



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ELÉCTRICA**

Diseño de un sistema de protección catódica para disminuir la  
corrosión en tubería de oleoducto en la zona norte del Perú

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Mecánico Electricista

**AUTOR:**

Santos Chero, Jose Luis (orcid.org/0009-0008-6162-2133)

**ASESOR:**

Dr. Celada Padilla, James Skinner (orcid.org/0000-0002-5901-2669)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Modelamiento y Simulación de Sistemas Electromecánicos

**LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:**

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

CHICLAYO – PERÚ

2024

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis en primer lugar a Dios por mantenerme con vida y darme salud, por iluminarme día a día en mi camino, también la dedico en especial a mi gran familia a mis queridos padres que me han dado el apoyo mutuo, a mi querida esposa Mónica por confiar en mí y darme la fuerza y fortaleza para poder continuar en el plano de mi desarrollo personal y profesional a mis hijos Alejandra, Sergio, Lía y Kiara, que son mi fuerza y motivo de seguir adelante y a mis hermanos por su apoyo incondicional, con la finalidad de conseguir mis metas trazadas profesionalmente.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios todopoderoso que ha iluminado mi mente indicándome en todo momento el camino a seguir, a mi familia por darme el aliento y la motivación para culminar con éxito esta segunda carrera profesional. A la Universidad César Vallejo sede Chiclayo por su excelente formación profesional.

## Índice de contenidos

|  |           |
|--|-----------|
| CARÁTULA .....   | i         |
| DEDICATORIA.....   | ii        |
| AGRADECIMIENTO.....  | iii       |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS .....                                       | iv        |
| ÍNDICE DE TABLAS .....   | v         |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....  | vii       |
| RESUMEN .....  | viii      |
| ABSTRACT .....   | ix        |
| <b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>                                     | <b>1</b>  |
| <b>II. MARCO TEÓRICO .....</b>                                   | <b>4</b>  |
| <b>III. METODOLOGÍA .....</b>                                    | <b>13</b> |
| <b>3.1. Tipo y diseño de investigación .....</b>                 | <b>13</b> |
| <b>3.2. Variable, Operacionalización.....</b>                    | <b>13</b> |
| <b>3.3. Población y muestra.....</b>                             | <b>13</b> |
| <b>3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....</b> | <b>14</b> |
| <b>3.5. Procedimientos .....</b>                                 | <b>14</b> |
| <b>3.6. Método de análisis de datos.....</b>                     | <b>15</b> |
| <b>3.7. Aspectos éticos .....</b>                                | <b>15</b> |
| <b>IV. RESULTADOS .....</b>                                      | <b>16</b> |
| <b>V. DISCUSIÓN.....</b>   | <b>52</b> |
| <b>VI. CONCLUSIONES.....</b>                                     | <b>56</b> |
| <b>VII. RECOMENDACIONES.....</b>                                 | <b>57</b> |
| REFERENCIAS.....   | 58        |
| ANEXOS .....   |           |

## Índice de Tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1: Grado de corrosividad según la resistividad del suelo.....   | 15 |
| Tabla 2: Grado de agresividad del suelo en función de la resistividad.....  | 16 |
| Tabla 3: Tipos de ánodos de sacrificio .....  | 20 |
| Tabla 4: Ventajas y limitaciones de la protección catódica por corriente impresa.   | 21 |
| Tabla 5: Tipos de ánodos utilizados en la corriente impresa.....  | 22 |
| Tabla 6: Dimensiones de los tramos del Oleoducto Nor Peruano .....  | 27 |
| Tabla 7: Material de la tubería del oleoducto Nor Peruano .....   | 28 |
| Tabla 8: Fallas por corrosión del Tramo II.....   | 29 |
| Tabla 9: Actualidad de progresiva del ONP .....   | 30 |
| Tabla 10: Propiedades del suelo .....   | 32 |
| Tabla 11: Composición del suelo .....   | 33 |
| Tabla 12: Tipos de suelo .....  | 35 |
| Tabla 13: Características del equipo Geonic EM31 Wk2 .....  | 38 |
| Tabla 14: Características corrosivas del suelo .....  | 42 |
| Tabla 15: Resultados del telurometro.....   | 43 |
| Tabla 16: Características de los ánodos de grafito .....  | 46 |
| Tabla 17: Características del lecho anódico a instalar .....  | 49 |
| Tabla 18: Conductancia específica para recubrimientos protectores .....   | 54 |
| Tabla 19: Conductores de cobre para uso enterrado adecuadamente aislado ....  | 55 |
| Tabla 20: Rectificador Modelo RPCC de 50Voltios y 25 Amp de salida.....   | 58 |
| Tabla 21: Listado de materiales y equipos para el diseño del sistema.....   | 59 |
| Tabla 22: Costos de los servicios de mantenimiento .....  | 60 |
| Tabla 23: Ingresos estimados del Proyecto. ....   | 62 |
| Tabla 24: Fallas o derrames.....  | 66 |
| Tabla 25: Espesor de tubería .....  | 68 |
| Tabla 26: Índices de reparación % IR de revestimiento-Tramo II est. .5 a 6 clasificación<br>del %IR y cantidades de anomalías. .... | 69 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 27: Transporte de crudo .....              | 71 |
| Tabla 28: Costo estimado de bombeo año 2015..... | 71 |

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Eventos de derrames en Oleoducto Nor Peruano.....                      | 3  |
| Figura 2: Corrosión, el mal de la Industria Petrolera .....                      | 8  |
| Figura 3: Destrucción de Tubería por corrosión .....                             | 9  |
| Figura 4: Tubería con inicio de corrosión .....                                  | 10 |
| Figura 5: Protección Galvánica .....   | 11 |
| Figura 6: Corrosión Intergranular .....  | 11 |
| Figura 7: Clasificación de la corrosión por su apariencia .....                  | 12 |
| Figura 8: Cupones de corrosión .....   | 14 |
| Figura 9: Oxidación del zinc en una pila.....                                    | 15 |
| Figura 10: Método Wenner.....  | 17 |
| Figura 11: Método convencional de recepción de Smart Pig .....                   | 18 |
| Figura 12: Sistema de protección catódica por ánodo de sacrificio.....           | 19 |
| Figura 13: Mecanismo de protección catódica con ánodo de sacrificio.....         | 19 |
| Figura 14: Protección catódica por corriente impresa .....                       | 20 |
| Figura 15: Sistema de protección catódica de corriente impresa. ....             | 20 |
| Figura 16: Protección catódica por corriente impresa de una tubería enterrada .. | 21 |
| Figura 17: Recorrido del oleoducto norperuano .....                              | 26 |
| Figura 18: Derrames de petróleo 2016.....  | 28 |
| Figura 19: Equipo Geonic EM31 Wk2 .....  | 37 |
| Figura 20: Proceso Método Wenner.....  | 39 |
| Figura 21: Telurometro digital MTO20KW .....                                     | 39 |
| Figura 22: Equipo Pig.....   | 40 |
| Figura 23: Evaluación del suelo .....  | 41 |
| Figura 24: Evaluación de la resistividad del suelo .....                         | 42 |
| Figura 25: Ánodo de grafito .....  | 47 |
| Figura 26: Circuito de protección por corriente impresa .....                    | 50 |
| Figura 27: Resistencia eléctrica .....   | 50 |

## Resumen

La corrosión en la tubería del Oleoducto Norperuano, que transporta el crudo de Petróleo desde la selva norte del Perú hacia el litoral, es significativa, debido a la antigüedad de la infraestructura de más medio siglo, que en algunas veces ocasionado fugas, con daños irreparables al medio ambiente; el mantenimiento de la tubería existe pero no alcanza a todos los 856 Km que tiene el Oleoducto, que sube la ceja de selva y atraviesa los Andes del Perú, bajando a la costa para su posterior refinación y distribución del Petróleo.

