



Uptc[®]

Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia



repositorio.uptc@uptc.edu.co

UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERIA

**“DISEÑO DE SISTEMA DE PROTECCION CATODICA PARA
TUBERIA EN CAMPO DE PRODUCCIÓN DE PETROLEO”**

**MONOGRAFIA
PARA OBTENER EL TITULO DE ESPECIALISTA EN GESTIÓN DE LA INTEGRIDAD
Y CORROSIÓN**



PRESENTA:

ING. JORGE ANDRES CORONADO ALVARADO

MONOGRAFIA

TUNJA -2021

TUNJA - 2021 Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja, 30 de Noviembre 2021

DEDICATORIA

El presente trabajo escrito es el fruto de un periodo de esfuerzo y aprendizaje, el cual lo dedico a Dios, a mi familia y en especial, a mi padre que partió de este mundo hace unos años pero que continua con nosotros en un plano más espiritual.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por poner en mi camino esta oportunidad de crecer como profesional. A mi familia por el apoyo brindado durante este año de crecimiento. Asimismo, ofrezco mi gratitud a todos los profesionales de las distintas áreas que me ayudaron aclarando todas las dudas que se presentaron durante el desarrollo del trabajo. Finalmente, agradezco a la universidad Pedagógica y Tecnológica de Tunja por abrirme este espacio y darme oportunidad de ampliar mis conocimientos para aportar al desarrollo del país.

CONTENIDO

RESUMEN	10
1. INTRODUCCIÓN	11
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
2.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	12
2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	12
3. JUSTIFICACIÓN	13
4. OBJETIVOS	14
4.1 OBJETIVO GENERAL	14
4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	14
5. MARCO TEÓRICO.....	15
5.1 CELDA DE CORROSIÓN.....	15
5.2 FUERZA IMPULSORA DE LA CORROSIÓN	16
5.3 ELECTROLITO	16
5.4 CELDAS POR CONCENTRACIÓN	17
5.5 ELECTRODOS DE REFERENCIA (HEMI-CELDAS)	18
5.6 POLARIDAD	18
5.6.1 Polarización.....	19
5.7 CONCEPTO DE PROTECCIÓN CATÓDICA	19
5.8 REQUERIMIENTO DE CORRIENTE.....	22
5.8.1 pH del medio en el requerimiento de corriente.....	22
5.8.2 Temperatura en el requerimiento de corriente	23
5.8.3 Efecto de los oxidantes en el requerimiento de la corriente.....	23
5.9 EFECTO DEL MOVIMIENTO RELATIVO ENTRE ESTRUCTURA Y ELECTROLITO.....	23

5.9.1 Corrientes vagabundas o parásitas.....	23
5.10 RESISTIVIDAD DEL SUELO.....	24
5.11 TIPOS DE PROTECCIONES CATÓDICAS.....	25
5.11.1 Protección catódica con ánodos de sacrificio.....	25
5.11.2 Protección catódica con corriente impresa.....	26
6.1 DESCRIPCIÓN DEL ACTIVO.....	27
6.1.1 Tubería de producción	27
6.1.2 Recubrimiento	28
6.1.3 Suelo	30
6.2 SELECCIÓN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA.....	31
6.2.1 Ánodos de sacrificio o galvánicos	31
6.2.2 Protección catódica por corriente impresa	32
7. DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA PARA EL OLEODUCTO ...	34
7.1 ÁNODOS PARA CORRIENTE IMPRESA	34
7.1.1 Relleno anódico.....	35
7.2 DATOS GENERALES DE INICIO.....	36
7.2.1 Requerimiento de corriente	36
7.2.2 Resistencia del dispensor	37
7.2.3 Resistencia del tubo	38
7.2.4 Resistencia del cable	38
7.2.5 Cálculos rectificadores	39
7.2.6 Estaciones de monitoreo y otros consumibles	40
7.3 FACTOR DE SEGURIDAD.....	41
7.4 CRITERIOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA.....	41
7.5 METODOLOGÍA DE MONITOREO	42
7.5.1 Mediciones del sistema	43
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	45

9. BIBLIOGRAFIA47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Única celda microscópica de corrosión	15
Figura 2. Celdas de corrosión en celdas disímiles.	17
Figura 3. Celdas por concentración de iones.	17
Figura 4. Protección catódica a una estructura.	21
Figura 5. Polarización de una estructura.	22
Figura 7. Protección catódica con ánodo de sacrificio.	26
Figura 8. Protección catódica con corriente impresa.....	27
Figura 9. Sistema de recubrimiento para ductos tricapa	29

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características tubería a proteger con el sistema de PC.	28
Tabla 2. Capas de recubrimiento de la tubería.....	29
Tabla 3. Grado de agresividad suelo en función de la resistividad.....	30
Tabla 4. Sondeo Eléctrico vertical (SEV) Pozo RB – 35	31
Tabla 5. Composición química ánodos MMO.....	35
Tabla 6. Datos generales de inicio.	36
Tabla 7. Otros consumibles del sistema de PC.....	41

RESUMEN

Actualmente, en todos los campos de producción de petróleo se tienen redes de ductos para el transporte de los fluidos de producción. En esta oportunidad, se presenta el caso de un ducto enterrado que transporta un fluido multifásico (petróleo, crudo y agua) de un *clúster* de producción a otro, el cual requiere de un sistema de protección catódica que mitigue los fenómenos corrosivos a los cuales estará expuesto el activo durante su vida útil de operación.

En el presente documento, se realizará una revisión de la información técnica relacionada con sistemas de protección catódica enfocada a ductos o tuberías enterradas, y de cómo mitigar fenómenos corrosivos de activos expuestos a electrolitos como el suelo.

Luego, se da una descripción del activo que en este caso es una tubería de 4" de 2700 metros, características del suelo, etc. Dicha descripción propone el insumo necesario para seleccionar y diseñar el tipo de protección catódica del sistema. Con el diseño del sistema terminado, se contabilizan los demás consumibles para el sistema de protección catódica. Otro factor importante es el monitoreo del sistema. En este documento se expondrán las distintas metodologías de monitoreo para garantizar el correcto funcionamiento y evitar fallas que se traduzcan en pérdidas de contención de fluido.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de los campos de producción de petróleo viene acompañado de la expansión de su red de tuberías para el transporte de los fluidos como: crudo agua y gas, desde la formación hasta las facilidades de producción. Durante este proceso de expansión, las tuberías se exponen a diferentes ambientes que pueden ser potencialmente peligrosos para la integridad del activo en general. Las tuberías que van enterradas, por ejemplo, son sometidas a diferentes tipos de suelos y/o condiciones.

Con base en lo anterior, es posible afirmar que se pueden tener celdas por concentración en partes del tubo expuesto o con mal recubrimiento. En donde el tubo expuesto en el suelo más conductor se comporte como ánodo; y que este mismo tubo pase por una porción de suelo menos conductor y se convierta en cátodo. En zonas del país como los llanos orientales, los suelos húmedos son muy comunes, lo que los convierte en electrolitos que, junto con las condiciones descritas anteriormente, favorecen la corrosión.

Actualmente, en un campo de producción de petróleo de los llanos orientales, se tiene enterrada una tubería de producción de petróleo que va de un clúster a otro sin un sistema de protección catódica. El presente documento pretende proponer un diseño de sistema de protección catódica para la tubería descrita anteriormente, teniendo en cuenta las características del activo, como lo son longitud, Schedule, material, tramo enterrado, etc.

Adicionalmente, se busca encontrar la corriente requerida para el sistema de protección catódica, encontrar el factor de seguridad y recomendar la metodología de monitoreo que más se adecue a las características del activo y que mayor protección brinde a la integridad de la tubería.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El presente trabajo investigativa propone abordar el problema de las tuberías enterradas en los campos de producción de petróleo, las cuales están expuestas a distintos fenómenos corrosivos internos y externos.

