar reparación, este defecto puede estar

alterado por la estructura de prueba y los gradientes que presenta, lo que genera un aumento en el porcentaje de severidad; cabe señalar que en esta zona no hay presencia del estado anódico – catódico; la mayoría de los defectos son de carácter catódico – catódico, es decir, el defecto siempre está protegido.

Tabla 11. Datos DCVG Regional 1 para el año 2016

DESCRIPCION	pK (m)	POTENCIAL Y TIERRA REMOTA				OL/RE mV	VALORACION		SEVERIDAD	
		ON	OFF	ΔP	TOTAL		ON (mV)	OFF(mV)	P/RE	%IR
Valvula Actuator Carton de Colombia	0+000	-	-	-	-	-	-	-	230,1	-
Estacion de Prueba TS No 1.	0+002	-960	-730	-230	230	-	-	-	230,0	-
Poste de Señalización Km 0+000	0+052	-	-	-	-	-	-	-	228,5	-
Poste de Señalización Km 0+500	0+500	-	-	-	-	-	-	-	215,5	-
Valvula GoodYear	0+882	-	-	-	-	-	-	-	204,4	-
Poste de Señalización Km 1+000	1+000	-	-	-	-	-	-	-	200,9	-
Estacion de Prueba TS No 2. posiblemente en cables.	1+376	-935	-745	-190	190	4,0	-	-	190,0	2,1%
Estacion de Prueba TS No 2.	1+752	-935	-745	-190	190	-	-	-	190,0	-
Poste de Señalización Km 1+500	1+500	-	-	-	-	-	-	-	218,0	-
Valvula de Seccionamiento de 8" a 6"	1+538	-	-	-	-	-	-	-	213,8	-
Estacion de Prueba TS No 3.	1+581	-949	-740	-209	209	-	-	-	209,0	-
Estacion de Prueba TS No 3.	1+619	-949	-740	-209	209	-	-	-	209,0	-
Defecto No 16.	1+582	-	-	-	-	5,0	C0,5	A0,5	210,1	2,4%
Valvula Estacion Argos	1+753	-	-	-	-	-	-	-	205,1	-
Defecto No 17.	2+090	-	-	-	-	12,0	C5	C0,5	195,1	6,1%
Valvula Petro gas	2+297	-	-	-	-	-	-	-	189,0	-
Estacion de Prueba TS No 4.	2+298	-929	-740	-189	189	-	-	-	189,0	-

Fuente: Procorr S.A.S

En la tabla 11, para la regional 1, hay tres porcentajes de severidad de los cuales el 66,66% se toman como defectos, estos se encuentran en la categoría de 1 – 15%, es decir corresponde a una pequeña severidad que no requiere reparación. El 33,33% de porcentaje de severidad no se toma como defecto, esto se debe a que en la estación de monitoreo hay un gradiente de voltaje por los cables sueltos en la estructura; se debe agregar que en esta zona no hay presencia del estado anódico – anódico de los defectos, hay comportamiento anódico – catódico y catódico – catódico.

Tabla 12. Datos DCVG Regional 2

DESCRIPCION	pK (m)	POTENCIAL Y TIERRA REMOTA				OL/RE mV	VALORACION		SEVERIDAD	
		ON	OFF	ΔP	TOTAL		ON (mV)	OFF(mV)	P/RE	%IR
Valvula Acopi. Gradiente de Voltaje presente	0+000	-	-	-	-	5,0	-	-	542,2	0,9%
Valvula actuador Pacara	0+001	-	-	-	-	-	-	-	541,6	-
Defecto No 18. Gradiente presente en tuberia de GDO.	0+045	-	-	-	-	30,0	4C	2C	518,1	5,8%
Estacion de prueba No 1.	0+047	-1542	-1025	-517	517	-	-	-	517,0	-
Defecto No 19.	0+071	-	-	-	-	20,0	10C	2C	504,1	4,0%
Defecto No 20.	0+386	-	-	-	-	24,0	15C	10C	335,4	7,2%
Valvula actuador Calle 70	0+636	-	-	-	-	-	-	-	201,4	-
Gradiente presente en Tuberias Verticales cerca a estacion de Actuador de Cali	0+645	-	-	-	-	160,0	-	-	196,6	81,4%
Estacion de prueba No 2.	0+620	-1500	-1290	-210	210	-	-	-	210,0	-

Fuente: Procorr S.A.S

En la tabla 12, para la regional 2, hay cinco porcentajes de severidad de los cuales el 60% se asignan como defectos y se encuentran categoría de 1 – 15%, es decir corresponde a una pequeña severidad que no requiere reparación. El 40% de los porcentajes de severidad no se toman como defectos, uno de estos es de 81,4%, uno de los factores que puede afectar el incremento de este valor es que se ubica en un soporte vertical metálico entre la válvula de la calle 70 y la estación de entrega a Cali, gradientes que se deben a una puesta a tierra; cabe agregar que en esta zona no hay presencia del estado anódico – anódico ni anódico – catódico de los defectos, estos son de carácter catódico – catódico, es decir, el defecto siempre está protegido.

En la tabla 13 se muestra un consolidado de los defectos encontrados a lo largo del gasoducto, clasificándolos por categorías y por el comportamiento de los defectos, se tienen 19 (95%) defectos en la severidad pequeña, un (5%) defecto en la severidad media; para un total de 20 defectos. Lo que permite indicar que el estado de corrosión en el que se encuentra el gasoducto no está avanzado, por lo tanto, ninguno de los defectos requiere una reparación inmediata o una intervención.

Tabla 13. Consolidado de defectos 2016

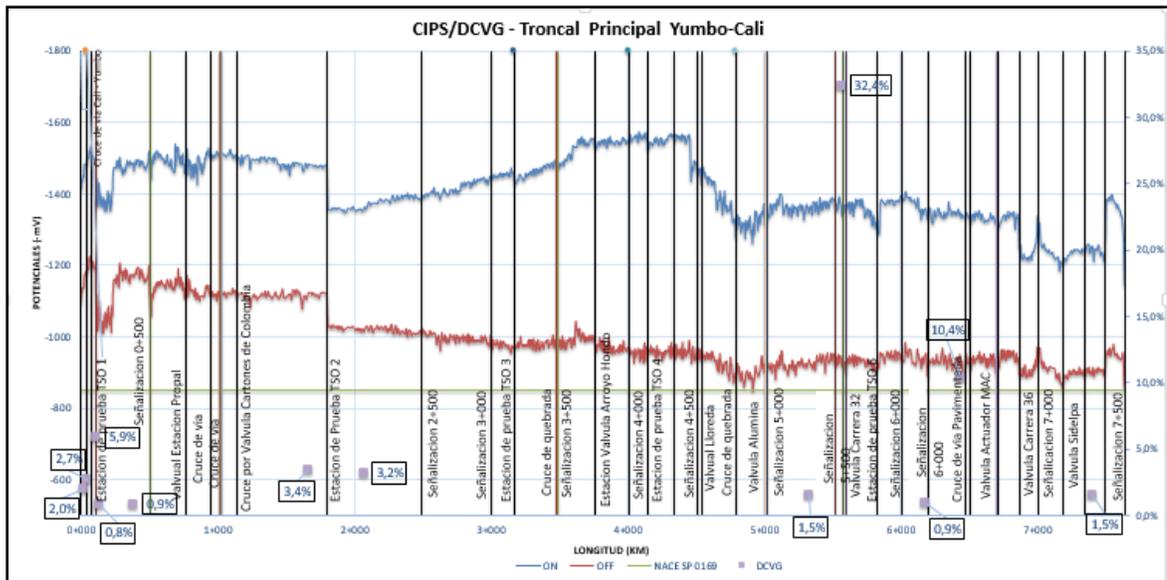
CATEGORIA	DEFECTO	% SEVERIDAD	TOTAL	COMPORTAMIENTO DEFECTO
1 – 15 % SEVERIDAD PEQUEÑA	DEFECTO 4	0,80%	19	Catódico – Catódico
	DEFECTO 11	0,80%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 5	0,90%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 10	0,90%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 8	1,50%		Anódico – Anódico
	DEFECTO 12	1,50%		Anódico – Anódico
	DEFECTO 1	2,00%		Anódico – Anódico
	DEFECTO 16	2,40%		Catódico – Anódico
	DEFECTO 2	2,70%		Anódico – Anódico
	DEFECTO 15	2,80%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 14	3,10%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 7	3,20%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 6	3,40%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 19	4,00%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 13	4,20%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 18	5,80%		Catódico – Catódico
	DEFECTO 3	5,90%		Catódico – Catódico
	16 – 35 % SEVERIDAD MEDIA	DEFECTO 20		7,20%
DEFECTO 9		32,40%	Anódico – Anódico	
	TOTAL		20	

3.3 DIAGNÓSTICO DEL GASODUCTO PARA EL AÑO 2016

Con los resultados obtenidos a través de las inspecciones realizadas para el año 2016, la evaluación directa de la corrosión externa (ECDA), hace parte de los programas de mantenimiento y operación de tubería de transporte y distribución; si se comparan los datos obtenidos del 2013 con los actuales, se presentan menos defectos que se encuentran entre la pequeña y media severidad según la clasificación de los porcentajes IR, como se exhibe en la tabla 1. Teniendo en cuenta esta clasificación, se puede decir que no se requiere una intervención inmediata, pues los bajos porcentajes no representan un daño considerable.