El trabajo de investigación, busca un método que busca disminuir los niveles de corrosión existente, el método es el uso de un sistema de protección catódica por corriente impresa, que ya se aplica en otras instalaciones. El estudio comprende un tramo de la tubería de 36" de diámetro ubicado entre los Km 308 y 326 del Oleoducto Nor Peruano.

En principio, se describe la problemática que está ocasionando los altos niveles de corrosión en la tubería, con consecuencias de disminución del caudal de petróleo que conduce, filtraciones en la superficie lateral externa de la tubería metálica, y por ende pérdidas económicas significativas a la empresa operadora del Oleoducto (Petróleos del Perú). Luego se plantea la metodología a seguir que consiste en realizar el análisis de la aplicación de corriente impresa en el tramo de la tubería, dimensionando correctamente los diferentes mecanismos y accesorios del sistema, de acuerdo a las teorías científicas existentes. El estudio del electrolito (suelo) va ser de mucha utilidad para determinar el tipo de protección que se va a emplear, posteriormente se tomara en cuenta las tecnologías con equipos inteligentes de alta tecnología como el Smart Pig o también llamado raspa tubos. La evaluación económica, analiza la factibilidad de la implementación del proyecto, comparado con los métodos tradicionales existentes, teniendo en cuenta las ventajas de índole técnica, ambiental y tecnológica.

**Palabras clave:** Corriente impresa, corrosión, oleoducto nor Peruano, rotección catódica.

## Abstract

Corrosion in the pipeline of the North Peruvian Pipeline, which transports crude oil from the northern jungle of Peru to the coast, is significant, due to the age of the infrastructure of more than half a century, which has sometimes caused leaks, with damage. irreparable to the environment; The maintenance of the pipeline exists but does not cover all of the 856 km of the Pipeline, which goes up the edge of the jungle and crosses the Andes of Peru, descending to the coast for subsequent refining and distribution of the Oil. The study includes a section of the 36" diameter pipeline located between Km 308 and 326 of the North Peruvian Pipeline.

In principle, the problem that is causing the high levels of corrosion in the pipe is described, with consequences of a decrease in the flow of oil it carries, leaks on the external lateral surface of the metal pipe, and therefore significant economic losses to the company. Pipeline operator (Petróleos del Perú). Then the methodology to be followed is proposed, which consists of carrying out the The study of the electrolyte (soil) will be very useful to determine the type of protection that will be used, subsequently technologies with high-tech intelligent equipment such as the Smart Pig or also called pipe scraper will be taken into account. The economic evaluation analyzes the feasibility of the implementation of the project, compared to existing traditional methods, taking into account the technical, environmental and technological advantages.

**Keywords:** Printed Current, Corrosion, North Peruvian Oil Pipeline, Cathodic Protection.

## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente la principal causa de fallas que se dan en tuberías de oleoductos se debe a la corrosión. Estas fallas traen como consecuencias grandes efectos en relación a pérdidas tanto a la propiedad como a la producción, contaminación ambiental y pérdidas de vidas humanas.

La falta de mantenimiento de los oleoductos es la causa más frecuente de incidentes de derrames terrestres, con la consecuente afectación a los recursos naturales en la zona del Golfo, lo que pone en riesgo los frágiles ecosistemas marinos y terrestres que existen en esta región” (G. Alarcón, 2018).

En la industrialización el 70% de materiales que utilizamos son metales, siendo el más usado el acero al carbono. Estos materiales ferrosos de baja aleación son atacados por la corrosión de manera continua y dependiendo del ambiente puede ser acelerado” (Casallas, 2018).

Este fenómeno que es conocido como corrosión crea pérdidas por miles de miles de dólares alrededor de todo el mundo. Son muy pocos los países y empresas estatales y privadas que dedican tiempo y emplean recursos para disminuir este fenómeno de la corrosión, sin embargo, los desembolsos de dinero que realizan para preservar sus equipos e instalaciones son muy considerables.

Por lo general los ingenieros metalúrgicos que están encargados de la fabricación de estos materiales constructivos, así como también los ingenieros de diversas especialidades van hacer responsables de la conservación de la integridad de equipos y mantenimientos que se darán en las industrias haciendo grandes esfuerzos tecnológicos para combatir este fenómeno llamado corrosión por lo tanto también minimizar el impacto económico que causa este fenómeno en el mundo entero. (Casallas, 2018)

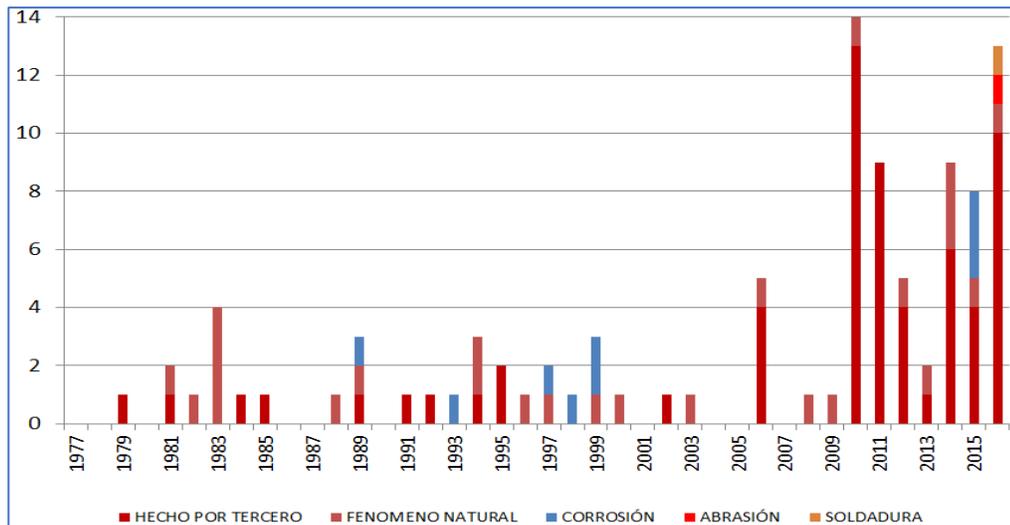
“Para el resultado de un diseño de sistema con protección catódica la corrosión de la tubería es únicamente corrosión pareja y uniforme, sin embargo, el suelo hace que se presenten diferentes tipos de corrosión deteriorando la vida útil de la tubería” (Cárdenas, 2018).

Por lo tanto, debemos tener en cuenta en el presente estudio las características de los suelos, el tipo de corrosión y lo referente al sistema de protección por corriente impresa que se utilizara.

En los últimos años en el Perú el deterioro de metales ha traído como consecuencia muchos problemas, las empresas industriales desembolsan miles de dólares para el mantenimiento con revestimientos epóxicos para las estructuras de acero con el fin de evitar la corrosión, no solo encontramos este defecto en las estructuras metálicas, sino que también se presenta en, embarcaciones, aviones, etc. Saber y aplicar los conceptos de corrosión en la selección de materiales, su cuidado o prevención es importante para el avance de un país. (Casallas, 2018)

El Perú es uno de los países sudamericanos que se dedica a la explotación del petróleo lo que se hace imprescindible su transporte para este líquido ducto. Sin embargo, este proceso de refinación obliga a que se transporte el petróleo desde su origen hasta su respectiva refinería por medio de oleoductos de acero, éstos a través del tiempo son invadidos por microorganismos que se encuentran en el medio ambiente ya sea por oxígeno, vapor de agua o salinidad generando así su deterioro por medio de la corrosión.

La empresa protege a la tubería de la corrosión con pintura epóxica, cinta de polietileno negra. En el Km 308 la tubería está protegida por los elementos mencionados, sin embargo, estos elementos de protección han ido deteriorándose en el transcurso del tiempo teniendo hoy en día un problema de corrosión en dicho kilómetro de la tubería. (Manual de Mantenimiento y reparación de los oleoductos de operaciones Talara – Petroperú, 2012).