2.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Para el transporte de fluidos de producción (petróleo y agua) de un *clúster* a otro se instaló una tubería enterrada. Si se tiene en cuenta que el suelo actúa como un electrolito, ¿Cuál es la metodología adecuada para mitigar los fenómenos corrosivos de este tipo de activos?

2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente la tubería está en operación con un recubrimiento tricapa. Al estar enterrada, está expuesta a un electrolito como lo es el suelo que tiene características que lo pueden catalogar como potencialmente agresivo para la integridad del activo. Un activo de este tipo requiere un sistema de protección adicional al recubrimiento, el cual mitigue los fenómenos corrosivos a los cuales podrá estar expuesto el sistema para evitar pérdidas de contención.

Con un sistema adecuado para el control o mitigación de los fenómenos corrosivos, se podrá mantener la adecuada operación del oleoducto. Se debe tener en cuenta que el sistema propuesto debe tener un monitoreo que brinde la información necesaria para el correcto funcionamiento del sistema durante la vida útil.

3. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, uno de los factores que más impacto tiene en las empresas de producción de hidrocarburos es la pérdida de contención de fluidos de producción. Es imprescindible mencionar que este tipo de empresas tienen una relación muy estrecha con su entorno y comunidades circundantes. Por lo que, cuando se presentan fallas en la contención de los fluidos de producción, se tienen consecuencias económicas y ambientales que afectan de forma contundente la operación de las empresas productoras de hidrocarburos. Algunos de estos impactos son de tal magnitud, que pueden llegar a ser irreversibles.

Por este motivo, se debe garantizar la integridad de los activos y asegurar la contención de los mismos. Actualmente, se tienen diversas herramientas y /o procedimientos que permiten mitigar los fenómenos corrosivos que atacan la integridad de los equipos de contención. En este documento se explora la tecnología de protección catódica, y se evalúa qué tipo de esta tecnología se acomoda más al sistema a proteger.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar un sistema de protección catódica para la línea de producción de petróleo de clúster A a clúster B en campo de producción de petróleo de los llanos orientales.

4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Seleccionar el sistema de protección que más se adecue a las condiciones del activo a proteger.
- Calcular la corriente requerida para el sistema.
- Encontrar el factor de seguridad.
- Recomendar la metodología de monitoreo del sistema.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 CELDA DE CORROSIÓN

Analizando el proceso de corrosión para una única celda, es posible evidenciar que en una porción de metal en contacto con el agua se puede dar que el metal suministre el ánodo, el cátodo y el paso electrónico de la celda de corrosión. No obstante, también es posible que el electrolito sea suministrado por el agua con lo que se completaría la celda de corrosión.

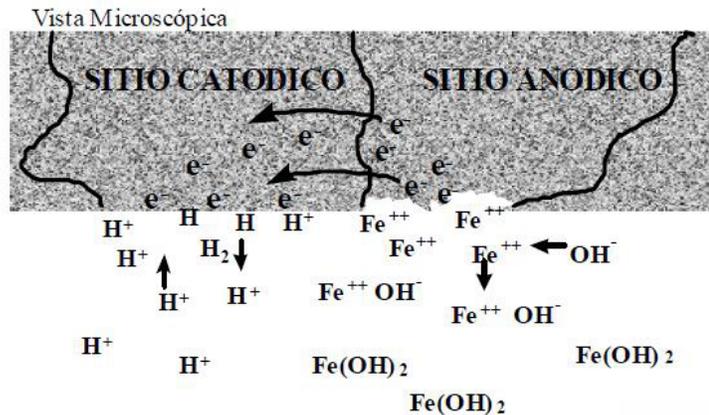


Figura 1. Única celda microscópica de corrosión

Fuente: CP 2-Cathodic protection Technician

En la celda microscópica de corrosión de la figura 1., se observa cómo los iones metálicos pasan al electrolito (que está ionizado con H^+ y OH^-) desprendiéndose de sus electrones que se desplazan por el paso metálico hacia la superficie catódica del metal, generando la pérdida de material. ¹ Adicionalmente a este fenómeno de corrosión, se puede presentar que los electrones provenientes del ánodo se junten con los iones hidrógeno de la solución, formando un átomo de hidrógeno, el cual, asociado con otro átomo de hidrógeno, puede formar hidrógeno gaseoso (H_2). Estos átomos pueden ingresar a la estructura cristalina generando fragilización por hidrógeno del metal. Los iones metálicos

¹ NACE, international. CP 2-Cathodic Protection Technician. Manual de curso. 2009

se combinan con los hidroxilos en el electrolito formando óxidos de hierro que por lo general se depositan en la superficie del metal. ²

5.2 FUERZA IMPULSORA DE LA CORROSIÓN

Es preciso señalar que, el propio metal puede ser la fuente para el voltaje impulsor en una celda de corrosión, ya sea por variaciones en la estructura del grano del metal, la composición de la aleación o la temperatura. Asimismo, el metal absorbe energía durante su transformación lo que puede determinar el voltaje o estado activo del metal. En el caso de metales con el hierro, magnesio y aluminio, el voltaje es relativamente elevado, mientras que para metales como la plata y el oro. Cuanto mayor sea la energía, más activo es el metal y más tendiente será a corroerse.

Cuando el acero de una tubería entra en contacto con un electrolito como el suelo, se pueden presentar fenómenos de corrosión. Durante este proceso, el hierro se combina con el oxígeno para formar óxidos de hierro. Debido a la inestabilidad termodinámica del hierro, la corrosión se dará fácilmente para que el hierro retorne a su estado de menor energía.

5.3 ELECTROLITO

Cuando una estructura de un único metal atraviesa o entra en contacto con un electrolito compuesto como pueden ser distintos tipos de suelos, con distintas sustancias químicas, temperaturas, etc., la estructura puede experimentar diferencias de voltaje. En la figura 2., se ejemplifican las celdas de corrosión en celdas disímiles.

² Ibid., p. 5

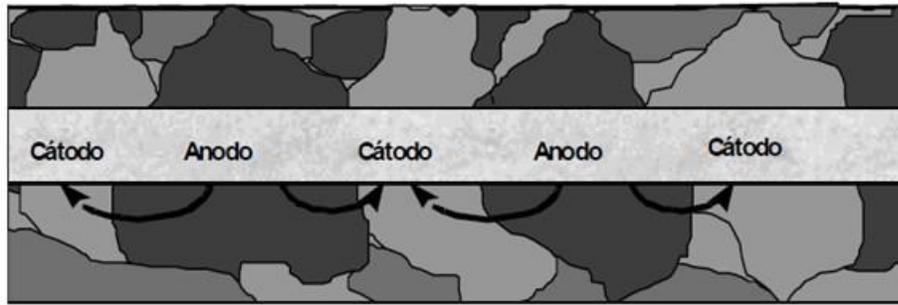


Figura 2. Celdas de corrosión en celdas disímiles.

Fuente: CP 2-Cathodic protection Technician

5.4 CELDAS POR CONCENTRACIÓN

Las celdas por concentración son las responsables de gran parte de la corrosión en suelos. Como se observó en el numeral anterior, las tuberías atraviesan diferentes suelos, lo que propicia las celdas por concentración, especialmente en tubos desnudos o con mal recubrimiento.³

La porción de tubo que se encuentra en el suelo más conductor se comporta como ánodo y la porción en el suelo menos conductor sería el cátodo; el suelo húmedo sería el electrolito. El tubo sería la conexión entre las zona anódicas y catódicas. El flujo de corriente se daría del ánodo al suelo y del suelo a la zona catódica como lo evidencia la figura 3:

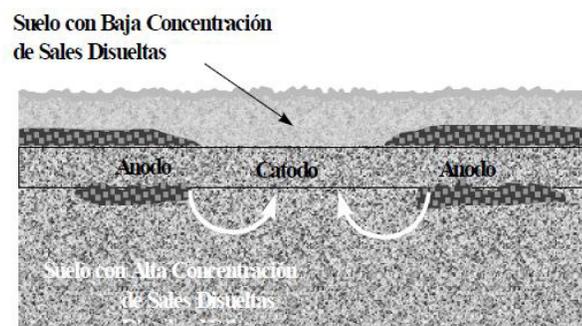


Figura 3. Celdas por concentración de iones.