Es indispensable tener claro parámetros como, las características físicas del terreno, zonas con posible presencia de corrosión y las herramientas de inspección usadas para efectuar un diagnóstico acertado; las técnicas que se implementaron permiten medir los niveles de protección catódica e identificar daños del revestimiento por los defectos que alteran el comportamiento de los potenciales en el gasoducto. En la técnica CIPS es importante considerar las correcciones que se deben realizar por las interferencias de las corrientes foráneas.

Figura 21. Consolidado CIPS - DCVG Troncal Principal para el año 2016



Fuente: Procorr S.A.S

A partir de las inspecciones realizadas y del diagnóstico para el año 2016, se puede concluir que:

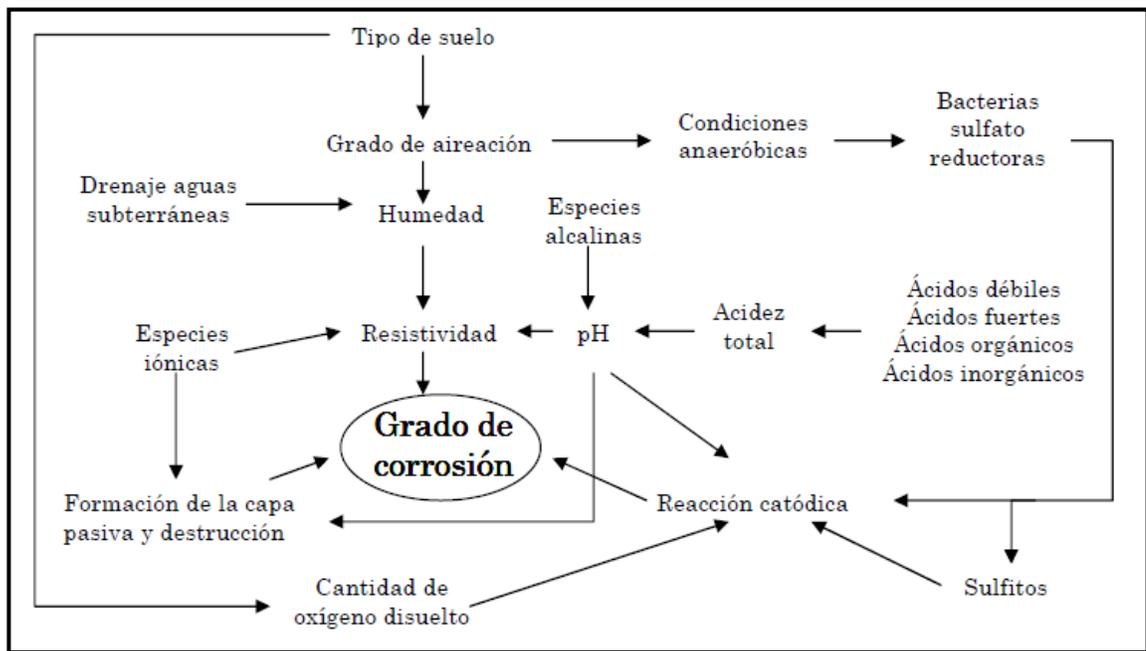
- Como se puede observar en la figura 21, en los primeros metros de inspección se aprecia que tanto los potenciales On como Off, tienden a caer o presentan un nivel más electropositivo con respecto a los registros obtenidos en el 2013, estos registros se deben al material presente en el terreno, es un sector donde la tubería va lateral a un caño de desagüe de aguas negras, por lo tanto, tiene un material de relleno “cascajo con piedra triturada” el cual evita la caída o pérdida de nivel de la calzada a la entrada a “Cencar”, lo que hace que el electrodo de referencia y el voltaje no muestren un valor adecuado de protección catódica.
- Es importante que se tenga un mantenimiento preventivo, es decir un constante monitoreo en la zona entre la válvula arroyo hondo y la válvula carrera 32, puesto que el potencial Off presenta valores cercanos a -850mV y si los sobrepasa el gasoducto quedaría expuesto al fenómeno de corrosión. Es indispensable saber que una tubería enterrada tiene mayor probabilidad y un aumento en la velocidad de corrosión cuando está desprotegida.
- Se encontraron 27 gradientes de voltajes en la inspección DCVG, de los cuales el 25,92% están asociados a cajas válvulas, actuadores, puestas a tierra y estaciones de monitoreo y el 74,07% restantes corresponden a los defectos que hay sobre el recubrimiento y que han sido clasificados anteriormente según su porcentaje de severidad y comportamiento corrosivo, como se evidencia en la tabla 13.

4. ANÁLISIS DE SUELO

Uno de los factores que potencializa la corrosión en las tuberías enterradas es el suelo, para este proyecto es necesario evaluar este comportamiento. Esta investigación es compleja, debido a que el suelo contiene diversos componentes que afectan directa o indirectamente a que se presente corrosión; en esta evaluación se tienen en cuenta solo cinco variables, entre los cuales están carbonatos, cloruros, sulfatos, sulfuros y porcentaje óxido reducción.

El análisis de estas variables se hace en los 10 Km del gasoducto, donde se divide en dos partes, la primera va del kilómetro cero al kilómetro cinco y la segunda, del kilómetro cinco hasta el kilómetro diez, el gasoducto está sumergido en un suelo plano, no presentan desniveles, pero si se encuentran vías, industrias y vertientes de aguas negras. En la figura 22, se exhiben los diferentes factores que alteran el comportamiento del suelo y generan un aumento de corrosión del gasoducto.

Figura 22. Relación entre las variables que afectan la corrosión en el suelo



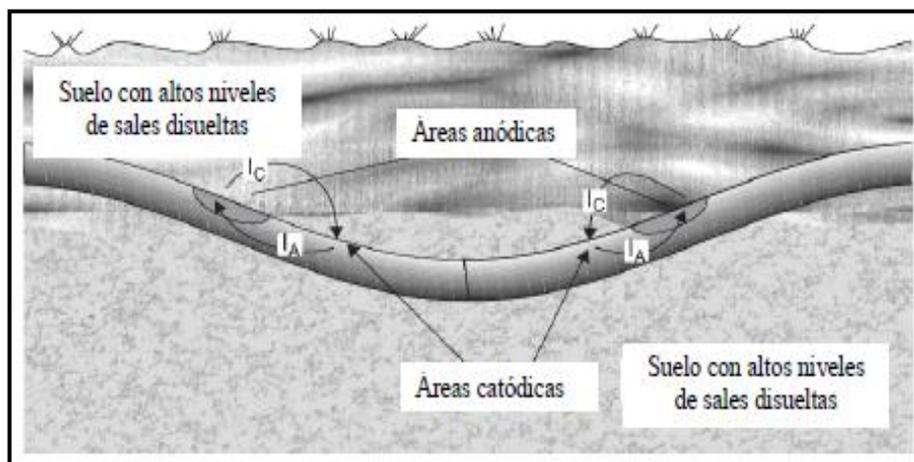
Fuente: COVARRUBIAS SANZ, Edgar Enrique. Estudio de la potencialidad corrosiva del suelo de las plantas de polietileno de alta y baja densidad. Sartenejas, 2010, 91 h. Trabajo de grado (Ingeniero de materiales). Universidad Simón Bolívar. Decanato de estudios profesionales. Coordinación de ingeniería de materiales.

Teniendo en cuenta que el suelo es una combinación formada por la acción del viento donde se presentan minerales, materia orgánica, agua y gases; la proporción de cada uno de estos constituyentes varía dependiendo de la profundidad a la que

se encuentre sumergido al interior de la tierra, presentando una heterogeneidad que hace que el proceso corrosivo en estructuras enterradas sea un fenómeno donde se deben valorar los diferentes factores que alteren la estructura del metal.

Las tuberías enterradas se corroen cuando en el suelo se generan celdas de concentración, estas se forman cuando el gasoducto está en contacto con suelos de distintas características o donde exista diferencias en el metal como se observa en la figura 23; este fenómeno se presenta cuando la zona de la tubería que se encuentra sumergido en el suelo con alta conductividad actúa como ánodo y la zona de tubería que se encuentra en el suelo de baja conductividad actúa cátodo, el suelo se comporta como el electrolito y la tubería sumergida actúa como el contacto metálico necesario para que se genere una celda de corrosión.²⁶

Figura 23. Corrosión de una tubería enterrada



Fuente: COVARRUBIAS SANZ, Edgar Enrique. Estudio de la potencialidad corrosiva del suelo de las plantas de polietileno de alta y baja densidad. Sartenejas, 2010, 91 h. Trabajo de grado (Ingeniero de materiales). Universidad Simón Bolívar. Decanato de estudios profesionales. Coordinación de ingeniería de materiales.

El fenómeno de la corrosión se da cuando la corriente se descarga del metal al suelo en las zonas anódicas y en las zonas catódicas el flujo de corriente va en sentido contrario del suelo a el gasoducto manteniéndola protegida. A continuación, se

²⁶ COVARRUBIAS SANZ, Edgar Enrique. Estudio de la potencialidad corrosiva del suelo de las plantas de polietileno de alta y baja densidad. Sartenejas, 2010, 91 h. Trabajo de grado (Ingeniero de materiales). Universidad Simón Bolívar. Decanato de estudios profesionales. Coordinación de ingeniería de materiales.

presentan cada uno de los parámetros que se van a analizar en el gasoducto enterrado a 1,5 metros en la vía Cali – Jumbo.

4.1 ANÁLISIS QUÍMICO

4.1.1 Cloruros. Este parámetro se ve afectado por la humedad que presenta el suelo, generalmente los cloruros se encuentran en el suelo como ion cloruro altamente soluble y en su mayoría disuelto en el agua que contiene la tierra, por el efecto de las sales que se encuentran en el medio ambiente; debido a que tiene la característica de ser ion, es completamente móvil cuando participa directamente en la reacción anódica de la disolución del metal.