**Figura 1:** Eventos de derrames en Oleoducto Nor Peruano  
Fuente: Petroperú, 2016

En los años 1989, 1993, 1999 existieron episodios de fugas de combustible por corrosión en el oleoducto Nor Peruano, que es administrado por la Empresa Estatal Petroperú, y en el año 2015 se reportaron 4 fugas de combustibles por corrosión en el ducto, con consecuencias de contaminación del suelo y del agua, y a la salud humana. (PETROPERU, 2016).

La corrosión que se observa en el ducto, es un fenómeno químico de interacción con el medio ambiente que lo rodea, en el cual el tratamiento y/o mantenimiento, que en muchos casos no se realiza, no logra el fin de disminuir la velocidad de corrosión del ducto, teniendo como consecuencia que en algún momento la fuga se presenta, ocasionando pérdidas económicas, debido a que en algunas veces se tiene que suspender las operaciones de bombeo del petróleo; así como también la contaminación al suelo y a las aguas de las quebradas de la zona aledaña a la fuga (PETROPERU, 2015).

El Oleoducto Nor Peruano cuenta con dos técnicas para mitigar la corrosión externa: como primera barrera revestimiento con sistema FBE (fusión bond epoxic) en el tramo I y el Km. 636 – 642 del Tramo II, y revestimiento de cinta polietilénica o recubrimiento de alquitrán con fieltro en el resto del Tramo II, seguida del sistema de protección

catódica por ánodos de sacrificio, diseñado con la intención de brindar protección emitido por la compañía HARCO CORPORATION. La cual a la fecha la protección catódica galvánica en el Km. 648 no ha dado muchos resultados eficientes en la protección de la de la tubería debido a la corrosión externa.

Estas protecciones antiguas han sido también manipuladas por la mano del hombre de las comunidades cercanas (nativos) con el fin de deteriorar la tubería y obtener un beneficio personal perjudicando económicamente de esta manera a la empresa.

Se planteó la formulación del problema de la forma siguiente: ¿En qué medida el diseño de protección catódica determina la disminución de la corrosión del Km 308 del Oleoducto Nor Peruano?

Se justificó técnicamente el diseño porque algunos de los tramos del oleoducto no son de fácil acceso y el mantenimiento preventivo en cuanto a la protección de la superficie de la tubería no se realiza de manera adecuada, por lo tanto un mantenimiento con sistema de protección catódica con corriente impresa, logra superar esta limitación técnica. Esta técnica se está aplicando a otros tramos del oleoducto con resultados positivos.

Socialmente se justificó la investigación, porque la población que vive en los alrededores del oleoducto, constantemente reportan situaciones de fugas de combustible debido a que la estructura de la tubería tiene altos índices de corrosión, siendo ello un problema social, debido a que afecta a tener un estilo de vida adecuada; por tal razón con un sistema de mantenimiento con protección catódica con corriente impresa, los riesgos de fugas por corrosión disminuirán y el disminuye impacto social hacia la población, de tener cercano a la tubería del oleoducto.

Se justifico la investigación desde el punto de vista económico, porque la Empresa Petroperú, en su presupuesto anual, tiene un monto asignado para el mantenimiento de protección de la superficie afectada por la corrosión, también tiene en su plan de mantenimiento protección catódica con ánodos de sacrificio, con pinturas anticorrosivas y con cintas impermeables de polietileno; por lo cual se justifica

económicamente porque el sistema propuesto de protección catódica con corriente impresa garantiza menor corrosión, y por lo tanto los costos de mantenimiento anual serán menores.

Ambientalmente se justificó esta propuesta de sistema de protección catódica con corriente impresa mejorará y reducirá los mantenimientos correctivos y preventivos, evitando el impacto ambiental cumpliendo con lo establecido en el ISO 14001 – Gestión ambiental. Los daños por ruptura o fuga del ducto disminuirán y como consecuencia se evitan los daños a terceros y al medio ambiente.

El objetivo general del trabajo de investigación fue Proponer un sistema de protección catódica con corriente impresa para disminuir la corrosión en la tubería del Oleoducto en la Zona Norte del Perú, para lo cual se establecieron 4 objetivos específicos los cuales fueron: Analizar el estado actual de corrosión en el sistema de oleoducto en el Km 308 de Petroperú; Identificar las tecnologías de los modernos sistemas que utilizan en los oleoductos; Proponer y calcular un sistema de protección catódica con corriente impresa y el de Realizar una evaluación económica del sistema de protección catódica con corriente impresa.

Se formuló la hipótesis: El diseño del sistema de protección catódica con corriente impresa determina una disminución de la corrosión la tubería del oleoducto de Petroperú.

## II.- MARCO TEÓRICO

Los trabajos de investigación en el aprovechamiento de insumos que se pueden reutilizar, están encaminadas a lograr tener características similares a las iniciales; en el caso de los lubricantes, existe investigaciones en el cual si han logrado llevar a los aceites a tener características similares a las iniciales, pero también existe investigaciones en los cuales los aceites se utilizan para otros fines.

**Clavijo**, en su tesis de grado para optar el título profesional de Ingeniero Metalúrgico, denominado “Sistema de protección catódica para tuberías enterradas de transmisión de gas natural”, presentada a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, describe: la corrosión es un fenómeno químico y es inevitable, la cual este fenómeno lo podemos solo controlar o mitigar a través de estudios prácticos y normas internacionales poniendo así en práctica el proceso que uno debe realizar la cual una de ellas es la protección catódica, la cual fue descrito por primera vez por el químico Sir Humphrey Davy aplicándose por primera vez en un material de cobre, aquí nos indica que este sistema si reduce la corrosión aplicando el sistema asignado para este proyecto. Esta investigación aporta al presente proyecto en conocimientos de las diferentes formas de corrosión. Así mismo, describe que los sistemas de protección catódica, no son de uso sólo de instalaciones industriales como en tanques subterráneos o tuberías de conducción, sino también pueden ser utilizados en proyectos de construcción con estructuras de acero, antes de ser instaladas dentro del concreto, a los cuales se les suelda una varilla o ánodo de magnesio o también de zinc, con el fin de mantenerlo protegido por la acción de la corrosión; también se utiliza ésta protección para estructuras sumergidas en los mares y ríos.

**Cárdenas** en su tesis “Evaluación del sistema de protección de corrosión del tramo del oleoducto transecuatoriano comprendido desde la estación de bombeo Baeza 4, hasta la estación de bombeo Papallacta”, en la Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador, con el fin de adquirir el grado de Ingeniero de petróleo, concluyo que la

protección catódica es la mejor forma efectiva para prevenir el control de la corrosión en oleoductos y demás sistemas, determinado así conocer el resultado de la evaluación de un sistema de protección de un oleoducto. Asimismo indica que el avance de la corrosión dependerá de los diferentes tipos de suelos, tipos de tuberías y el medio que los rodea. Esta investigación refuerza nuestra tesis respecto a la utilización de un sistema de protección catódica para disminuir la corrosión en el oleoducto teniendo en cuenta los tipos de suelos y tuberías del Km 308 del oleoducto norperuano. Este sistema nos garantiza una mayor durabilidad de protección de la tubería. Entre las conclusiones que presenta el trabajo de investigación se tiene: Los costos por corrosión a pesar de existir políticas de mantenimiento en las empresas no puede eliminarse en su totalidad; siendo la eficiencia de los planes y de los métodos empleados, los que inciden en la dependencia de las utilidades con los costos de mantenimiento, específicamente para disminuir los efectos destructivos de la corrosión en la infraestructura industrial.