Fuente: CP 2-Cathodic protection Technician

³ Ibid., p. 8

Los dos tipos de concentración de celda más comunes se dan por concentración de oxígeno y de iones metálicos. El fenómeno de celdas por concentración de oxígeno se puede dar en tuberías enterradas. Por lo general, el tubo se apoya en el suelo al fondo de la zanja en una superficie menos permeable, mientras que, para el resto del relleno, el suelo de los laterales y la parte superior son más permeables al oxígeno⁴. Como es común en las celdas de concentración de oxígeno, el ánodo sería la parte inferior del tubo (menor concentración de oxígeno) y el cátodo los laterales y la parte superior (mayor concentración de oxígeno). El electrolito sería el suelo y el tubo la conexión que cierra el circuito. Este tipo de circuito explicaría las fallas en la parte inferior de las tuberías enterradas.

5.5 ELECTRODOS DE REFERENCIA (HEMI-CELDAS)

Los electrodos de referencias, o Hemi-celdas, son dispositivos que permiten medir el potencial de una superficie metálica expuesta a un electrolito. Lo que se llama estructura potencia, “estructura – electrolito”, es en realidad el potencial medido entre la estructura y un electrodo de referencia. El electrolito en sí mismo no tiene un valor de potencial con respecto al cual medir el potencial de una estructura. Los electrodos de cobre – sulfato son los electrodos más usados para medir potenciales de estructuras encerradas.

5.6 POLARIDAD

Es importante tener en cuenta el parámetro de la polaridad; actualmente, la mayoría de los instrumentos que indican la polaridad son digitales. Sin embargo, es importante revisar las conexiones del instrumento y el signo que debería esperarse para poder detectar problemas. Se debería observar un signo negativo para una medición negativa y ningún signo positivo para una medición positiva.

Cuando se conecta un voltímetro a una tubería con flujo externo de corriente, la lectura es positiva (+) cuando el terminal positivo se conecta al comienzo del flujo de corriente.

⁴ *Ibíd.*, p. 5

En el caso de medir la diferencia potencial de dos metales distintos, el signo positivo aparece cuando el terminal positivo se conecta al metal más noble. En este caso la corriente circula del metal activo al noble por el electrolito y del noble al activo por el paso metálico. Como la corriente entra por el terminal positivo, la lectura es positiva⁵.

Por otra parte, las lecturas estructura – electrolito son negativas (-) con respecto al electrodo de referencia. Lo que quiere decir que al conectar el terminal negativo del voltímetro al electrodo de referencia se obtendrá lectura negativa⁶.

5.6.1 Polarización

Con el paso del tiempo y el flujo de corriente, se presentan fenómenos de polarización en el ánodo y en el cátodo, disminuyendo la diferencia de potencial entre estas dos partes. De esta manera, disminuye la corriente (según ley de ohm) y la velocidad de corrosión hasta alcanzar un equilibrio entre los efectos de polarización y despolarización.

La polarización ocurre en sentido opuesto a la corriente que la causa; durante el movimiento de la corriente entre ánodo – cátodo lo que hará que el potencial del ánodo se acerque al de cátodo y viceversa hasta alcanzar un potencial mixto estable (EM). La diferencia entre los potenciales polarizados del ánodo y del cátodo es la fuerza impulsora de la corrosión; en este estado, la corriente se define como corriente de corrosión (I_{corr}) del sistema.

5.7 CONCEPTO DE PROTECCIÓN CATÓDICA

Es necesario tener en cuenta que la composición del metal es importante para determinar qué áreas de la superficie se convierten en ánodos o en cátodos. Pueden surgir diferencias de potencial electroquímico entre áreas adyacentes por la distribución desigual de los elementos en la aleación o en los contaminantes dentro de la estructura

⁵ Ibid., p. 10

⁶ Ibid., p.10

del metal. No obstante, la corrosión también puede originarse por la diferencia entre el metal de la soldadura, las zonas afectadas por calor y el metal base.

Las propiedades físicas y químicas de los electrolitos también influyen en la formación de áreas catódicas sobre la superficie del metal⁷. Por ejemplo, es posible que se generen diferencias de potencial entre áreas de una superficie de acero, debido a las diferentes concentraciones de oxígeno. Las áreas con bajas concentraciones de oxígeno se convierten en anódicas y las áreas con altas concentraciones de oxígeno se convierten en catódicas

De igual manera, las características del suelo afectan sustancialmente el tipo y velocidad de corrosión de una estructura en su contacto. Por ejemplo, las sales disueltas influyen en la capacidad de transporte de corriente de los electrolitos del suelo y ayuda a determinar las velocidades de reacción sobre las áreas anódicas y catódicas. El contenido de humedad, el pH, la concentración de oxígeno y otros factores interactúan de manera compleja influyendo en la corrosión.⁸

Como se ha visto anteriormente, la corrosión es el resultado de una reacción electroquímica entre dos electrodos (ánodo – cátodo) en un mismo electrolito. En una misma superficie metálica (tubería enterrada, por ejemplo) pueden existir muchos sitios anódicos y catódicos microscópicos. La protección catódica busca reducir a cero la diferencia de potencial entre ánodo – cátodo, disminuyendo a cero la corriente de corrosión (I_{corr}). Esto se logra imprimiendo corriente hacia la estructura desde un electrodo externo y polarizando los sitios catódicos en dirección electronegativa. A medida que los potenciales de los sitios catódicos se polarizan hacia los potenciales de los sitios anódicos, se reduce la corriente de corrosión. Cuando esto ocurre en toda la estructura, esta pasa a ser una celda macroscópica intencional como se puede evidenciar en la figura 4:

⁷ Ibid., p. 12

⁸ Ibid., p.12

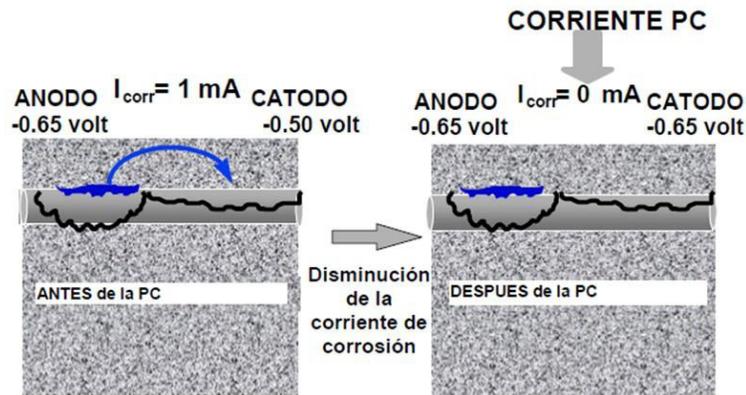
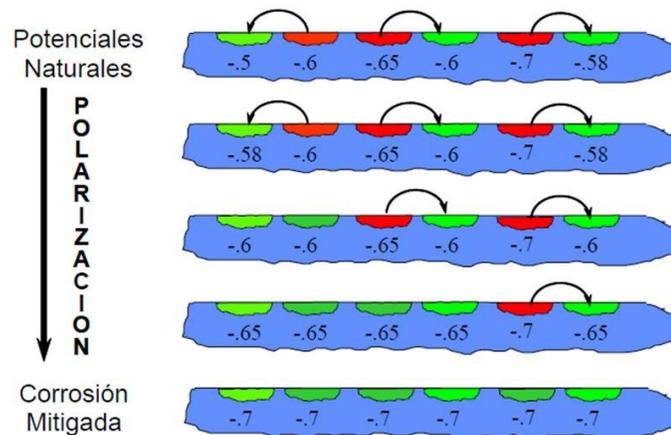


Figura 4. Protección catódica a una estructura.

Fuente: CP 2-Cathodic Protection Technician

De esta manera, es posible observar que la corrosión del metal cesará una vez que la corriente aplicada por la protección catódica iguale o supere la de corriente de corrosión.