En la tabla 14 se evidencia el nivel de corrosión del suelo a distintas concentraciones de cloruros, cabe aclarar que la presencia de estos tiende a disminuir la resistividad del suelo.

Tabla 14. Grado de corrosión según la concentración de cloruros

Cloruros (ppm)	Grado de corrosión
>5.000	Severa
1.500-5.000	Considerable
500-1.500	Poco corrosivo
<500	No corrosivo

Fuente: COVARRUBIAS SANZ, Edgar Enrique. Estudio de la potencialidad corrosiva del suelo de las plantas de polietileno de alta y baja densidad. Sartenejas, 2010, 91 h. Trabajo de grado (Ingeniero de materiales). Universidad Simón Bolívar. Decanato de estudios profesionales. Coordinación de ingeniería de materiales.

4.1.2 Sulfatos. La agresividad de un suelo se ve afectada directamente a la existencia de sulfatos, debido a que tienen una solubilidad relativamente alta se consideran buenos en cuanto a su efecto corrosivo. Sin embargo, la tubería puede ser atacada como resultado de grandes concentraciones de sulfatos generando componentes que provocan una fuerte expansión en el material hasta su destrucción; la presencia de sulfatos representa un riesgo mayor por los metales cuando estos pasan a sulfuros corrosivos gracias a la acción de bacterias anaeróbicas que son reductoras de sulfato.²⁷

²⁷ COVARRUBIAS SANZ, Edgar Enrique. Estudio de la potencialidad corrosiva del suelo de las plantas de polietileno de alta y baja densidad. Sartenejas, 2010, 91 h.

La tabla 15 indica el nivel de corrosión del suelo dependiendo de la concentración de sulfato presente en el mismo.

Tabla 15. Grado de corrosión según la concentración de sulfatos

Sulfato (ppm)	Grado de corrosividad
>10.000	Severa
1.500-10.000	Considerable
150-1.500	Poco corrosivo
0-150	No corrosivo

Fuente: COVARRUBIAS SANZ, Edgar Enrique. Estudio de la potencialidad corrosiva del suelo de las plantas de polietileno de alta y baja densidad. Sartenejas, 2010, 91 h. Trabajo de grado (Ingeniero de materiales). Universidad Simón Bolívar. Decanato de estudios profesionales. Coordinación de ingeniería de materiales.

4.1.3 Sulfuros. El oxígeno atmosférico no puede traspasar alguna clase de suelos, el hidrógeno producido a consecuencia de la reacción catódica en la estructura enterrada puede llegar a ser eliminado por una oxidación con presencia microbiana; este proceso es el resultado de la actividad metabólica de un microorganismo que se desarrolla en ausencia completa de oxígeno libre. El proceso que se da es la oxidación del hidrógeno del suelo utilizando el ion sulfato, reduciéndolo a sulfuros, presentando una corrosión continua, denominada corrosión anaerobia.

Se presenta este tipo de corrosión en las uniones metálicas enterradas donde el suelo cambia de tonalidad por la formación del sulfuro de hierro y a veces el olor a ácido sulfhídrico. No se tiene una clasificación del nivel de corrosión, según la concentración presente de sulfuros; sin embargo, en la tabla 16 se puede saber la agresividad del suelo teniendo en cuenta tanto los sulfuros como los demás parámetros evaluados.

Trabajo de grado (Ingeniero de materiales). Universidad Simón Bolívar. Decanato de estudios profesionales. Coordinación de ingeniería de materiales.

Tabla 16. Determinación de la agresividad de suelos

		<i>INDICE</i>
Resistividad, ρ (Ω -cm)	> 12 000	0
	12 000 - 5 000	-1
	5 000 - 2 000	-2
Potencial rédox, E_{redox} (mV vs. enh)	< 2 000	-4
	> + 400	+2
	400 - 200	0
	200 - 0	-2
pH	< 0	-4
	> 5	0
Cloruros, Cl^- (mg/kg)	< 5	-1
	< 100	0
Sulfatos, SO_4^{2-} (mg/kg)	100 - 1000	-1
	> 1000	-4
	< 200	0
Sulfuros, S^{2-} (mg/kg)	200 - 300	-1
	> 300	-2
	0	0
	0 - 0.5	-2
	> 0.5	-4
<i>Características del suelo</i>		<i>Suma</i>
No agresivo		0
Débilmente agresivo		-1 a -8
Medianamente agresivo.....		-8 a -10
Sumamente agresivo		< -10

Fuente: CORROSION EN SUELOS. Determinación agresividad de suelos [en línea]. <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia/3/079/htm/sec_10.htm>. [Citado en 3 de junio de 2016]

4.1.4 Carbonatos. Los carbonatos son sales que tienen en común el anión CO_3^{2-} , la mayoría de estos son poco solubles en agua y se forman por la reacción de minerales presentes en la roca madre o en otros casos proceden de fuentes externas como el transporte de viento o agua. El contenido de carbonatos junto con el pH, dan una idea de la composición y reacción del suelo, cabe aclarar que a pH entre 7,5 a 12 y con presencia de carbonatos, favorece la precipitación de metales pesados y la adsorción de varios metales.²⁸

La determinación de los carbonatos en el suelo se hace para evaluar varios factores en los que se encuentran estructura, actividad biológica, bloqueo de nutrientes entre

²⁸ GABARRÓN SÁNCHEZ, María. Evaluación de la técnica de tomografía eléctrica para la estimación de propiedades fisicoquímicas de residuos mineros. Cartagena, 2013, 131 h. Trabajo final (Master en Ingeniería del agua y el terreno). Universidad politécnica de Cartagena. Facultad de Ingeniería.

del otros; sin embargo, los carbonatos tienen una importancia significativa debido a que estos afectan directamente la posibilidad de inmovilización de metales pesados, así como en el poder de amortiguación ante los cambios de pH.²⁹ Como se observa en la tabla 17, se presenta una clasificación del suelo en cuanto a la característica calizo, según el contenido de carbonatos presente en el suelo.

Tabla 17. Clasificación del suelo en función de su contenido en carbonatos.

% en CaCO ₃	Clasificación
< 1%	No se considera calizo
1-5%	Poco calizo
5-80%	Calizo
>80%	Caliza excesiva

Fuente: GABARRÓN SANCHEZ, María. Evaluación de la técnica de tomografía eléctrica para la estimación de propiedades fisicoquímicas de residuos mineros. Cartagena, 2013, 119 h. Trabajo final de master (master en ingeniería de agua y el terreno). Universidad Politécnica de Cartagena.

Para el análisis de las muestras, se tienen en cuenta las características de los suelos con presencia de caliza para poder determinar los diferentes factores que afectan el suelo.

4.1.5 Potencial rédox. El potencial de oxidación-reducción (ORP) de un suelo es el potencial generado por un electrodo inerte, respecto a un electrodo de referencia. Es necesario aclarar que este parámetro no hace una medición directamente a la concentración del oxígeno, sino un indicador de la capacidad reductora – oxidante del suelo; en condiciones aerobias la concentración de oxígeno será alta y por lo tanto el ORP será más positivo que bajo condiciones anaerobias.³⁰

En la tabla 18 se clasifica la agresividad de los suelos dependiendo del potencial redox, lo que permite dar una idea de la cantidad de oxígeno disuelto en el suelo, para identificar un ataque corrosivo al metal favorecido por bacterias anaerobias como las sulfato reductoras.

²⁹ UNIVERSIDAD DE ALICANTA. Tema 9: Corrosión en suelos [en línea]. <<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8235/1/CorrTema9.pdf>> [citado en 25 de mayo de 2016]

³⁰ BEDOYA LORA, Franky Esteban. Corrosión en suelos. Revisión bibliográfica [en línea]. <<https://es.scribd.com/doc/33482048/Corrosion-en-suelos>> [citado en 27 de mayo del 2016]

Tabla 18. Clasificación de la corrosividad de suelos respecto al potencial redox

Rango de ORP (mV)	Grado de Corrosión
<100	Severo
100-200	Moderado
200-400	Leve
>400	No corrosivo

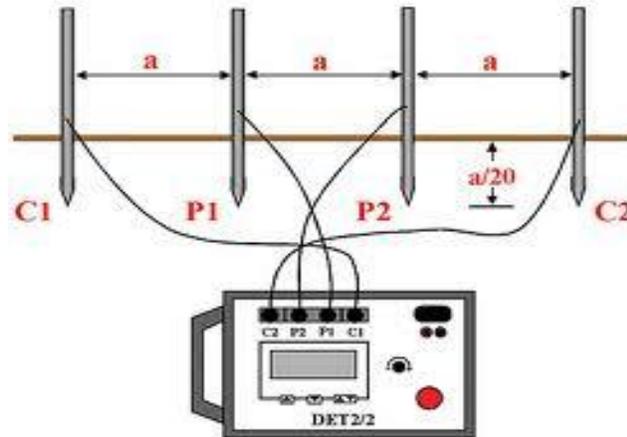
Fuente: BEDOYA LORA, Franky Esteban. Corrosión en suelos. Revisión bibliográfica [en línea]. <<https://es.scribd.com/doc/33482048/Corrosion-en-suelos>> [citado en 27 de mayo del 2016].

4.1.6 Resistividad del suelo. El concepto se usa como un indicador de la capacidad corrosiva del suelo, este parámetro depende de las partículas constituyentes, porosidad, permeabilidad, humedad (contenido de agua), temperatura y contenido de iones. La resistividad del suelo disminuye cuando aumenta el contenido de agua, la concentración de especies iónicas y las reacciones de corrosión. La resistividad puede medirse a través del método de los cuatro pines de Wenner.