**Pacheco**, En su tesis “Diseño del sistema de protección catódica por corriente impresa para el ducto de GLP desde la estación de bombeo FLOPEC hasta la estación de almacenamiento Monteverde”, de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para obtener el título de Ingeniero en Petróleo, concluye que el sistema fue diseñado para una duración de 20 años, se estimaron costos de instalación de sistema, mano de obra de instalación, materiales y equipos. Esta tesis nos va a dar una referencia para la medición de la factibilidad de la propuesta de un sistema de protección catódica, el cual reducirá considerablemente los costos para la empresa Petroperú por la corrosión de sus tuberías y la ventaja de este sistema es la duración de la protección.

**Yasksetig** en su tesis. “Análisis de la integridad mecánica de un tramo de oleoducto afectado por un fenómeno geodinámica” en la Universidad de Piura, con el fin de obtener el título de magister en ingeniería mecánica eléctrica, nos dice que el daño de un material por corrosión es iniciado a una reacción electroquímico con su medio. De acuerdo al Curso de Control de Corrosión en Operaciones de Producción de

Petróleo, concluye que la corrosión es uno de los serios problemas que causa pérdidas para la empresa y causa daño al medio ambiente, también concluye que la corrosión que interactúa con un metal es a un electrolito que afecta un metal por medio del ambiente que los rodea.

La corrosión es el deterioro de un material que surge en efecto a una reacción química o electroquímica entre un metal y su medio ambiente, puede ser general o localizada” La corrosión es un proceso de destrucción o deterioro electro químico de un metal por reacción con el medio ambiente, en ese sentido la corrosión se puede explicar cómo el desgaste paulatino y permanente de los elementos metálicos por la acción del medio que los rodea.



**Figura 2:** Corrosión, el mal de la Industria Petrolera  
Fuente: Alarcón, 2015

Otro concepto asociado a corrosión, es que es una transformación capaz de destruir una estructura metálica por la acción de diversas celdas galvánicas que se presentan en su entorno. Su estudio es importante ya que a través de dicho acto se puede predecir el comportamiento de los metales a largo plazo que conforman las estructuras de los equipos y maquinarias, y que de alguna manera determinan el tiempo de vida de la infraestructura, que tiene implicancias en la rentabilidad del proyecto, así como su impacto en la economía de un país. (Fernández, 2015)



**Figura 3:** Destrucción de Tubería por corrosión

Fuente: NACE (Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión), 2013

**Corrosión atmosférica:** 3 formas materiales sólidas, líquidas y gases, ejemplo la sal, el agua y gases como el nitrógeno y óxidos de azufre.

**Corrosión subterránea** depende de las características del suelo, un factor importante en la corrosividad del suelo es que el medio puede variar mucho sobre grandes y cortas distancias. Los ambientes subterráneos pueden variar con el tiempo (**Abarca, 2015**).

**Corrosión en líquidos** son el agua natural, agua tratada o fluidos agresivos de procesos químicos.

**Corrosión en alta temperatura** se considera a las condiciones por arriba de 6500 C (12000F). A estas temperaturas, agua líquida no es requerida para que reacción es del tipo oxidación/reducción ocurran (**Abarca, 2015**).

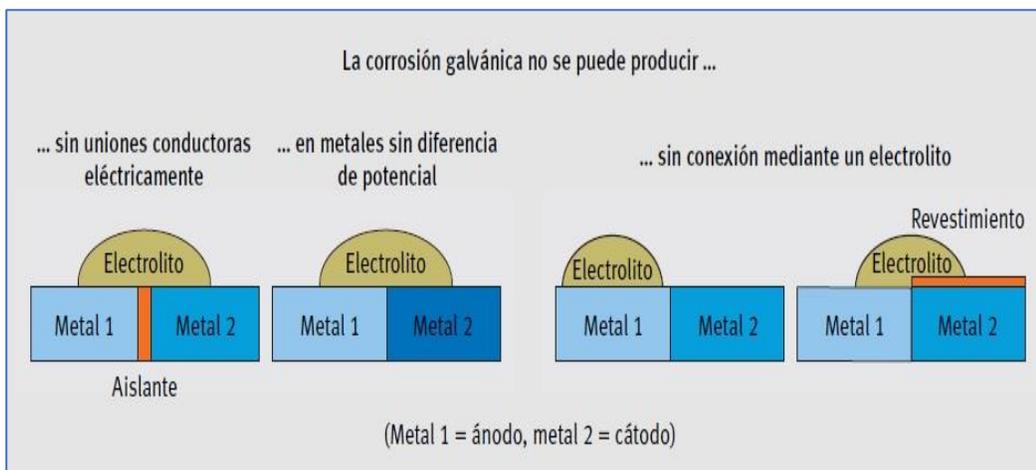


**Figura 4:** Tubería con inicio de corrosión

Fuente: NACE (Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión), 2013

**Corrosión uniforme:** es donde actúa una corrosión química o electroquímica uniformemente en toda su superficie del metal. Este tipo de corrosión es muy común en los equipos o superficies expuestas a altas temperaturas y realmente se trata de un mecanismo de oxidación por altas temperaturas. También se presenta en materiales metálicos expuestos a soluciones ácidas. (Casallas, 2016)

**Corrosión galvánica.** Este tipo viene hacer la más común en este fenómeno, la cual inician su procedimiento de corrosión cuando dos metales actúan uno como ánodo y el otro como cátodo y el que tenga menos polaridad negativa procederá a corroerse, este ejemplo lo podemos ver en una pila en el que el metal que se oxida es el ánodo otorgándole sus electrones al cátodo quien vendría ser el que acepta los electrones para mantenerse recuperado. (Mariño, 2016)



**Figura 5:** Protección Galvánica  
Fuente: G. Alarcón,2015

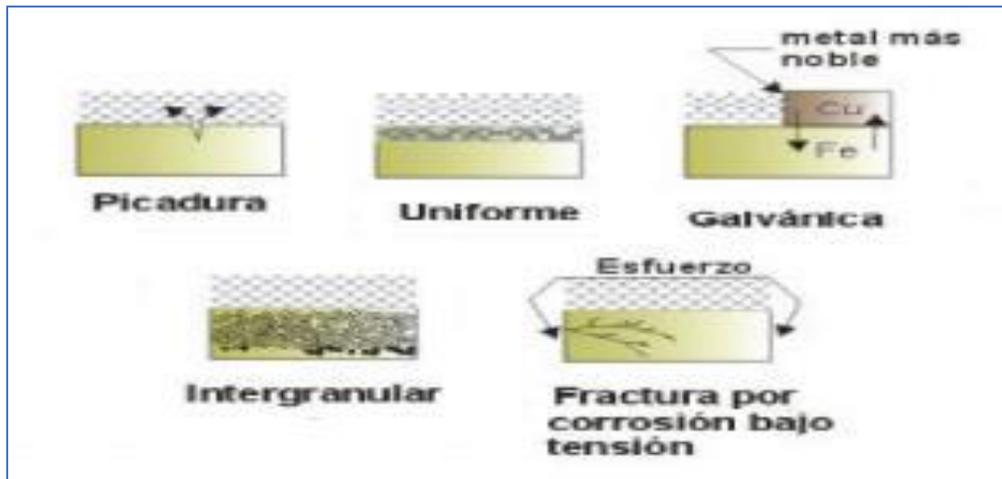
**Corrosión por picaduras:** en este tipo veremos cómo se forman agujeros y hoyos o agujeros por medio de su procedimiento químico. Esta forma se logra realizar de acuerdo a su velocidad de avance, esta hendidura o grieta se puede formar por sí misma. (Pierre, 2018)

**Corrosión intergranular:** Es la que designa resistencia teniendo así pérdidas en el grano llevándolos a una desintegración en los bordes de los granos.