Con base en lo anterior, es preciso afirmar que “la protección catódica es un fenómeno de polarización y la polarización es un cambio de potencial por efecto de la circulación de corriente”⁹. La polarización se lleva a cabo en etapas donde los sitios más catódicos o positivos son los primeros en polarizarse. En la figura 5., se observa un ejemplo gráfico de la polarización de una estructura.



⁹ Ibid., 23

Figura 5. Polarización de una estructura.

Fuente: CP 2-Cathodic pTechnician

Si bien la polarización de los cátodos al potencial a circuito abierto de los ánodos es el principal criterio para eliminar la corrosión, es muy difícil determinar el potencial de circuito abierto del sitio anódico más activo debido a que las celdas de corrosión son microscópicas.¹⁰

Asimismo, luego de analizar previamente los factores que afectan la polarización y los que afectan la corriente de corrosión, para un sistema de protección catódica, la polarización es deseable para disminuir el requerimiento de corriente de la estructura.

5.8 REQUERIMIENTO DE CORRIENTE

El requerimiento de corriente es la cantidad de corriente necesaria para suministrar la protección adecuada.¹¹ Dicha demanda de corriente depende de la superficie a proteger y de las características de polarización de la estructura en ese medio. Por lo que se dice que, el requerimiento de corriente es directamente proporcional a la superficie.

5.8.1 pH del medio en el requerimiento de corriente

Es necesario señalar que la necesidad de corriente es mayor en medios ácidos. Los electrolitos como el suelo o el agua, por lo general, no tienen pH neutro (pH=7) dado su contenido de diversas sales iónicas. Por ejemplo, el uso de algunos fertilizantes en el suelo puede disminuir el pH.

¹⁰ Ibid., p. 26

¹¹ Ibid., p. 27

5.8.2 Temperatura en el requerimiento de corriente

El aumento de la temperatura tiene un efecto despolarizador debido a que aumenta la velocidad de difusión de especies reducibles en los sitios catódicos, lo que genera una disminución de la polarización por concentración y por consiguiente, un aumento en el requerimiento de corriente de protección. De igual manera, con el aumento de la temperatura viene el incremento de la ionización traduciéndose en aumento de la corriente de protección.

5.8.3 Efecto de los oxidantes en el requerimiento de la corriente

Es necesario considerar que el oxígeno participa en la reacción de reducción catódica, lo que hace disminuir la polarización. Por este motivo, estructuras bien aireadas requieren más corriente que las estructuras en suelos poco aireados como la arcilla.¹²

5.9 EFECTO DEL MOVIMIENTO RELATIVO ENTRE ESTRUCTURA Y ELECTROLITO

El movimiento relativo entre estructura y electrolito genera un aumento relativo de las especies reducibles en la superficie de la estructura, como, por ejemplo, en hélices de barcos, muelles y estructuras *off shore*.¹³

5.9.1 Corrientes vagabundas o parásitas

Son aquellas corrientes eléctricas que circulan en el suelo fuera de los circuitos previstos en el diseño del sistema de protección catódica. La intensidad de estas corrientes con frecuencia es variable y depende esencialmente de la naturaleza y funcionamiento de la fuente emisora. De igual manera, la corriente eléctrica busca siempre recorridos de menor resistencia y por esto, sigue con facilidad las canalizaciones metálicas enterradas y en particular las envolturas metálicas de otros cables¹⁴.

¹² *Ibid.*, p. 32

¹³ *Ibid.*, p. 36

¹⁴ *Ibid.*, p. 40

Por lo anterior, la corrosión se produce siempre en los lugares en donde la corriente sale de la estructura que ha recorrido, provocando una disolución anódica aún más peligrosa. La figura 6., ilustra el mecanismo de la corrosión de una tubería motivada por la acción de corrientes vagabundas que provienen de un sistema de tracción eléctrica.¹⁵

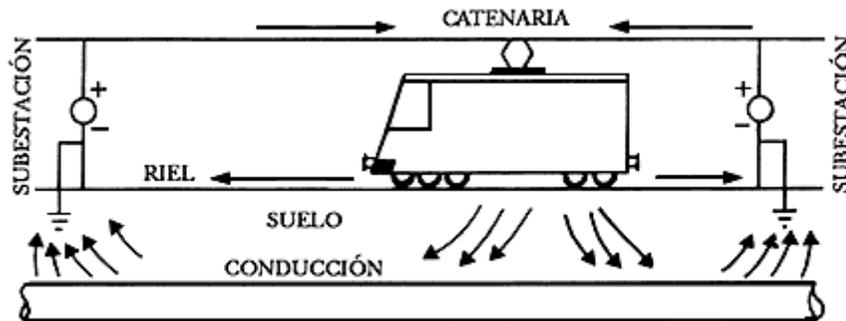


Figura 6. Mecanismo de corrosión de una tubería por efecto de las corrientes vagabundas que provienen de un sistema de tracción eléctrica.

Fuente: Cathodic Corrosion Protection Systems: A Guide for Oil and Gas Industries

5.10 RESISTIVIDAD DEL SUELO

Para determinar la viabilidad de un sistema de protección catódica en una estructura que está enterrada, se debe conocer la resistividad del suelo o terreno. La unidad de resistividad del suelo es el ohm-centímetro (W-cm). La resistividad de un suelo determinado es igual numéricamente a la resistencia que ofrece el terreno contenido en un cubo de 1 cm de arista y se mide entre las caras opuestas del cubo. La resistividad de un terreno depende, en particular, de su estructura, de las dimensiones de sus partículas constituyentes, de su porosidad y permeabilidad, del contenido de agua (humedad) y de

¹⁵ PRESS ROOM. Cathodic Corrosion Protection Systems: A Guide for Oil and Gas Industries. {En línea} {27 de noviembre de 2021}. p. 15

su contenido de iones. Por ejemplo, en lo que se refiere a un suelo arcilloso, con un 5 % de humedad, dicho suelo puede presentar una resistividad de 10 000 ohm-m, en cambio, con un 20 % de humedad, la resistividad disminuye hasta 100 ohm-m.

16

Es obvio, por tanto, que la resistividad de un terreno y especialmente la de los estratos superiores, puede variar notablemente con las estaciones del año, la precipitación pluvial, la actividad agrícola e industrial, etcétera. Caso contrario de la temperatura, la cual no ejerce una influencia tan marcada, a menos que supere el punto de congelación, después de lo cual hay un aumento significativo de la resistividad.

En lo que se refiere a la acidez, los suelos muy ácidos ($\text{pH} < 5.5$) pueden motivar una rápida corrosión del metal desnudo, haciendo que la agresividad del suelo aumente con el incremento de la acidez (disminución del pH), sin embargo, estos valores de pH no son normales. La mayor parte de los suelos tienen pH comprendidos entre 5.0 y 8.0, en cuyo caso la corrosión depende de otros factores. En suelos alcalinos parece existir una cierta correlación entre conductividad y agresividad.

5.11 TIPOS DE PROTECCIONES CATÓDICAS

Seleccionar el tipo de protección catódica más conveniente para una determinada estructura depende esencialmente de consideraciones técnicas y económicas. Deben analizarse las ventajas y desventajas de cada sistema, su costo, su viabilidad técnica, la vida útil que se desea, entre otros aspectos.

5.11.1 Protección catódica con ánodos de sacrificio

La realización de la protección catódica con ánodos de sacrificio o galvánicos se lleva a cabo normalmente con tres metales característicos: zinc (Zn), magnesio (Mg), aluminio (Al) y sus aleaciones. El zinc ha sido siempre el material anódico clásico, siendo el pionero en el desarrollo de la protección catódica. Los ánodos de aleaciones de magnesio han sido también utilizados con éxito; principalmente se emplean para la protección de estructuras que requieren de una polarización rápida, o en medios agresivos de

¹⁶ Ibid., p. 19

resistividad elevada, como los suelos. El aluminio es un material anódico de gran interés por sus características electroquímicas.