La técnica Wenner, utiliza cuatro electrodos como se evidencia en la figura 24 y nombrados C1, P1, P2, C2; estos se entierran en el suelo aproximadamente 25cm de profundidad, con una separación igual ente ellos y en línea recta, que se denota con la letra a; esta separación hace referencia a la profundidad a la que se quiere medir la resistencia del suelo. Los cuatro electrodos se conectan generalmente perpendiculares a la dirección de la tubería si lo que se quiere es medir la resistencia del suelo al paso de la tubería y la separación hace referencia a la profundidad del tubo en el punto de medición.

Los electrodos del método Wenner, están conectados mediante cables a un equipo para la medida de resistencia de suelos (Nilsson 400), conectando los electrodos C1 y C2 a los extremos y P1 y P2 en el medio del equipo, este genera una corriente y se forma un circuito que está compuesto por la muestra a medir y los electrodos del método. El equipo tiene dos escalas una sensible y otra de baja sensibilidad, variando estas escalas se estabiliza una aguja en el centro de la pantalla análoga (null) y así obtiene la medida buscada.

Figura 24. Esquema de la medida de resistividad del terreno



Fuente: Procorr S.A.S

En la tabla 19, se muestra la clasificación del grado de agresividad del suelo en función de la resistividad

Tabla 19. Clasificación de la resistividad del suelo

Rango de Resistividad Ohm-cm	Clasificación	Rango General de Corrosividad
0 - 1,000	Muy Baja	Extremadamente Corrosivo
1,000 - 5,000	Baja	Usualmente Muy Corrosivo
5,000 – 10,000	Media	A menudo Corrosivo
10,000 – 25,000	Alta	Raramente Corrosivo
25,000 – 100,000	Muy Alta	Raramente Corrosivo, a menos que este mezclado
100,000 – 1,000,000	Ultra Alta	Muy Raramente Corrosivo a menos que este mezclado.
Más de 1,000,000	Súper Alta	La mayoría de las veces nunca es corrosivo, a menos que este mezclado

Fuente: PACHON, Juan Carlos. Resistividad en el control de corrosión y protección catódica [en línea]. <http://tecnologitotal.net/wp-content/uploads/2015/01/TT-PP-005_A_Resistividad.pdf> [citado en 30 de agosto de 2016].

Para determinar el valor de la resistividad del suelo, se tiene en cuenta la ecuación 13, que describe la relación aproximada de la resistencia eléctrica y la distancia de separación de los electrodos

Ecuación 12. Resistividad del suelo

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot a$$

Fuente: CARDENAS VALENCIA, Juan David y GALVIS GARCIA Esteban. Manual para la interpretación del perfil de resistividad obtenido al realizar el estudio de la resistividad del suelo a partir de las configuraciones del método Wenner. Pereira, 2011, 95 h. Proyecto de grado (Tecnólogo eléctrico). Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de tecnologías. Programa de Tecnología Eléctrica.

Donde,

- ρ : Resistividad [Ω -cm]
- R: Resistencia eléctrica de una muestra homogénea de material [Ω]
- a: Distancia de separación de los electrodos [cm]

La resistividad aparente, es la propiedad que tiene el suelo para conducir electricidad, para el cálculo de esta se establecen los efectos que tienen las capas que componen el terreno; es importante aclarar que depende de las distancias entre los electrodos de medición, como se evidencia en la ecuación 14.

Ecuación 13. Resistividad aparente

$$\rho(\text{aparente}) = \frac{4 \cdot \pi \cdot R \cdot a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}}$$

Donde,

- ρ : Resistividad [Ω -cm]
- R: Resistencia eléctrica de una muestra homogénea de material [Ω]
- a: Distancia de separación de los electrodos [cm]
- b: Profundidad del electrodo enterrado [cm]

Para que el procedimiento quede claro es indispensable mostrar un cálculo, por eso se va a tomar como ejemplo el defecto 1 que se encuentra entre la estación de entrega TDO a TSO y el cruce de la vía Cali Yumbo, ubicado en el kilómetro 0+020 de la troncal principal; en la tabla 20, se muestran las mediciones de resistividad en donde se describe el sitio, ubicación, la resistencia eléctrica tomada a 1m y 2m respectivamente, el cálculo de la resistividad aparente y resistividad aproximada.

- R (1m): 2 Ω

- R (2m): 6 Ω

$$\rho(\text{aparente} - 1\text{m}) = \left[\frac{4 \cdot \pi(2\Omega)(1\text{m})}{1 + \frac{2(1\text{m})}{\sqrt{(1\text{m})^2 + (0,25\text{m})^2}} - \frac{2(1\text{m})}{\sqrt{4(1\text{m})^2 + 4(0,25\text{m})^2}}} \right] 100$$

$$\rho(\text{aparente} - 1\text{m}) = 1275,7 \Omega - \text{cm}$$

$$\rho(0 - 1\text{m}) = 2 \cdot \pi \cdot (2\Omega) (100\text{cm})$$

$$\rho(0 - 1\text{m}) = 1256,6 \Omega \cdot \text{cm}$$

$$\rho(\text{aparente} - 2\text{m}) = \left[\frac{4 \cdot \pi(2\Omega)(2\text{m})}{1 + \frac{2(2\text{m})}{\sqrt{(2\text{m})^2 + (0,25\text{m})^2}} - \frac{2(2\text{m})}{\sqrt{4(2\text{m})^2 + 4(0,25\text{m})^2}}} \right] 100$$

$$\rho(\text{aparente} - 2\text{m}) = 7569,0 \Omega \cdot \text{cm}$$

$$\rho(1 - 2\text{m}) = 2 \cdot \pi \cdot (6\Omega) (200\text{cm})$$

$$\rho(1 - 2\text{m}) = 7539,8 \Omega \cdot \text{cm}$$

Tabla 20. Datos medición resistividades Troncal principal para el año 2016

DESCRIPCION	pK (m)	R (1m) Ω	R (2m) Ω	APARENTE RESISTIVIDAD 1m (ohm-cm)	RESISTIVIDAD 0-1 m (ohm-cm)	APARENTE RESISTIVIDAD 2m (ohm-cm)	RESISTIVIDAD 1-2 m (ohm-cm)
Defecto No 1.	0+020	2,0	6,0	1275,7	1256,6	7569,0	7539,8
Defecto No 2.	0+036	1,5	8,0	956,8	942,5	10092,1	10053,1
Defecto No 4.	0+126	12,0	4,0	7654,1	7539,8	5046,0	5026,5
Defecto No 5.	0+385	25,0	7,0	15946,0	15708,0	8830,6	8796,5
Defecto No 6.	1+660	15,0	3,0	9567,6	9424,8	3784,5	3769,9
Defecto No 7. Soldadura en TS No 5.	2+067	12,0	6,0	7654,1	7539,8	7569,0	7539,8
Estacion de Prueba TS No 5.	2+115	14,0	5,0	8929,8	8796,5	6307,5	6283,2
Poste de medicion caido, gradiente en cables de medicion.	4+256	16,0	5,0	10205,5	10053,1	6307,5	6283,2
Defecto No 8.	5+324	12,6	3,0	8036,8	7916,8	3784,5	3769,9
Gradiente en poste metalico de TSO, en su estrucutra externa. Defecto No 9.	5+563	8,9	4,2	5676,8	5592,0	5298,3	5277,9
Poste de Señalización Km 6+000	6+000	12,4	6,0	7909,2	7791,1	7569,0	7539,8
Defecto No 10.	6+173	2,6	1,1	1658,4	1633,6	1387,7	1382,3
Defecto No 11.	6+440	3,0	1,4	1913,5	1885,0	1766,1	1759,3
Defecto No 12.	7+407	24,0	7,0	15308,2	15079,6	8830,6	8796,5
Defecto No 13.	7+413	23,0	5,0	14670,3	14451,3	6307,5	6283,2
Defecto No 14, en TS No 2, Soldaduras	7+561	26,0	5,0	16583,9	16336,3	6307,5	6283,2
Defecto No 15.	7+618	10,7	7,0	6824,9	6723,0	8830,6	8796,5

Fuente: Procorr S.A.S

En la tabla 20, para la troncal principal hay diecisiete tomas de resistividad aparente y aproximada, para resistencia eléctrica tomada a 1m y 2m respectivamente; estas medidas se clasifican según la resistividad del suelo como se exhibe en la tabla 19. El 41,176% se encuentra en la clasificación media y a menudo este suelo es corrosivo, el 29,412% está catalogado como alto y es raramente corrosivo, 23,529% se clasifica como baja y es usualmente corrosivo y el 5,882% tiene una resistividad muy baja lo que hace que sea altamente corrosivo.

Tabla 21. Datos medición resistividades Regional 1 para el año 2016

DESCRIPCION	pK (m)	R (1m) Ω	R (2m) Ω	APARENTE RESISTIVIDAD 1m (ohm-cm)	RESISTIVIDAD 0-1 m (ohm-cm)	APARENTE RESISTIVIDAD 2m (ohm-cm)	RESISTIVIDAD 1-2 m (ohm-cm)
Estacion de Prueba TS No 2. posiblemente en cables.	1+376	2,1	0,4	1339,5	1319,5	504,6	502,7
Defecto No 16.	1+582	1,4	0,6	873,8	860,8	807,4	804,2
Defecto No 17.	2+090	2,4	1,1	1530,8	1508	1388	1382

Fuente: Procorr S.A.S

En la tabla 21 se evidencia los datos obtenidos de la toma de resistividad aparente y aproximada en la Regional 1, las cuales fueron medidas entre 1m y 2m respectivamente; estas medidas se clasifican según la tabla 19 donde el 66,66% se clasifica en una resistividad baja lo que indica una zona usualmente corrosiva y el 33,33% está la clasificación muy baja y extremadamente corrosiva. Cabe aclarar que los defectos se clasifican en resistividad baja y resistividad muy baja, lo que quiere decir que el suelo tiene características que favorecen a la presencia de corrosión.