**Figura 6:** Corrosión Intergranular  
Fuente: Medina, 2014

**Corrosión por esfuerzo:** son aquellas tensiones que se presentan internamente luego de haber sufrido deformación en frío interna. (Fernández, 2015).



**Figura 7:** Clasificación de la corrosión por su apariencia  
 Fuente: Fernández, 2015

**Ánodo:** el ánodo viene hacer un electrodo en la cual existe una pérdida de metal por su reacción de electroquímico con su medio la cual es la perdida de electrones la cual van hacer recibidos por el cátodo este comportamiento sucede cuando los átomos metálicos van perdiendo electrones y se convierten en iones es porque los átomos metálicos pierden electrones y pasan a la solución como iones.

Los átomos tienen igual cantidad de protones y electrones y cuando hay una pérdida de este va a ocurrir un exceso de electrones positivo lo que va dar como resultado a un ión positivo. (Alter y Mestres, 2018).

El efecto de corrosión en un ánodo se puede ver en la siguiente ecuación:

$$W = I t M / n F$$

Donde:

w = Peso metal (g)

I = Flujo de la corriente, en Amperios

t = Tiempo, en segundos.

M = Masa atómica (g/mol)

n = cantidad de electrones/átomo

F = constante de Faraday (96500C/mol)

**Cátodo:** viene hacer cantidad en su superficie metálica que no se disipa dando lugar a otra reacción química la cual va hacer que en este se genere una reacción química dando paso a una corrosión.

Los electrones que salen en el ánodo se trasladan hasta en donde va a ser consumida por otro agente oxidante a este proceso se le llama reducción en la consta en ese consumo de sus electrones.

**Conductor metálico:** Es el medio en el que van a pasar sus electrones provenientes de la fuente hacia el ánodo y cátodo, entre ellas tenemos, cable, superficies.

**Electrolito:** Es el elemento más importante ya que con ella cierra el circuito teniendo como finalidad asumir los electrones del ánodo para trasportárselo al cátodo y así simultáneamente.

La norma NACE RP 169 emite los criterios para la interpretación de potenciales para los sistemas de protección catódica. **(Fernández, 2015)**

**Velocidad de la corrosión**La corrosión es una anomalía que participa en una reacción anódica y una catódica en el debido momento que se genera las corrosiones, su velocidad de oxidación anódica va ser igual a la velocidad de la reducción catódica. Entonces el cruce de las curvas de la polarización anódica y catódica tendrá como resultado un potencial de corrosión y la densidad de la corriente, la cual será distributiva a la velocidad de corrosión. (Fabre, Juárez, Palma, Gálvez y Zapata, 2018).

**Métodos para la obtención de la velocidad de corrosión.** Los cupones es el método utilizado para evaluar la pérdida de peso. Así entonces tenemos que este es un

método el cual consiste en evaluar la pérdida de peso del metal que ha llevado un determinado metal o aleación que está en contacto con un ambiente corrosivo.



**Figura 8:** Cupones de corrosión  
Fuente Fernández, 2015

**Método gravimétrico.** Este método gravimétrico es muy largo ya que sus pruebas para determinar la velocidad de corrosión por este método hay que someterlos los materiales a un ataque corrosivo durante un periodo largo de tiempo. Una vez finalizado la prueba se determina su variación de peso que el material reaccionado con el fin de obtener la velocidad de corrosión en m.d.d. esto quiere decir miligramos de material perdido por días y dm<sup>2</sup> del área del material dado, lo cual se determina con la expresión que relaciona las masas iniciales y finales, la densidad del material, el área de la pieza, y el tiempo de exposición:

$$V = \frac{m_i - m_f}{\rho A t}$$

Dónde:

V= velocidad de Corrosión, en m/s.

M<sub>i</sub> = Masa inicial, en Kg

M<sub>f</sub> = Masa final, en Kg

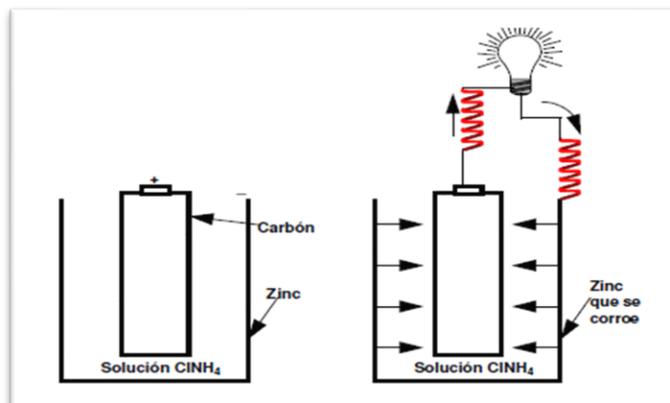
ρ = Densidad del material, en Kg/m<sup>3</sup>

A = área de muestra, en m<sup>2</sup>

t = tiempo de exposición, en seg.

**Técnica de polarización lineal** Esta técnica electroquímica da las velocidades de corrosión en un tiempo aproximado de minuto, sin ampliamente para monitorear la corrosión en plantas de procesos. Se dispone de instrumentos comerciales, algunos de los cuales dan una lectura directa de la velocidad de corrosión en mil/año o unidades similares. (Fabre et al., 2018, p.11).

**Electrólisis.** Es un proceso que tiene por función separar los compuestos por medio de la electricidad, con lo cual ocurre la captura de electrones por medio de los cationes a lo que denomina reducción y la liberación de los electrones por los aniones en el ánodo, denominado oxidación” (Manual del Ingeniero Químico, 2015).



**Figura 9:**

Oxidación del zinc en una pila  
Fuente: Fernández, 2015

La resistividad es un parámetro muy importante en la determinación de la agresividad del suelo, la corrosión y sus posibles soluciones.

**Tabla 1:** Grado de corrosividad según la resistividad del suelo

| Resistividad del suelo ( $\Omega$ .cm) | Grado de corrosividad   |
|--|-------------------------|
| Menor a 900                            | Muy corrosivo           |
| 900 – 2300                             | Bastante corrosivo      |
| 2,300 – 5,000                          | Moderadamente corrosivo |
| 5,000 – 10,000                         | Ligeramente corrosivo   |
| Sobre los 10,000                       | Muy poco corrosivo      |

Fuente: FERNÁNDEZ, 2015

**Corrosión en suelos** La corrosión que los suelos tienen en las estructuras metálicas, son procesos de degradación del material de las estructuras. El grado de intensidad tiene sus causales en el contenido de humedad que tiene el suelo, la composición química, la resistividad, el potencial de hidrógeno, entre otros.

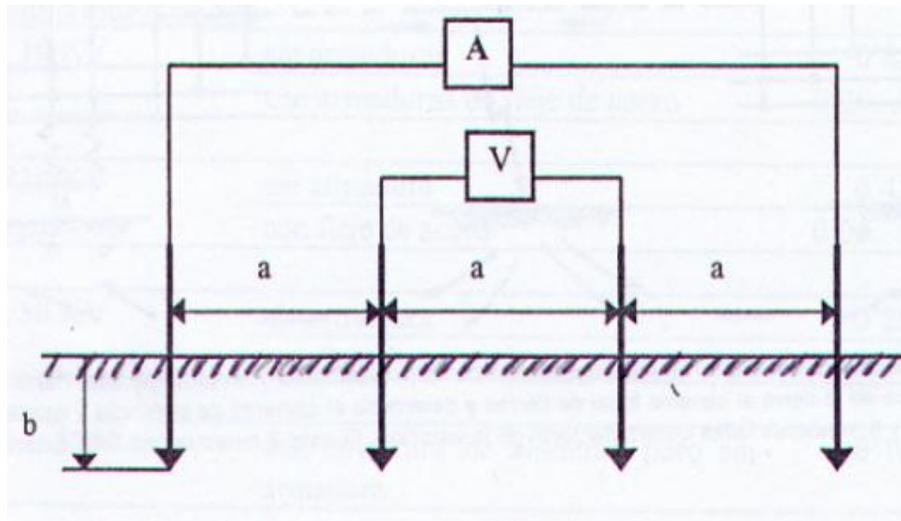
La resistividad es una medida que determina la resistencia por unidad de longitud al paso de los electrones en el suelo, y esto clasifica el grado de agresividad, desde un nivel nulo hasta un nivel severo, pasando por el escaso y discreto, tal como se expresa en la tabla 2.