Según la serie electroquímica de los metales, un metal tendrá carácter anódico respecto de otro si se encuentra arriba de él en dicha serie. Así, por ejemplo, hay metales “anódicos” con relación a otros. ¹⁷El metal que actúa como ánodo se "sacrifica" (se disuelve) en favor del metal que actúa como cátodo; por esto el sistema se conoce como protección catódica con ánodos de sacrificio. En la figura 7., se muestra un ejemplo de protección catódica con ánodo de sacrificio.

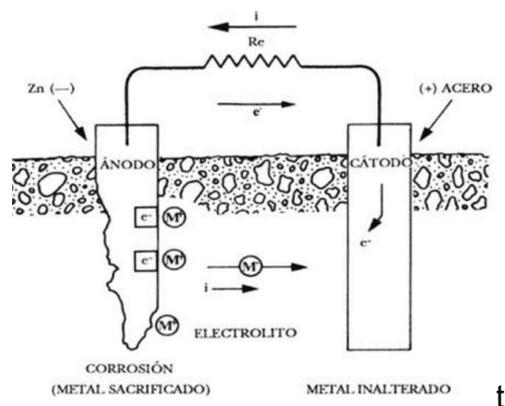


Figura 7. Protección catódica con ánodo de sacrificio.

Fuente: <https://www.aiu.edu>

5.11.2 Protección catódica con corriente impresa

El sistema de protección catódica utiliza la corriente suministrada por una fuente para imprimir la corriente necesaria para la protección de una estructura equiparando sus potenciales. Este procedimiento consiste en unir eléctricamente la estructura a proteger con el polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua (pura o rectificadora) y el positivo con un electrodo auxiliar que cierra el circuito. Los electrodos auxiliares se hacen de chatarra de hierro, aleación de ferrosilicio, grafito, titanio platinado, etc. Es completamente indispensable la existencia del electrolito (medio agresivo) que

complete el conjunto para que se realice el proceso electrolítico. En la figura 8., se muestra un ejemplo de protección catódica con corriente impresa.

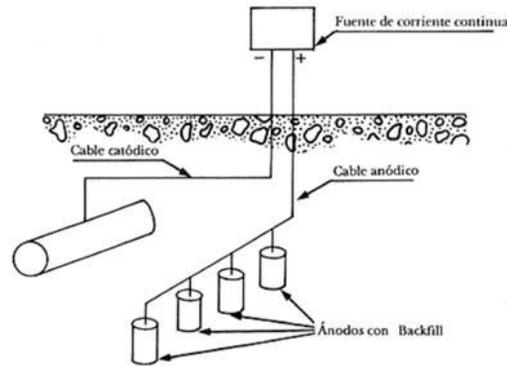


Figura 8. Protección catódica con corriente impresa.

Fuente: <https://www.aiu.edu>

6. MARCO METODOLOGICO

Actualmente, en un campo de producción de petróleo en los llanos orientales de Colombia, se tiene una tubería enterrada que transporta fluidos de producción de petróleo, dicha tubería va desde un punto que se llamará "Cluster A" a otro que se denominará "Cluster B". En primera instancia, se realizará una descripción del activo en general, iniciando con la tubería, recubrimiento de la tubería y características del suelo en el que está enterrada. Posteriormente, con la información recolectada, se hará la selección del sistema de protección catódica más adecuado para el activo.

Finalmente, con el sistema de protección catódica seleccionado, se pretende evidenciar los cálculos referentes al diseño del sistema con el que se determinarán consumos de corriente, masa anódica, estaciones de monitoreo, etc.

6.1 DESCRIPCIÓN DEL ACTIVO

6.1.1 Tubería de producción

Las características de la tubería en cuestión se evidencian en la tabla 1:

Longitud tubería (m)	2700
diámetro nominal (in)	4
SCH	40
Recubrimiento	Tricapa
Eficiencia del recubrimiento (%)	98
Material	API 5L X42

Tabla 1. Características tubería a proteger con el sistema de PC.

Como se mencionó en apartados anteriores, la tubería a proteger está enterrada, por lo que requiere de un sistema de protección catódica. Si bien el activo tiene un recubrimiento tricapa, se propone un sistema de protección catódica que mitigue aún más los fenómenos de corrosión externa que se pueden presentar en suelos propios de zonas como los llanos orientales.

La tubería API 5L X42 es también conocida como tubería L290, por su límite elástico mínimo 42 Psi (290 Mpa). Es un grado medio en las especificaciones API 5L e ISO 3183, utilizado comúnmente para transporte de fluidos como el petróleo y el gas.

6.1.2 Recubrimiento

Al revisar las características de la tubería dispuestas en la tabla 2., se encuentra que la tubería tiene un recubrimiento tricapa; este sistema de recubrimiento externo para ductos de tres componentes tiene temperaturas de servicio de hasta 185°F. Además, ofrece una resistencia moderada a químicos, abrasión del suelo y corrosión a temperaturas moderadas, ideal para sistemas de ductos enterrados.

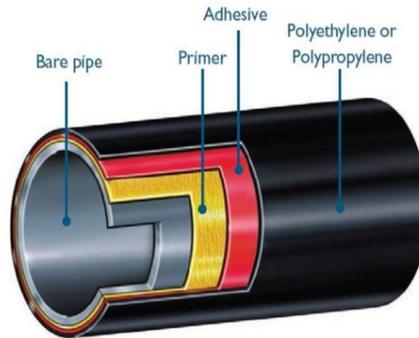


Figura 9. Sistema de recubrimiento para ductos tricapa

Fuente: <http://www.galvanizedsteeltube.com>

El grosor de la capa estándar es de 2,5 mm o 3/5 mm como mínimo, pero este valor se puede cambiar a petición del sistema o medio donde se va a exponer. Las capas se muestran en la tabla 2:¹⁸

Capa	Material de revestimiento
1ª capa (primer)	Epoxi líquido
2ª capa (adhesivo)	copolímero
3ª capa	Polietileno

Tabla 2. Capas de recubrimiento de la tubería

Fuente: <http://www.galvanizedsteeltube.com>

El recubrimiento anteriormente descrito, según las características técnicas, brinda una protección adecuada para ductos enterrados. Sin embargo, se debe tener en cuenta que en la superficie total de la tubería se pueden presentar pequeños poros por los cuales se pueden producir fenómenos de corrosión. Por esta razón y como propósito de este trabajo, se establece una eficiencia del 98 % de recubrimiento para los 2700 m de tubería.

¹⁸ TIANJIN WANLEI Steel Pipe Co., Ltd. Ficha Técnica. Recubrimiento de tubería.

6.1.3 Suelo

Resulta imprescindible tener en cuenta las características del suelo para ver el grado de agresividad del mismo. En lo que respecta a la resistividad, se sabe que el método de protección catódica considera el suelo como un electrolito. La resistividad del suelo es la medición de la capacidad de este para favorecer la corrosión electroquímica. Lo anterior depende de tres factores: Tipo de suelo, contenido de electrolitos y humedad.¹⁹

6.1.3.1 Medición de la resistividad del suelo

Para medir la resistividad del suelo se deben realizar varias mediciones, ya que este parámetro no es uniforme en las diferentes capas que lo componen. La resistividad es uno de los factores que determina la corrosividad del sistema. En la tabla 3., se muestra el grado de agresividad del suelo en función de la resistividad.

Resistividad (Ω -m)	Grado de agresividad
< 10	Severo
10 - 100	Discreto
100 - 1000	Escaso
> 1000	Nulo

Tabla 3. Grado de agresividad suelo en función de la resistividad.

Fuente: <https://www.aiu.edu>

La medida de la resistividad del suelo puede utilizarse como base para saber si los sistemas de protección catódica son los adecuados o no para proteger un activo. Según un estudio publicado en septiembre de 2010 por el Instituto Colombiano De Geología y Minería (INGEOMINAS)²⁰ en el que se realizó la cartografía geológica de la zona centro y sur del departamento del Meta, se realizaron exploraciones geo eléctricas en el campo rubial. Se midió la resistividad del suelo en el CPF, campamento Arrayanes, batería 4 y

¹⁹ Ibid.