Tabla 22. Datos medición resistividades Regional 2 para el año 2016

DESCRIPCION	pK (m)	R (1m) Ω	R (2m) Ω	APARENTE RESISTIVIDAD 1m (ohm-cm)	RESISTIVIDAD 0-1 m (ohm-cm)	APARENTE RESISTIVIDAD 2m (ohm-cm)	RESISTIVIDAD 1-2 m (ohm-cm)
Valvula Acopi. Gradiente de Voltaje presente	0+000	6,4	3,0	4082,2	4021,2	3784,5	3769,9
Defecto No 19.	0+071	4,6	2,0	2934,1	2890,3	2523,0	2513,3
Defecto No 20.	0+386	4,5	1,6	2870,3	2827,4	2018,4	2010,6
Gradiente presente en Tuberias Verticales cerca a estacion de Actuador de Cali	0+645	7,0	2,3	4464,9	4398,2	2901,5	2890,3

Fuente: Procorr S.A.S

Realizando las mediciones en la Regional 2 entre 1m y 2m, en la tabla 22 se evidencia la resistividad aparente y aproximada; estas medidas se clasifican según la tabla 19 donde las cuatro resistividades que se midieron se clasifican en resistividad baja debido a que se encuentran entre el rango de 1.000 a 5.000 Ω -cm, lo que hace que se presente una zona usualmente corrosiva.

4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Es importante determinar el potencial corrosivo del suelo y el efecto que este tiene sobre las tuberías enterradas, como primera medida se recopila información bibliográfica para establecer las características de cada uno de los factores que se tienen en cuenta, de la tabla 14 a la tabla 19 se evidencian los rangos de los compuestos que se encuentran en el suelo, según los análisis realizados del comportamiento del suelo en la que se encuentra sumergido el gasoducto. Para evaluar el estado de corrosión del gasoducto, es indispensable estudiar los parámetros nombrados anteriormente, es por eso que se toman muestras de suelo en dos zonas diferentes como se evidencia en la tabla 23, para realizar la caracterización para comprobar la presencia de estos componentes y como afectan el gasoducto, de la tabla 20 a la tabla 22, se presentan los datos registrados de la medición de las resistividades en la troncal principal, la Regional 1 y la Regional 2, respectivamente. Finalmente se analiza la relación de los carbonatos, cloruros,

sulfatos, sulfuros, el potencial oxido-reducción y la resistividad del suelo, para determinar el comportamiento del fenómeno de la corrosión.

Tabla 23. Resultados del análisis de suelos.

ZONA	pK (m)	CARBONATOS (%)	CLORUROS (ppm)	SULFATOS (ppm)	SULFUROS (ppm)	OXIDO-REDUCCIÓN (mV)
1	0+000 a 5+000	3,99	<10	90,4	<12	-31
2	5+000 a 10+000	5,26	26,5	195,5	<12	-106

Los análisis que se obtienen para la zona 1 y 2 de caracterización reportados en la tabla 23, son los siguientes; el contenido de carbonatos según la tabla 17 es un suelo poco calizo, es decir, un suelo saturado de agua y es difícil el acceso del oxígeno, lo cual no favorece la reacción catódica; es por eso que tiende a presentar baja corrosión, sin embargo, existen bacterias sulfatorreductoras que afectan esta condición lo que genera un cambio en el comportamiento del suelo que conlleva al incremento de la oxidación del gasoducto en ciertas zonas, esto se relaciona con la concentración de sulfatos, según la tabla 15 se determina que el terreno es no corrosivo, la presencia de estos factores contribuyen a que exista corrosión. En cuanto a los cloruros como se evidencia en la tabla 24 y la concentración que presenta para estas zonas es un suelo no corrosivo, es importante mencionar que la presencia de estos tiende a disminuir la resistividad del suelo y ayudan a romper la pasivación de metal. Las bacterias sulfatorreductoras alteran las mediciones, puesto que la materia orgánica y el sulfuro producen contaminación de la superficie del electrodo generando una película que interfiere en los valores obtenidos; según tabla 16, se realiza la respectiva valoración obteniendo como resultado un índice de -10, lo que quiere que decir que el suelo tiene un comportamiento medianamente agresivo. El potencial redo proporciona una idea de la cantidad de oxígeno disuelto en el suelo, este incrementa el ataque corrosivo por la presencia de bacterias sulfatorreductoras, en la tabla 18 se evidencia que según los resultados obtenidos en el análisis el grado de corrosión es severo, cabe mencionar que este parámetro está relacionado directamente con la temperatura y la humedad.

Este análisis se realiza con todos los parámetros de estudio, puesto que por separado ninguno de los factores determina la corrosión que tiene el suelo; es por esta razón que se debe considerar evaluar la relación que existe entre el análisis químico del suelo, los valores de resistividad, las medidas tomadas de potenciales y el cálculo del porcentaje de severidad. Como consecuencia, se puede decir que el suelo, considerando las características simultáneamente, es ligeramente corrosivo, por lo tanto, es necesario mantener o implementar un sistema de protección catódica y realizar las inspecciones de monitoreo periódicamente.

5. CONCLUSIONES

- Para el año 2013 los potenciales cumplen con los criterios que sugiere NACE, es decir, se encuentran dentro del intervalo de -850mV a -1150mV. Cabe mencionar que para la regional 2, no se cumple con todos los criterios; esto se debe a que existe la probabilidad de que se presente una interferencia en la protección catódica del tramo de este gasoducto; se encontraron 41 gradientes de voltajes en la inspección DCVG, de los cuales el 29,27% están asociados a cajas válvulas, actuadores, puestas a tierra y estaciones de monitoreo y el 70,73% restantes corresponden a los defectos que hay sobre el recubrimiento, con esto se determinó que el estado de corrosión no es crítico, puesto que los defectos encontrados no requieren reparación inmediata.
- Para el año 2016 en los primeros metros de inspección se aprecia que tanto los potenciales On como Off, tienden a caer o presentan un nivel más electropositivo con respecto a los registros obtenidos en el 2013, estas variaciones se deben al material presente en el terreno. Se encontraron 27 gradientes de voltajes en la inspección DCVG, de los cuales el 25,92% están asociados a cajas válvulas, actuadores, puestas a tierra y estaciones de monitoreo y el 74,07% restantes corresponden a los defectos que hay sobre el recubrimiento.
- El análisis químico del suelo, los valores de resistividad, las medidas tomadas de potenciales y el cálculo del porcentaje de severidad, permitió realizar una evaluación completa del estado del gasoducto; como consecuencia, se puede decir que el suelo, considerando las características simultáneamente, es ligeramente corrosivo, por lo tanto, es necesario mantener o implementar un sistema de protección catódica y realizar las inspecciones de monitoreo periódicamente.

6. RECOMENDACIONES

- Instalar estaciones de monitoreo cercanas a las zonas donde se estima que se encuentra el daño, esto se realiza con el fin de mantener un monitoreo durante 24 horas y que la diferencia de potencial no varíe cuando se implemente las inspecciones indirectas al inicio de la inspección.
- Recopilar información de las características del gasoducto, especificaciones de los materiales, número de estaciones, sistema de protección, registro del último monitoreo y mantenimiento, ubicación geográfica y cualquier otra información que sea pertinente para la evaluación.
- Identificar las zonas de influencia externa, es decir corrientes telúricas que afectan la toma de potencial, para realizar una evaluación de la eficiencia del revestimiento y el estado en el que se presenta el gasoducto.
- Realizar el proceso de evaluación completo que consta de las siguientes fases, pre-evaluación, inspecciones indirectas y postevaluación; estos se basan en un diagnóstico de la situación actual del gasoducto, identificando las condiciones que pueden afectar la presencia de una falla en la tubería y realizando las acciones necesarias de reparación y/o mitigación de la corrosión.

BIBLIOGRAFÍA

ANDRADE, MARIA CARMEN, FELIU SEBASTIAN. Corrosión y Protección Metálica. España: C.S.I.C de ediciones. Vol I. 84-00-07141-7. (1991).

BEDOYA LORA, Franky Esteban. Corrosión en suelos. Revisión bibliográfica [en línea]. <<https://es.scribd.com/doc/33482048/Corrosion-en-suelos>> [citado en 27 de mayo del 2016]

CAMPOS, Humberto, CAMPOS, Claudio. Corrosión bacteriana en metales. Vol.22, no. 1 (ene – jun 2004); p. 31 [citado en 7 de febrero de 2016].

COVARRUBIAS SANZ, Edgar Enrique. Estudio de la potencialidad corrosiva del suelo de las plantas de polietileno de alta y baja densidad. Sartenejas, 2010, 91 h. Trabajo de grado (Ingeniero de materiales). Universidad Simón Bolívar. Decanato de estudios profesionales. Coordinación de ingeniería de materiales.

CUBILLOS PACHÓN, Yeni Carolina. Implementación de la integridad de corrosión en ductos de transporte de hidrocarburos para Tecnología total LTDA. Bogotá, 2006, 240 h. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Departamento de Ingeniería Química.

EMPRESA DE INGENIERÍA EN INTEGRIDAD DE DUCTOS. Auditoría de sistemas de protección catódica y estados de conservación de revestimientos anticorrosivos en gasoductos y oleoductos. [En línea].