**Tabla 2:** Grado de agresividad del suelo en función de la resistividad

| Resistividad (ohm-m) | Grado de Agresividad |
|----------------------|----------------------|
| <10                  | Severo               |
| 10-100               | Discreto             |
| 100-1000             | Escaso               |
| >1000                | Nulo                 |

Fuente: Biblioteca Digital corrosión en subsuelos, 2006

**El Método de Wenner** Fue realizada en 1915 por el Dr. Frank Wenner. Su técnica se realiza a base de 4 electrodos sumergidos linealmente en forma recta en el suelo teniendo una misma distancia ( $a$ ) y profundidad ( $b$  equidistantes), (García, 1990, p.41).



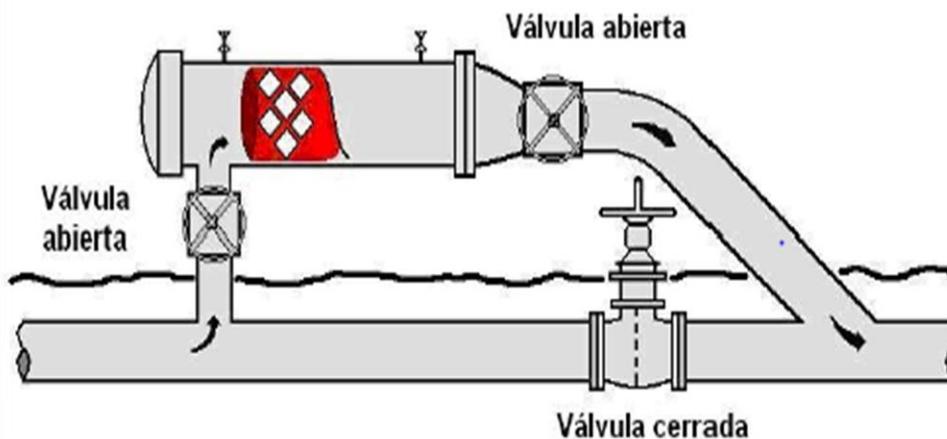
**Figura 10:** Método Wenner  
Fuente: García, 1990

Medición de la resistividad del suelo método Wenner El suelo es considerado un material conductor eléctrico, la cual va hacer que se oponga a la corriente eléctrica ofreciendo una resistencia. La resistividad del suelo cumple un rol importante por lo que es indispensable conocerla para así poder realizar cálculos y futuros diseños que se va a disponer. La resistividad del suelo se encarga de transmitir, siendo llamada como resistencia específica

Tuberías. La red de tuberías que transportan líquidos a grandes cientos o miles de kilómetros, se denominan oleoductos, y el diseño de éstos debe tener en cuenta todos los factores, que garanticen una correcta operatividad, con mínimos riesgos de fugas y derrames, y de esa manera incrementar los efectos de contaminación al ambiente; por lo tanto los procesos de fabricación e instalación de las tuberías debe estar enmarcado en las normas técnicas internacionales.

Las tuberías estarán ubicadas sobre el suelo, enterradas, aéreas, sumergidas, por lo tanto a esas cuatro exposiciones y condiciones, debe cumplir satisfactoriamente la función de trasladar los hidrocarburos con los caudales de producción en los pozos petroleros hasta los lugares de refinación y/o almacenamiento.

**Equipos para inspeccionar tuberías internas Smart Pig geométrico para oleoductos:** Un Smart Pig funciona como un pistón móvil libre dentro de la tubería, sellando contra la pared. Los Smart Pig, también llamados diablos o raspa tubos pueden realizar varias tareas tales como un análisis de datos para medir la pérdida del metal por medio de una corrosión, realizar la limpieza de escombros de la línea, el retiro del producto residuales internos.

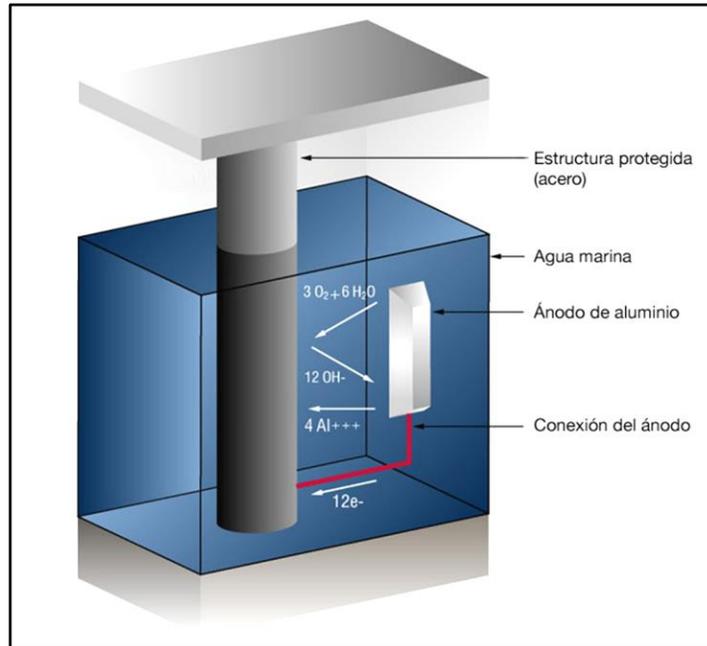


**Figura 11:** Método convencional de recepción de Smart Pig  
Fuente: Recuperado de Westernfilterco, 2005

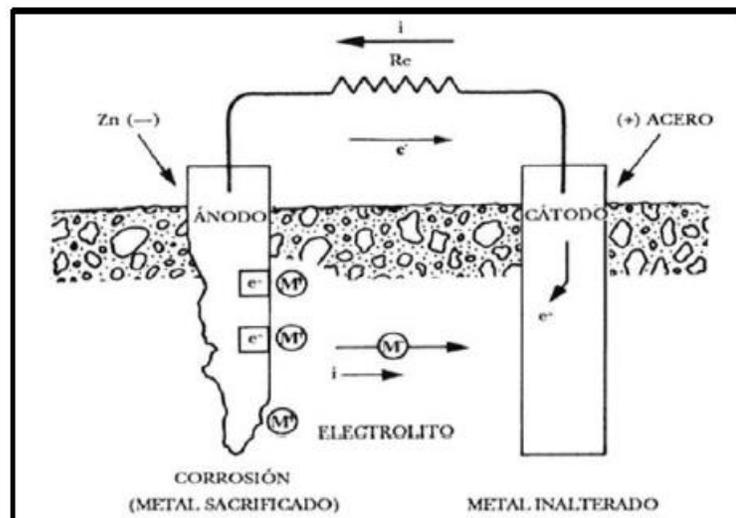
### **Protección catódica con ánodos de sacrificio**

Cuando el ánodo auxiliar se compone de un metal más activo que el metal que se protegerá se establecerá una pila galvánica fluyendo una corriente en la misma dirección que se ha descrito antes, la fuente de la corriente impresa se eliminaría quedando así como un ánodo de sacrificio, como su mismo nombre lo dice es aquel

que va a sacrificar para proteger al cátodo. Por tal motivo tenemos a los metales más utilizados como el Zinc, Magnesio, y el Aluminio, siendo este último el que se va activar con ciertos elementos aleantes.