²⁰ INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA INGEOMINAS. Cartografía Geológica de la zona centro y sur del Departamento Del Meta. Planchas 286, 287, 288, 289, 290, 307, 308. Escala 1: 100.000. Bogotá D.C. 2010

pozo RB – 35. Para este estudio en particular, se va a tomar como referencia los resultados del sondeo eléctrico vertical (SEV) obtenido en el pozo RB-35. La tabla 4., muestra los resultados obtenidos en el estudio:

Capa	Profundidad (m)	Resistividad (ohm – m)	Interpretación hidrogeológica
1	0 - 1.98	2428	Suelo arenoso seco
2	1.98 - 9.97	112	Arena saturada
3	9.97 - 18.8	25.3	Limos
4	18.8 - 36.8	218	Arenas interestratificadas, saturadas
5	36.8 - 86.3	5.99	Arcillas

Tabla 4. Sondeo Eléctrico vertical (SEV) Pozo RB – 35

Fuente: cartografía geológica de la zona centro y sur del departamento del meta INGEOMINAS

En SEV en las cercanías del pozo RB – 35 (tabla 4.) se observan los resultados de resistividad de 5 capas. Se tomará como referencia la resistividad obtenida en la capa 2 (Profundidad entre 1.98 m – 9.97 m), es decir, 112 ohm-m en la capa de arena saturada. Este valor corresponde, según la tabla 3., al grado de agresividad suelo en función de la resistividad a una agresividad escasa.²¹

6.2 SELECCIÓN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA

A continuación, se mostrarán características y aplicaciones de los 2 tipos de sistemas de protección catódica

6.2.1 Ánodos de sacrificio o galvánicos

6.2.1.1 Aplicaciones

Los sistemas de ánodos galvánicos son utilizados en los siguientes casos:

- Requerimientos de corriente relativamente bajos.

²¹ Ibid., 18

- Electrolitos de baja resistividad.
- Para proveer corriente de protección catódica en forma localizada sobre una zona específica de una estructura. (Zonas con fallas en recubrimiento).
- Para proveer corriente a una zona problemática de una estructura.
- Válvulas enterradas.
- Para facilidades de producción (intercambiadores calor, tratadores electrostáticos).
- Estructuras *off-shore*

6.2.1.2 Características

- Este sistema de ánodos galvánicos es el indicado para electrolitos de baja resistividad.
- Los ánodos galvánicos se recomiendan generalmente para estructuras pequeñas. Para grandes instalaciones, debe hacerse una cuidadosa evaluación técnica y económica que tenga en cuenta que el costo inicial será muy alto.
- Cuando el diseño se realiza para una vida útil corta,
- Los sistemas galvánicos con ánodos de zinc y de aluminio son normalmente autorregulables. Cuando se utilizan ánodos de Mg, el sistema acepta una pequeña regulación.
- El sistema presenta un índice elevado de continuidad operacional.
- Con un Sistema de ánodos galvánicos no hay posibilidad de una inversión de la polaridad.

6.2.2 Protección catódica por corriente impresa

6.2.2.1 Aplicaciones

Los sistemas por corriente impresa se usan comúnmente:

- Para requerimientos de corriente grandes, especialmente en estructuras desnudas o mal recubiertas.

- En electrolitos de cualquier resistividad.
- Como una forma económica de proteger estructuras en las que los ánodos galvánicos se han consumido.
- Para corregir problemas de corrientes vagabundas o interferencia catódica.
- Para proteger grandes cajas de agua en condensadores, calentadores de petróleo, y otros recipientes.
- Para el interior de tanques de almacenamiento de agua.
- Para el exterior de fondos (tanto primarios como secundarios) de tanques de almacenamiento a nivel.
- Para tanques de almacenamiento enterrados.
- Componentes sumergidos en estructuras marítimas *off-shore*.

6.2.2.2 Características

- La resistividad del medio o electrolito no constituye una limitación seria para el sistema de corriente impresa, una vez ajustada la diferencia de potencial necesaria para proporcionar dicha corriente.
- Este sistema es el indicado para estructuras medianas y grandes.
- El sistema necesita de un seguimiento operacional, especialmente de una inspección periódica del equipo de impresión de corriente. La inspección de los ánodos puede ser menos frecuente ya que están proyectados para una vida útil de 20 años o más.
- El sistema de corriente impresa permite un amplio intervalo de regulación mediante la variación del voltaje de salida de los equipos para la impresión de la corriente, siempre y cuando se proyecte en forma adecuada.
- En general, el costo inicial es mayor que el de un sistema de ánodos galvánicos, a menos de que se trate de una estructura muy grande y diseñada para una vida útil larga.

Teniendo en cuenta las aplicaciones y características descritas de los dos sistemas y con la reunión de la información del sistema a proteger, se selecciona el método de protección

catódica por corriente impresa para el oleoducto con base en las siguientes consideraciones:²²

- Aplica para bajas y altas resistividades del suelo. Es preciso tener en cuenta que estas resistividades pueden variar por factores climáticos como la temporada de lluvias, por lo que el sistema de corriente impresa es el más adecuado.
- Por las dimensiones del oleoducto (2700 m y 4”).
- Se puede diseñar para una vida útil larga.

- Para el suministro de corriente se puede contar con la energía del *clúster* de producción A por lo que la energía no sería una limitante.

7. DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA PARA EL OLEODUCTO

Los principales componentes básicos de un sistema de protección catódica por corriente impresa son: ánodos, relleno anódico, fuente de energía (rectificador), cableado y conexiones. A continuación, se presenta la justificación con relación a la selección de algunos de los materiales y los datos generales de inicio para el diseño del sistema.

7.1 ÁNODOS PARA CORRIENTE IMPRESA

Para la selección de los ánodos se deben tener en cuenta consideraciones como costos, tasas de consumo, etc. Para este caso en particular se recomienda el uso de ánodos de mezcla de óxidos metálicos (MMO por sus siglas en inglés). Son ánodos de óxidos de metales de tierras raras depositados en un sustrato de titanio. La velocidad de consumo está por el orden de 1.0E-6 Kg/A-y. La composición química de este producto se muestra en la tabla 5:

²² TECNOLOGÍA TOTAL. Ingeniería en integridad y corrosión. Ficha técnica.

ASTM B338 GRADO I							
C%	Fe%	N%	O%	H%	Otros (Individual)	Otros (Total)	Ti%
0.08 máx	0.20 máx	0.03 máx	0.18 máx	0.015 máx	0.10 máx	0.40 máx	La diferencia

Tabla 5. Composición química ánodos MMO

Fuente: www.tecnologiatotal.net

Sus características de dichos ánodos son:

- Fácil instalación y transporte
- Livianos
- Larga durabilidad

Cabe señalar que las dimensiones de los ánodos seleccionados para el sistema serán de 1" de diámetro por 45" de longitud. No obstante, otro factor a tener en cuenta en el diseño es la instalación de los ánodos, es que estos pueden estar de forma remota o distribuida. Para este diseño se recomienda la instalación remota en pozo excavado desde la superficie. Consultando la norma NACE CP 2 *Cathodic Protection Technician*, se pueden hacer excavaciones a 15.24 m o entre 7,62 m – 15.24 m. Para este estudio se recomienda 8 m.²³

La configuración de los ánodos seleccionada para este diseño será de forma perpendicular, debido a que la tubería tiene buen revestimiento y se cuenta con buen acceso a la locación.

7.1.1 Relleno anódico

Como relleno anódico se recomienda el uso de coque. Este material de relleno usualmente se utiliza alrededor de los ánodos. El objetivo de este material es:

- Reducir la resistividad del suelo aumentando el drenado de corriente.

²³ NACE, international. CP 2-Cathodic Protection Technician. Manual de curso. 2009.

- Aumentar la superficie del ánodo.
- Reducir la tasa de consumo del ánodo.