FONTANA, Mars. Ingeniería de la Corrosión: Ocho formas de corrosión. Tercera edición. Singapore: Editorial Board, 1910. P 63. ISBN 0-07-021463-8.

GABARRÓN SÁNCHEZ, María. Evaluación de la técnica de tomografía eléctrica para la estimación de propiedades fisicoquímicas de residuos mineros. Cartagena, 2013, 131 h. Trabajo final (Master en Ingeniería del agua y el terreno). Universidad politécnica de Cartagena. Facultad de Ingeniería.

GÓMEZ DE LEÓN, FÉLIX CASÁREO. Manual Básico de Corrosión para ingenieros. Murcia: Servicio de publicaciones. 13 p. 84-8371-506-6

HUMBERTO H, UHLIG. Corrosión y Control de Corrosión. España: Urmo, S.A. de Ediciones. 23 p. 84-314-0149-4.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación, presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación: citas. Bogotá: ICONTEC, 2008. 7 h : il. (NTC 1486).

- - - - - . Referencias bibliográficas. contenido, forma y estructura: Capítulos o partes del libro escrito por el autor (es) del libro. Bogotá: ICONTEC, 2008. 20 h : il. (NTC 5613).

- - - - - . Referencias documentales para fuentes de información electrónicas: Descripción general de las referencias documentales. Bogotá: ICONTEC, 1998. 5 h : il. (NTC 4490).

MARTINEZ VILLAFañE, A. CHACÓN NAVA, J. ALMERAYA CALDERÓN, F. Oxidación de alta temperatura [en línea] <<http://depa.fquim.unam.mx/labcorr/libro/OXIDACIONALTATEMPERATURA.PDF>> [citado en 21 de marzo de 2016].

MONROY CAMELO, Juan C. PÁEZ LUENGAS, Edgar A. Análisis de las técnicas de monitoreo de corrosión en tubería enterrada para su aplicación industrial. Bogotá, 2001, 9 h. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería Química.

NACE, International. Protección catódica nivel I manual básico. Estados Unidos, 2002. (3/01). 2:5-2:7p.

OWEN, Sneath y TREVOR, place. Practical Telluric Compensation for Pipeline Close-Interval Surveys. En: onepetro [base de datos en línea]. (maz.2000); p.5 [citado en 27 de mayo de 2016] Disponible en Onepetro.

PANCORBO FLORISTÁN, Francisco. Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación: Diagramas de Corrosión. Barcelona: Ediciones técnicas Marcombo, 2011.34 p. ISBN 978-84-267-1576-0.

PILLAJO PILLAJO, Gonzalo J. Diagnóstico y propuesta de mejoramiento del sistema de puesta a tierra existente en el laboratorio del centro de metrología del ejército ecuatoriano. Sangolquí, 2013. Trabajo de grado (Tecnología en Electromecánica). Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Departamento de Eléctrica y Electrónica.

PROCORR S.A.S. Manual interno de procedimiento. Bogotá, Colombia: 2000. p. 160.

RUBEN GUTIERREZ. Metalografía [En línea] <<http://materias.fi.uba.ar/6750/Resumen%20Fundiciones%20de%20hierro.pdf>> [Citado el 19 de octubre de 2015].

UHLIG, HERBET H. Corrosión y Control de Corrosión. España: Urmo S.A. de ediciones. 393 p. 84-314-0149-4. (1979).

UNIVERSIDAD AMÉRICA RUM. Capítulo 2 Antecedentes [En línea] <http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lqi/coatl_p_m/capitulo2.pdf> [Citado el 23 de octubre de 2015].

UNIVERSIDAD DE ALICANTE. Tema 9: Corrosión en suelos [en línea]. <<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8235/1/CorrTema9.pdf>> [citado en 25 de mayo de 2016].

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES. Trabajos prácticos de laboratorio [en línea] <http://materias.fi.uba.ar/6303/TPN3.pdf> [citado en 21 de marzo de 2016].

VILA CASADO, Gustavo. Corrosión Electroquímica- Mecanismo y Métodos de control. Bogotá: Universidad Nacional, 1990. p.138.

ANEXO A.

MONITOREO DE POTENCIALES CIPS SIN CORRECCIÓN PARA EL AÑO 2013

Figura Monitoreo de Potenciales CIPS sin corrección Troncal 2 – 2 para el año 2013

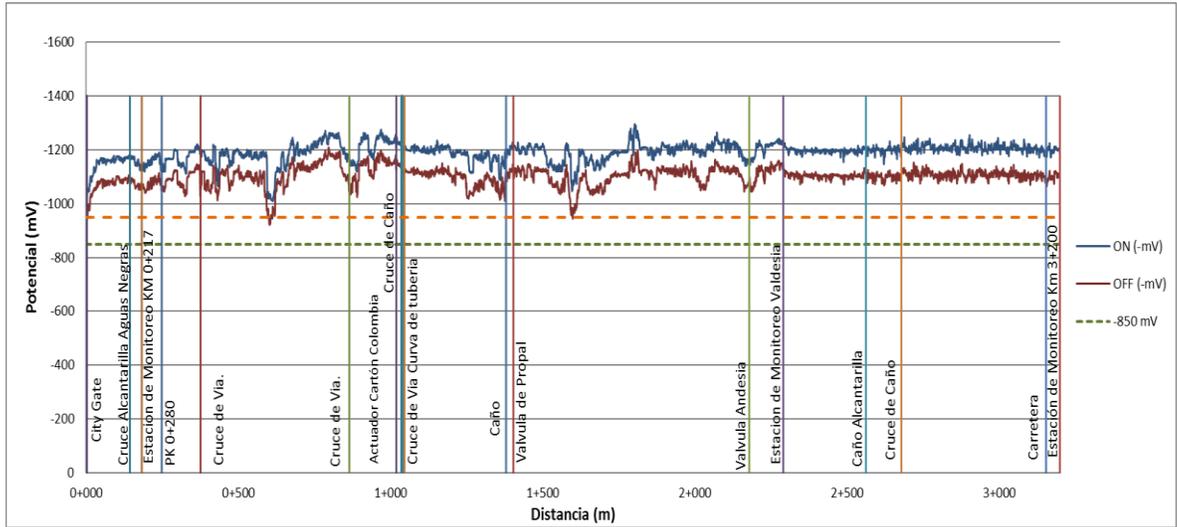


Figura Monitoreo de Potenciales CIPS sin corrección Troncal 1 – 2 para el año 2013

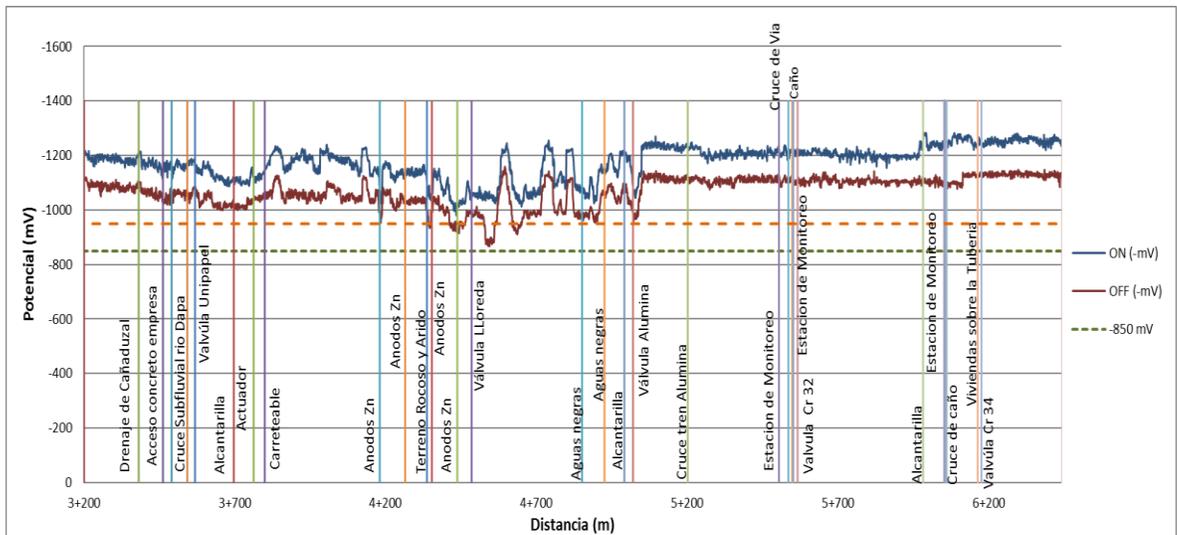


Figura Monitoreo de Potenciales CIPS sin corrección Troncal 1 – 2 para el año 2013