**Figura 12:** Sistema de protección catódica por ánodo de sacrificio.  
Fuente: Deepwater, 2014



**Figura 13:** Mecanismo de protección catódica con ánodo de sacrificio  
Fuente: Chavarría, 2010.

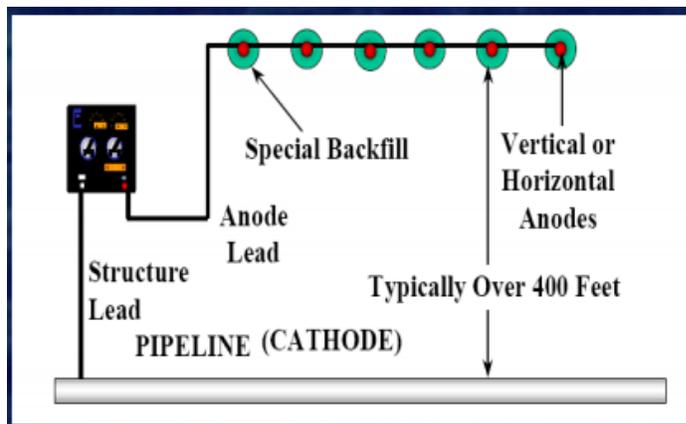
**Tabla 3:** Tipos de ánodos de sacrificio

**Ánodos Zn, Al y Mg**

| Metal anódico | Capacidad de corriente teórica, Cl (A-año/kg)          | Rendimiento $\eta$ (%) | Factor de utilización, fu (%) |
|---------------|--|------------------------|-------------------------------|
| Zn            | 0,094  | 90                     | 85                            |
|               | Capacidad práctica (Cl . $\eta$ . fu) 0,072 (A-Año/kg) |                        |                               |
| Al            | 0,340  | 90                     | 85                            |
|               | Capacidad práctica (Cl . $\eta$ . fu) 0,260 (A-año/kg) |                        |                               |
| Mg            | 0,251  | 60                     | 85                            |
|               | Capacidad práctica (Cl . $\eta$ . fu) 0,128 (A-año/kg) |                        |                               |

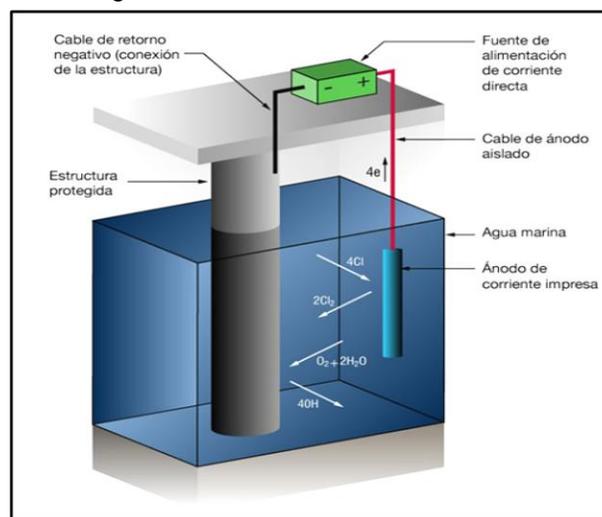
Fuente: Callisaya, 2014

**Protección catódica por corriente impresa**



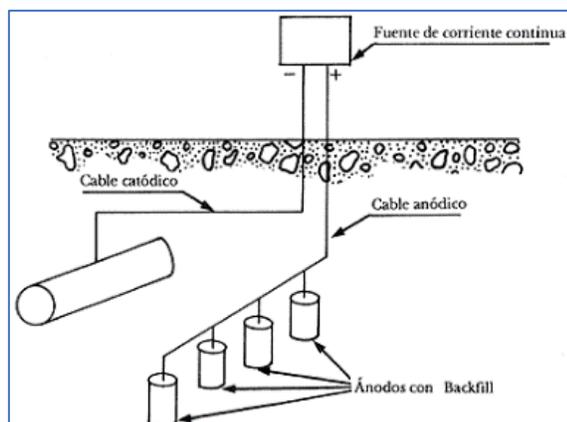
**Figura 14:** Protección catódica por corriente impresa

Fuente: Tecnologiatal.net



**Figura 15:** Sistema de protección catódica de corriente impresa.

Fuente: Deepwater, 2014



**Figura 16:** Protección catódica por corriente impresa de una tubería enterrada  
Fuente: Biblioteca Digital Protec. Catód, Corriente Impresa, 2005

## Ventajas y limitaciones del método de protección catódica con corriente impresa

**Tabla 4:** Ventajas y limitaciones de la protección catódica por corriente impresa.

| Ventajas  | Desventajas  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Amplio rango de voltaje y corriente.</li> <li>-Un lecho anódico puede suministrar una gran corriente.</li> <li>-Con una sola instalación se puede proteger superficies muy grandes.</li> <li>-Potencial y corriente variables.</li> <li>-Amplio rango de resistividad del medio.</li> <li>-Mayor alcance y distribución de corriente.</li> <li>-Para corregir problemas de corrientes vagabundas o interferencia catódica.</li> <li>-<math>I(A)=PC=f(\text{cantidad, distribución, alcance})</math>.</li> <li>-Con el uso de sistemas automáticos, se garantiza una correcta protección nunca sobreprotección, pudiéndose además enviar controles del funcionamiento del sistema mediante comunicaciones específicas (digitales, analógicas).</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Requieren fuentes externas de energía (rectificador).</li> <li>- Significativos costos de instalación.</li> <li>- Significativos costos de mantenimiento.</li> <li>- Son útiles para requerimientos de corrientes superiores a los 5 Amperios.</li> <li>- Requieren inspección periódica y mantenimiento.</li> <li>- Requieren innumerables accesorios tales como cajas de distribución y sus elementos, circuitos, cables, conectores, interconexiones para evitar interferencias, aislamientos (bridas, juntas, monolíticas), aterramientos, resistencias, entre otros.</li> <li>- El riesgo de que si la conexión (polo negativo) al elemento a proteger se invierte, se provoque una corrosión acelerada.</li> <li>- Tiene un costo elevado.</li> </ul> |

Fuente: Medina Ramos, 2014

## Ánodos

**Tabla 5:** Tipos de ánodos utilizados en la corriente impresa

*Características de los materiales utilizados como ánodos en la protección catódica por corriente impresa*

| <b>Material</b>       | <b>Densidades de corriente A/m<sup>2</sup></b> | <b>Consumo Kg/A·año</b> | <b>Aplicaciones</b>            |
|-----------------------|--|-------------------------|--------------------------------|
| <b>Grafito</b>        | 2.5-10   | 0.1-2                   | Suelos y aguas dulces          |
| <b>Chatarra</b>       | 5-50   | 9.1                     | Suelos y aguas dulces y de mar |
| <b>Ferrosilicio</b>   | 5-50   | 0.23                    | Suelos, aguas dulces y de mar  |
| <b>Pb-2% Ag</b>       | 300  | 0.09                    | Agua de mar                    |
| <b>Ti Platinizado</b> | 500-700  | despreciable            | Agua de mar                    |

Fuente: Morcillo, 2018

### **III.- METODOLOGÍA**

#### **3.1. Tipo y diseño de investigación**

##### **Tipo de investigación**

El tipo de investigación es aplicada

##### **Diseño de investigación**

El diseño de investigación es Diseño no experimental: transversal descriptivo

#### **3.2. Variables y operacionalización**

Variable independiente: Sistema de protección catódica con corriente impresa. Variable dependiente: Corrosión en Tubería de Oleoducto

#### **3.3. Población, muestra, muestreo, unidad de análisis**

##### **Población:**

18 Km de Tubería de Oleoducto Nor Peruano, desde Km 308 hasta 326, de 36 pulgadas de diámetro externo con un espesor de 0,3122 mm (1/4 de pulgada).