La densidad de este material es de 1185.37 kg/m³. Este material y/o los ánodos se empaquetan en una capsula de acero galvanizado (Canister).

7.2 DATOS GENERALES DE INICIO

Los datos generales de inicio para el diseño del sistema de protección catódica para el oleoducto se muestran en la tabla 6:

DATOS GENERALES DE INICIO			
Longitud	2700 m	resistividad del terreno	112.000 ohm-m
Diametro externo	0.1143 m	Vel consumo	1.0E-6 Kg/A-y
espesor nominal	0.0060 m	diametro anodo	0.03 m
Diametro interno	0.1083 m	Longitud anodo	1.14 m
% de area desnuda	2.00%	Separacion entre anodos	8.00 m
Densidad de corriente	0.020 A/m2	densidad coque	1185.37 Kg/m3
Vida util del sistema	20 Años		

Tabla 6. Datos generales de inicio.

Con respecto a la densidad de la corriente, se tiene en cuenta que este valor ha sido determinado en función del estado superficial de acero con un sistema pasivo de protección. Teniendo presente que la tubería está recubierta, se toma un valor de 0.02 A/m² para la densidad de corriente del sistema.

7.2.1 Requerimiento de corriente

Para el cálculo de requerimiento de corriente se tiene se considera el área a proteger. Para el cálculo del área total del tubo se emplea la ecuación 1:

$$A_{Tubo} = \pi * D_{ext} * L_{Tubo} \text{ (EC 1.)}$$

$$A_{Tubo} = 969.5 \text{ m}^2$$

Teniendo presente que la eficiencia del recubrimiento es del 98 %, el área a proteger es 2 %, se evidencia que:

$$A_{Proteger} = 19.39 \text{ m}^2$$

Con el conocimiento del área a proteger, se puede calcular el requerimiento de corriente teniendo presente, además, la densidad de corriente siguiente:

$$I_{Req} = A_{Proteger} * \delta_{Corr} \text{ (EC 2.)}$$

Donde:

I_{Req} : Corriente Requerida (A)

$A_{Proteger}$: Área a proteger (m^2)

δ_{Corr} : Densidad de la corriente (A/m^2)

$$I_{Req} = 19.39 \text{ m}^2 * 0.02 \text{ A}/\text{m}^2$$

$$I_{Req} = 0.388 \text{ A}$$

Para continuar con el diseño, se deben calcular las resistividades del dispensor, del tubo (acero) y del cable.

7.2.2 Resistencia del dispensor

Se recomienda instalar los ánodos en un dispensor superficial. Para el cálculo de la resistencia del dispensor se utiliza la ecuación 3:

$$R_N = \frac{\rho}{2\pi NL} \left[\left(\ln \frac{8L}{d} \right) - 1 + \left(\frac{2L}{S} \ln 0.656N \right) \right] \text{ (EC 3)}$$

Donde:

R_N : Resistividad del dispensor (Ω)

ρ : Resistividad del terreno ($\Omega - \text{m}$)

N: Número de ánodos

L: Longitud ánodo (m)
d: diámetro del ánodo (m)
S: Separación ánodos (m)

$$R_N = 29.33 \Omega$$

Para el número de ánodos del sistema, se hacen los cálculos con base en tres unidades. Para los sistemas de corriente impresa se ajustan los ánodos necesarios para que las resistencias del sistema se ajusten al voltaje de 15 Voltios en los rectificadores del mercado. Los cálculos se mostrarán en las siguientes ecuaciones.

7.2.3 Resistencia del tubo

Otra de las resistividades que se deben calcular es la resistencia a la corriente que ofrece el tubo. Para este cálculo se necesita la resistividad del acero. Para el acero se consultó la norma CP 2-*Cathodic Protection Technician* en la tabla 6. La resistividad del tubo se calcula con la ecuación 4:

$$R_{Tub} = \rho_{Tub} \frac{L}{A_{STr}} \text{ (EC 4)}$$

Donde:

R_{tub} : Resistencia tubo Ω

ρ_{Tub} : Resistividad acero ($8.79E - 07 \Omega - m$)

L: Longitud de tubería (m)

A_{STr} : Area sección transversal tubo (m^2)

$$R_{tub} = 2.256 \Omega$$

7.2.4 Resistencia del cable

Para los cálculos de la resistencia del cable se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- La longitud del cable negativo es de 8 metros.
- La longitud de cable del dispersor es de 24 metros. Como son 3 ánodos y la separación es de 8 metros, se necesitan 24 metros.
- En total se hace el cálculo de la resistencia de cable para 40 metros.
- La resistencia de un cable calibre 2 es de 0.048 Ω /1000 m de cable.

Con base en lo anterior en la ecuación 5. se formula que:

$$R_{cable} = R_{long\ C} * \frac{Long\ Cable}{1000} \text{ (EC 5.)}$$

Donde:

$R_{long\ C}$: Resistencia longitudinal del cable (Ω)

Longitud total del cable :

$$R_{cable} = 0.002\Omega$$

7.2.5 Cálculos rectificadores

Como se ha mencionado anteriormente, los diseños de sistemas de protección catódica requieren de un rectificador de corriente. Estas unidades de control de potencia suministran una corriente de tipo continua (DC) de forma ininterrumpida al lecho de ánodos a partir de una fuente de corriente alterna que, en este caso, se suministra del sistema de energía de la locación de pozos. La vida útil de estos dispositivos es de alrededor de 20 años; lo que concuerda con la vida útil esperada de los ánodos tipo MMO.

En apartados anteriores, puntualmente en el numeral 2.3.4, se mencionó que para los cálculos de resistencias y rectificadores se tomaron tres ánodos. Como se explicó anteriormente, con este número el voltaje entregado por el rectificador se calcula la ecuación 6. En esta ecuación se asumen dos voltios de “*back voltage*” que es el valor mínimo que debe proporcionar el rectificador para vencer la resistencia del sistema.

$$V = (I_{Req} * R_{sis}) + 2 \text{ (EC 6.)}$$

Donde:

I_{Req} : Corriente requerida sistema (A)

R_{sis} : Resistencia total sistema (Ω)

$$V = 14.25 \text{ voltios}$$

Aplicando un factor de diseño de 1.3

$$V = 19 \text{ voltios}$$

Con el valor del voltaje del rectificador se corrobora que con tres ánodos se brinda una protección acorde a las características del rectificador.

7.2.6 Estaciones de monitoreo y otros consumibles

Para las estaciones de monitoreo se sugiere instalar cinco postes de control cada 500 metros de tubería. Para cada estación de monitoreo se estiman los siguientes consumibles:

- Por cada estación de monitoreo 12 metros de cable AWG calibre 10. 60 metros en total.
- 5 baquelitas
- 5 postes con capucha
- 10 soldaduras exotérmicas

Los demás consumibles del sistema se muestran en la tabla 7:

ITEM
Cable HMWPE/AWG calibre 2
Anodos MMO
Coque
Splice Kit
Perno partido
Rectificador + anclaje
Soldadura exotermica Positivo
Kit asilamiento brida ansi 900 6"
Cable HMWPE/AWG calibre 10
Baquelita
Postes de moniotreo
Soldadura exotermica para T/S

Tabla 7. Otros consumibles del sistema de PC

7.3 FACTOR DE SEGURIDAD

Al cálculo de la corriente requerida se sugiere agregar un 10 % adicional por razones de seguridad y otro 10 % adicional por posibles corrientes vagabundas a la tubería. Es decir, un 20 % total de factor adicional. Teniendo en cuenta el factor de seguridad es de 20 %, el incremento en la corriente sería de 0.077 A. Por lo que los cálculos del sistema y las consideraciones del diseño cubrirían este valor.