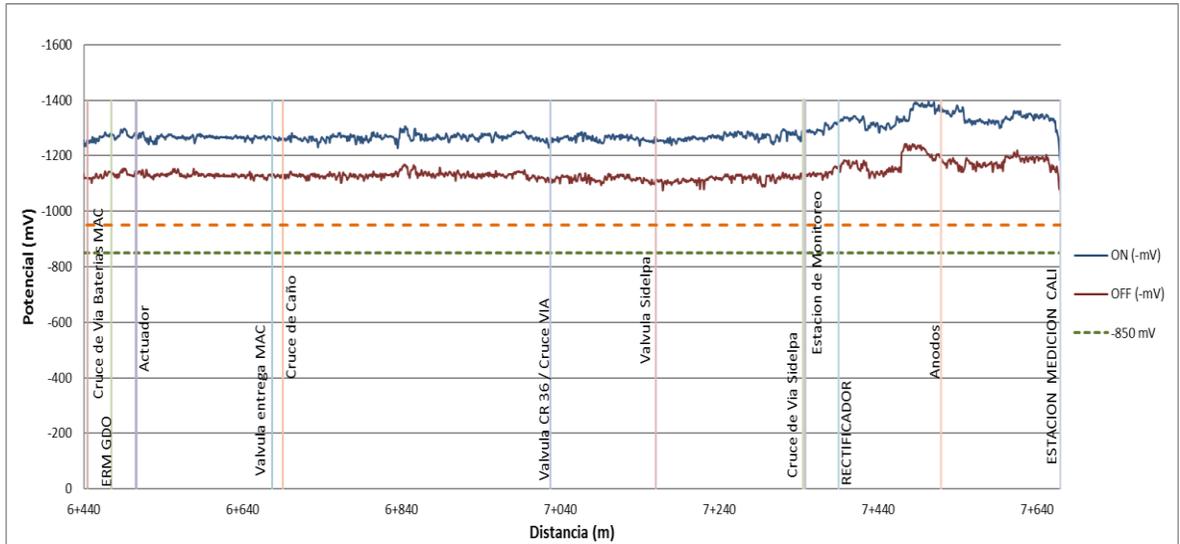
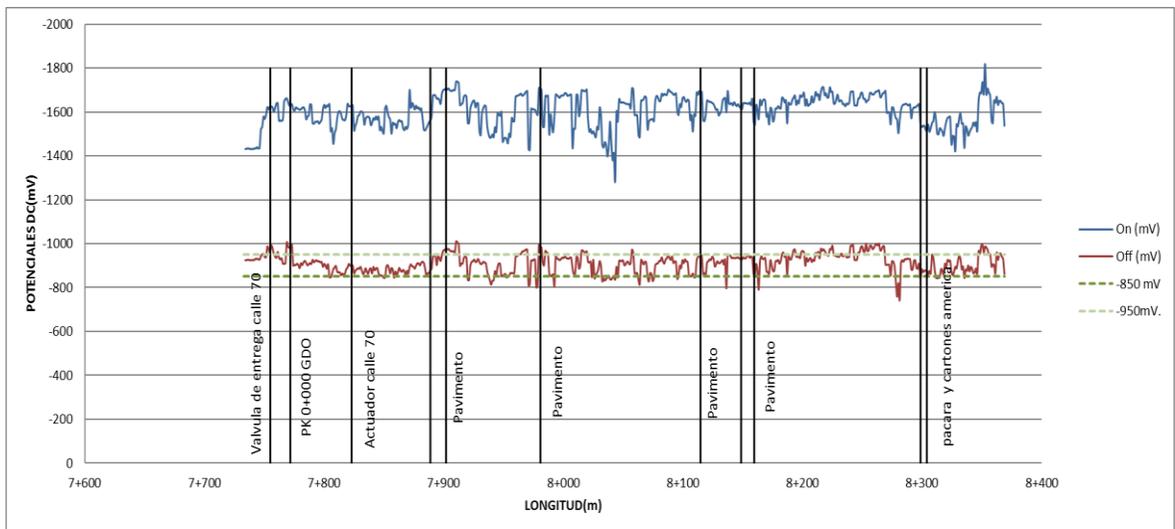


Figura Monitoreo de Potenciales CIPS sin corrección Regional 2 para el año 2013



ANEXO B

MONITOREO DE POTENCIALES CIPS CORREGIDOS PARA EL AÑO 2013

Figura Monitoreo de Potenciales CIPS corregidos Troncal 2 – 2 para el año 2013

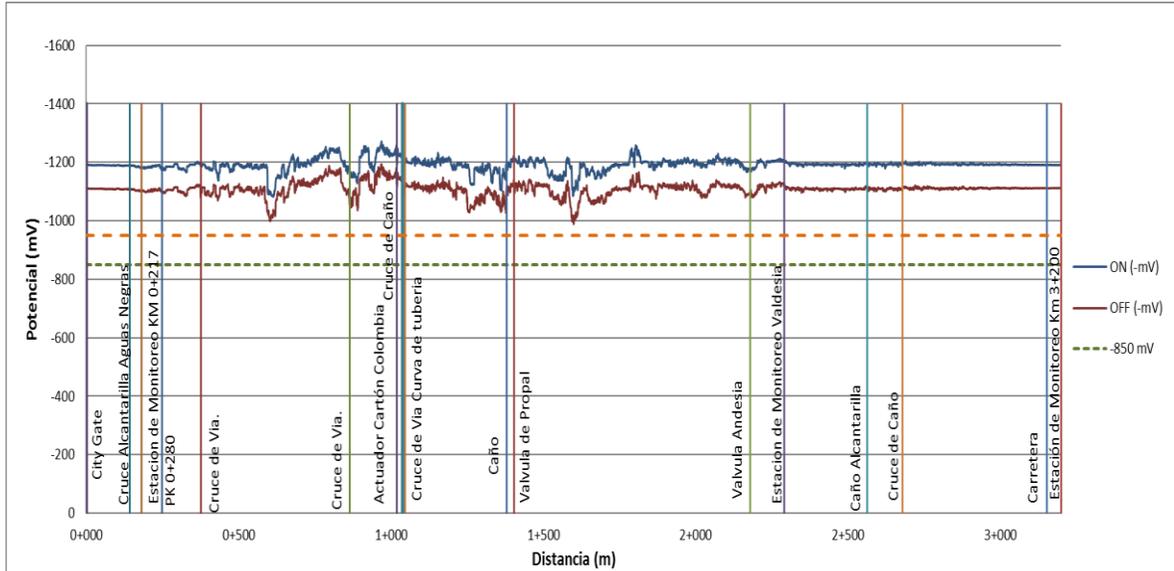


Figura Monitoreo de Potenciales CIPS corregidos Troncal 1 – 2 para el año 2013

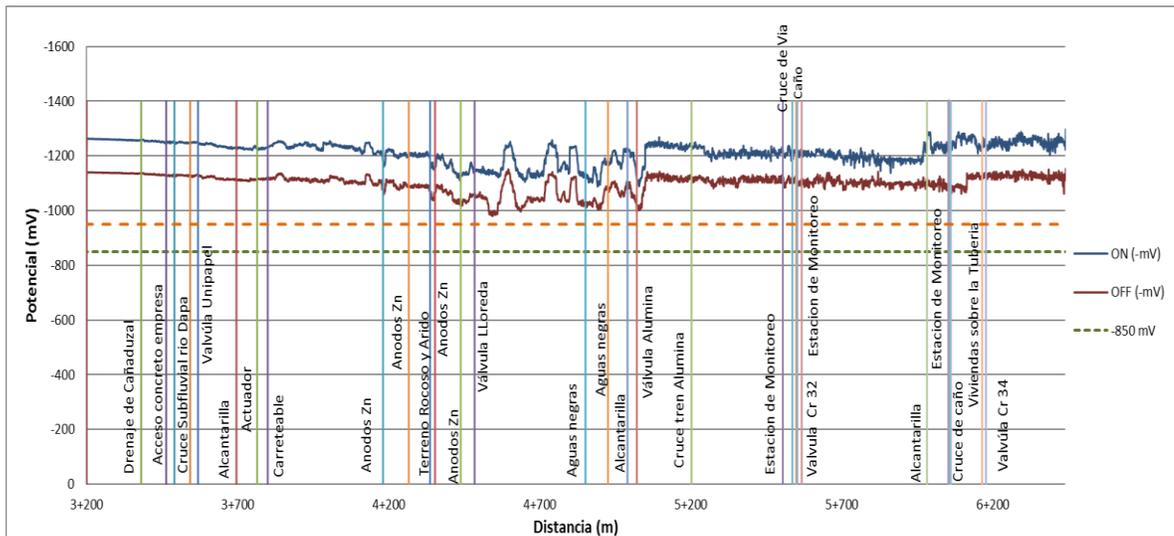


Figura Monitoreo de Potenciales CIPS corregidos Troncal 1 – 2 para el año 2013

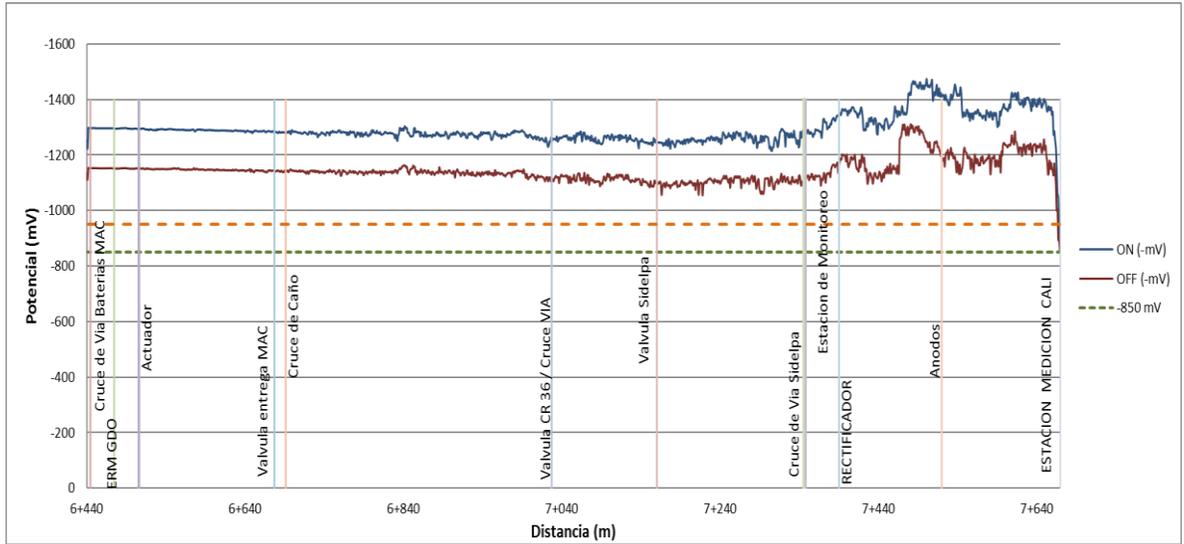
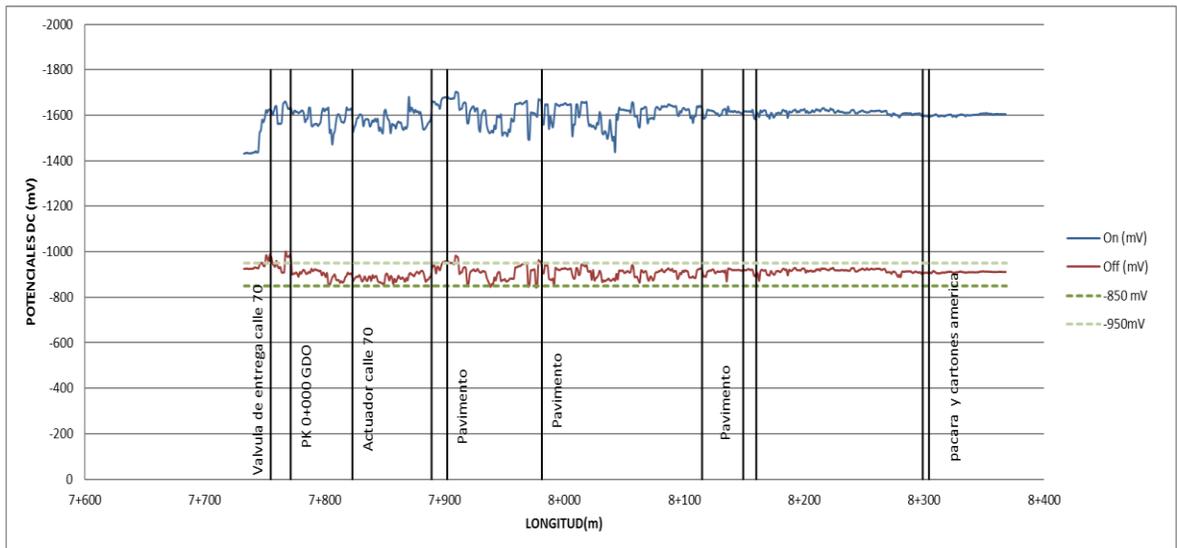


Figura Monitoreo de Potenciales CIPS corregidos Regional 2 para el año 2013



ANEXO C

CONSOLIDADO CIPS - DCVG PARA EL AÑO 2013

Figura Consolidado CIPS - DCVG Troncal 2 – 2 para el año 2013

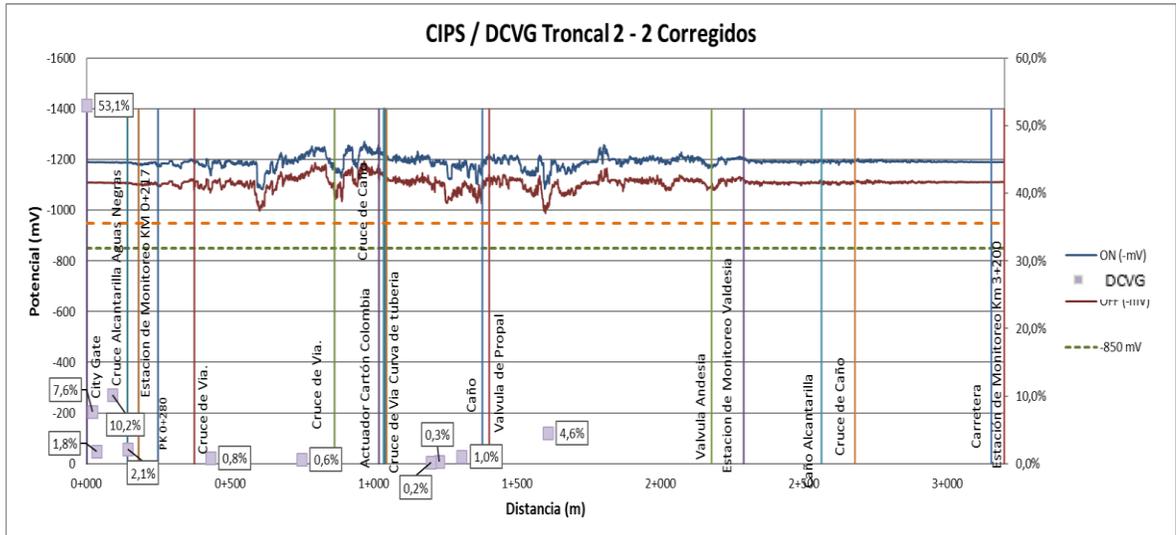


Figura Consolidado CIPS - DCVG Troncal 1 – 2 para el año 2013

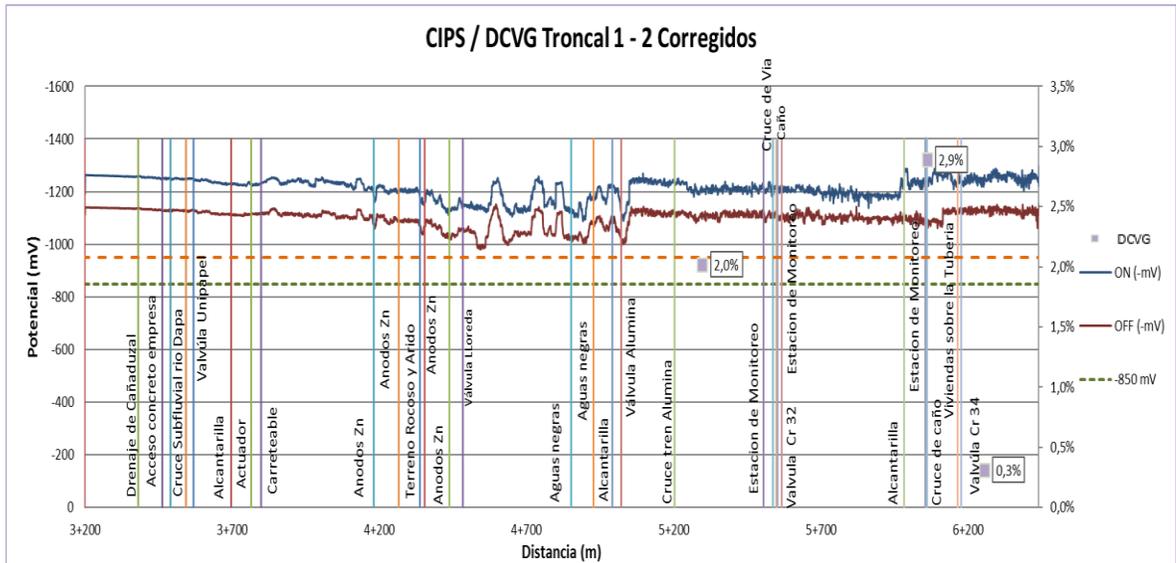


Figura Consolidado CIPS - DCVG Troncal 1 – 2 para el año 2013

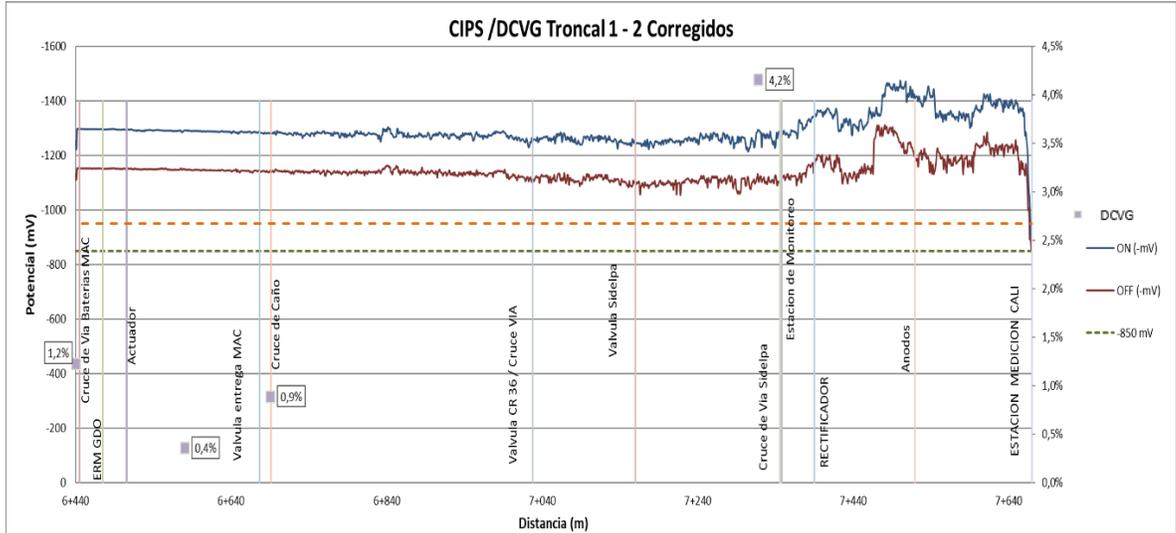


Figura Consolidado CIPS - DCVG Regional 2 para el año 2013