7.4 CRITERIOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA

Los tres criterios definidos en el Standard de NACE RP0169 para acero y fundición de hierro (incluyendo hierro dúctil) son:

- Un potencial negativo (catódico) de al menos 850 milivoltios con la corriente de protección catódica aplicada. Este potencial se mide contra un electrodo de referencia de cobre-sulfato de cobre saturado en contacto con el electrolito. Las caídas de voltaje distintas de las que ocurren a través de la interfase estructura-electrodo, deben considerarse para hacer una interpretación valida de esta medición.

$$E_{-850} = E_{on} - I R$$

- Un potencial polarizado negativo de al menos 850 milivoltios con respecto a un electrodo de referencia de cobre-sulfato de cobre saturado (potencial denominado como *Instant Off*).
- Un mínimo de 100 milivoltios de polarización catódica entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia estable en contacto con el electrolito. A fin de satisfacer este criterio, puede medirse la formación o la pérdida de la polarización.

$$\Delta E_{100} = E_{off} - E_{DESPOLARIZADO}$$

ó

$$\Delta E_{100} = E_{off} - E_{CORR}$$

- Para este sistema se sugiere el uso del primer criterio expuesto, es decir, un potencial negativo (catódico) de al menos 850 milivoltios con la corriente de protección catódica aplicada.

7.5 METODOLOGÍA DE MONITOREO

Antes de iniciar con el monitoreo, se recomienda recolectar la mayor cantidad de información posible de la tubería. Esto puede ayudar a encontrar datos referentes a posibles fenómenos corrosivos y asimismo encontrar soluciones preventivas. Esta información puede ser:

- Especificación completa de la tubería.
- Mapas detallados del paso de la tubería.
- Ubicación de posibles fuentes de corriente o estructuras metálicas cercanas.
- Condiciones de operación de la tubería (temperatura, presiones, etc.).

7.5.1 Mediciones del sistema

Las mediciones del sistema de PC sugerido para el sistema pueden ser:

- Mediciones de potenciales del sistema y el ambiente. De acuerdo con el diseño del sistema se proponen cuatro estaciones de monitoreo en las que se pueden hacer los seguimientos.
- Monitoreos de corriente. Hacer medición de las corrientes que fluyen en la tubería
- Hacer seguimiento a posibles fenómenos corrosivos presentes en el sistema.
- Uso de instrumentación para monitoreos de posibles alteraciones en las condiciones del sistema.

7.5.1.1 Mediciones de potencial

Las mediciones de potencial entre la tubería y un electrodo de referencia de Sulfato de cobre, es una de las mediciones más comunes y más recomendadas. Se deben hacer estas mediciones en las cuatro estaciones de monitoreo teniendo en cuenta el criterio seleccionado en el numeral 2.5 de 850 mV.²⁴

7.5.1.2 Mediciones de potencial sobre la tubería

Adicional a las mediciones de potencial, se deben correr mediciones sobre otras longitudes de la tubería para detectar posibles diferencias de potencial. Se pueden usar métodos como el CIPS (*Close Interval Potential Surveys*) o DCVG (*Direct Current Voltage Gradient*)

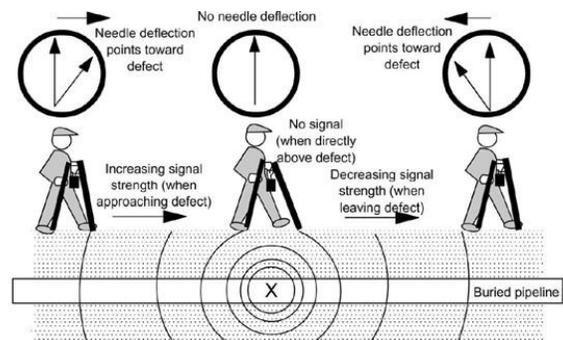
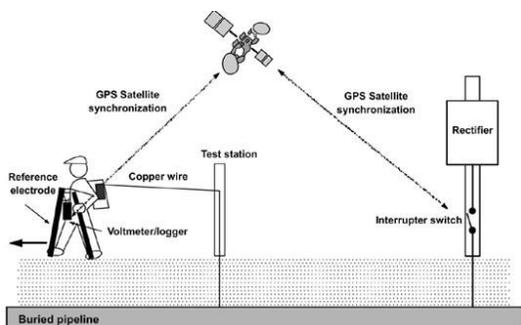


Fig 2.10: Esquemas metodologías CIPS y DCVG

7.5.1.3 Mediciones de corriente

Aprovechando las estaciones de monitoreo, se pueden realizar las mediciones de la corriente que fluye en la tubería. Esta medición de corriente es muy útil para revisar la distribución de dicha corriente.

7.5.1.4 Mediciones de resistividad del suelo

Las mediciones de resistividad de suelo son muy útiles para los sistemas de PC con el fin de encontrar zonas críticas o de alta corrosividad.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Luego de revisar las características del oleoducto a proteger, se encontró que el mejor sistema para la protección contra la corrosión externa es el de protección catódica por corriente impresa.
- Se recomienda el uso de ánodos de mezcla de óxidos metálicos (MMO por sus siglas en ingles). Puesto que estos son ánodos de óxidos de metales de tierras raras depositados en un sustrato de titanio, con una velocidad de consumo muy corta y con una vida útil de aproximadamente 20 años.
- Como relleno anódico se recomienda el uso de coque. Con este material se busca reducir la resistividad del suelo aumentando el drenado de corriente, aumentando la superficie del ánodo y reduciendo la tasa de consumo del mismo.
- Los cálculos determinaron que la corriente requerida para la protección del sistema es de 0.38 Amperios.
- Con base en los cálculos del sistema, se recomienda utilizar tres ánodos MMO. Esta cantidad de ánodos brindan un factor de protección suficiente para los diseños de rectificadores del mercado.
- Al cálculo de la corriente requerida se sugiere agregar un 10 % adicional por razones de seguridad y otro 10 % adicional por posibles corrientes vagabundas a la tubería. Es decir, un 20 % total de factor adicional. Teniendo en cuenta que el factor de seguridad de 20 %, el incremento en la corriente sería de 0.077 A. Por lo que, los cálculos del sistema y las consideraciones del diseño cubrirían este valor.
- Para este sistema se sugiere el uso del criterio de un potencial negativo (catódico) de al menos 850 milivoltios con la corriente de protección catódica aplicada.
- Para el monitoreo del sistema se deben hacer mediciones de potencial entre la tubería y un electrodo de referencia de Sulfato de cobre. Hacer estas mediciones

en las cuatro estaciones de monitoreo teniendo en cuenta el criterio en el numeral anterior.

- Adicional a las mediciones de potencial, se deben correr mediciones sobre otras longitudes de la tubería para detectar posibles diferencias. Se pueden usar métodos como el CIPS (*Close Interval Potential Surveys*) o DCVG (*Direct Current Voltage Gradient*)
- Se recomiendan las mediciones de corriente del sistema en la tubería y hacer mediciones de resistividad de suelos para encontrar zonas críticas debido a los continuos cambios que pueden presentarse en las características del suelo.

9. BIBLIOGRAFIA

INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA INGEOMINAS. Cartografía Geológica de la zona centro y sur del Departamento Del Meta. Planchas 286, 287, 288, 289, 290, 307, 308. Escala 1: 100.000. Bogotá D.C. 2010

NACE, international. CP 2-Cathodic Protection Technician. Manual de curso. 2009.

PEABODY. A. W. Peabody's Control Of Pipeline Corrosion. Segunda Edicion- Houston. Natl Assn of Corrosion. 2001.

PRESS ROOM. Cathodic Corrosion Protection Systems: A Guide for Oil and Gas Industries. {En línea} {27 de Noviembre de 2021} Disponible en: <https://www.aiu.edu/spanish/publications/student/spanish/131-179/Corrosion-Engineering-Catodic-Protection.html> (

SURTIDORES. El portal de las estaciones de servicio. Capacitación: Qué es y para que sirve la protección catódica de tanques. {En línea} 19 de agosto 2018. {27 de Noviembre 2020} Disponible en: <https://www.surtidores.com.ar/capacitacion-que-es-y-para-que-sirve-la-proteccion-catodica-de-tanques-2/>

TIANJIN WANLEI Steel Pipe Co., Ltd. Ficha Técnica. Recubrimiento de tubería.