Muestra : La muestra coincide con la población.

Muestreo : Probabilístico.

#### **3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

##### **Técnicas de recolección de datos**

Observación

##### **Revisión bibliográfica**

Se tuvo en cuenta para esta investigación los libros, tesis, revistas, artículos y documentos internos de Petroperú.

### **Análisis documental**

Para el desarrollo de este tipo de técnica, se buscará información en libros actualizados con alto contenido respecto al tema investigado, además de artículos de revistas, manuales, fichas técnicas, es decir, de fuentes secundarias de información.

### **Instrumentos de recolección de datos**

Ficha de registro, Para recopilar información se van a utilizar las guías de observación respecto al sistema de protección catódica en las tuberías del oleoducto norperuano.

## **3.5 Procedimientos.**

El procedimiento para la obtención de los datos en la empresa se hizo en función a los registros diarios de información del área de operaciones de la empresa PETROPERÚ.

Para ello se utilizó el instrumento de la guía de análisis documental, ya que nos brindó centrarnos en una investigación a base de páginas web científicas acreditadas como scopus, scielo, Redalyc, entre otras de gran prestigio a nivel internacional.

### **3.6. Método de análisis de datos**

El método que se utilizó para el procesamiento de los datos es con el software Microsoft Excel, en el cual, con los comandos estadísticos, se procesó los datos, y se obtuvo resultados comparativos.

### **3.7. Aspectos éticos.**

Los informes o investigaciones empleadas para el desarrollo del presente proyecto, no se alteraron, es decir, se tuvo en cuenta las normas para referenciar a los autores y material bibliográfico consultado. Además, considerando la guía del asesor para que el proyecto sea lo más exacto posible a la realidad y evitando cualquier tipo de plagio o copia, buscando la originalidad de este.

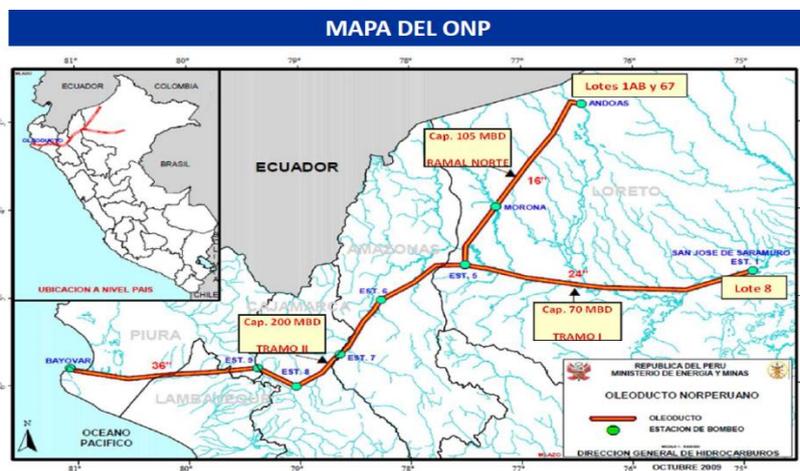
## IV. RESULTADOS

### 4.1. Analizar el estado actual de corrosión en el sistema de oleoducto en el Km 308

El oleoducto Nor Peruano, con fecha de inicio de operaciones en el año 1977, actualmente presenta deficiencias en el transporte del petróleo, y esto es por diversas razones, siendo una de ellas las fugas por corrosión en la tubería, los cuales en los últimos meses del año 2016 y en el 2017, han sido motivos de preocupación de las autoridades gubernamentales, debido a las consecuencias de contaminación que causan al suelo, al agua y a la flora y fauna del lugar, con gran impacto ambiental, que es difícil de revertir.

#### 4.1.1. Características Técnicas del Oleoducto Nor Peruano.

El oleoducto empezó a operar el 24 de mayo de 1977, de acuerdo al Código de la ANSI (American National Standards Institute) B31.4 para Tubería de Presión, Sistema de Tubería para el Transporte de Petróleo Líquido (Liquid Petroleum Transportation Piping, Systemen) edición de 1971.



**Figura 17:** Recorrido del oleoducto norperuano  
Fuente: Osinergmin, 2016

**Tabla 6:** Dimensiones de los tramos del Oleoducto Nor Peruano

| Tramo | Grado      | Longitud(km) | Diámetro (pulgada) | Diámetro (m) | Capacidad bombeo | Caudal actual bombeo por día (barriles por día) |
|-------|------------|--------------|--------------------|--------------|------------------|---|
| I     | API 5L X52 | 306          | 24                 | 0.6096       | 70,000           | 9,000   |
| II    | API 5L X52 | 550          | 36                 | 0.9144       | 200,000          | 18,000  |
| ORN   | API 5L X52 | 252          | 16                 | 0.4064       | 105,000          | 9,000   |

Fuente: Osinergmin, 2016

Está formado por los tramos I, ramal norte y tramo II. El tramo I tiene una longitud de 308 km, constituido por tuberías de 24" de diámetro que unen las estaciones del 1 y 5. Tramo ramal norte, constituida por una longitud de 252 km con tuberías de 16 pulgadas de diámetro. Se inicia en la estación de Andoas (Lote 192), conectándose con la estación 5 (oleoducto principal).

El tramo II o ramal principal, tiene una longitud de 548 km que empieza en la Estación 5, esta tubería es de 36 pulgadas, atraviesa las zonas de montañas y desiertos, hasta llegar al puerto de Bayovar. En la tabla n°5 se aprecia que el grado de material es X-52, en las tuberías de 16 y 24 pulgadas lo conforma un espesor mínimo de 6,35 milímetros lo que viene hacer 1/4 de pulgada. Tubería de 36 pulgadas es de 7,93 milímetro equivalente a 5/16 pulgadas.

La tubería está protegida con pintura epóxica, y cinta de polietileno, negra y blanca debido a que en la selva atraviesa diferentes tipos de terrenos o está sumergida en agua. El segundo tramo se inicia en la estación 5, la tubería es de 36 pulgadas también es protegida con cinta de polietileno negra de 20 milésimas de pulgada y cubierta con una cinta blanca también de polietileno de 25 milésimas de pulgada de espesor, la tubería está adecuada para las zonas y suelos variados que muestra la amazonia.

**Tabla 7:** Material de la tubería del oleoducto Nor Peruano

| Oleoducto   | Tramo    | Estaciones de Bombeo Inicial - Intermedia - Final | Longitud (Km) | Diámetro (in) | Espesor (in)  | Material    |
|-------------|----------|---|---------------|---------------|---------------|-------------|
| Principal   | Tramo I  | 1, 2,3,4,5  | 306           | 24            | 0.25 - 0.5    | API 5L X 52 |
|             | Tramo II | 5,6,7,8,9,T Bayovar                               | 550           | 36            | 0.312         | API 5L X 52 |
|             |          |   |               |               | 0.344         |             |
|             |          |   |               |               | 0.375         |             |
|             |          |   |               |               | 0.406         |             |
|             |          |   |               |               | 0.438         |             |
|             |          |   |               |               | 0.5           |             |
|             |          |   |               |               | 0.562         |             |
| 0.875       |          |   |               |               |               |             |
| Ramal Norte | ORN      | Andoas - Marona - 5                               | 252           | 16            | 0.25<br>0.375 | API 5L X 52 |

Fuente: Petroperú, 2016

El presente trabajo de investigación se ubica en el tramo II el km 308, tomando como muestra 18 kilómetros de longitud junto a la estación de bombeo n°5, departamento de Amazonas específicamente se consideró por ser una tubería de mayor influencia a la corrosión.



**Figura 18:** Derrames de petróleo 2016

Fuente: Osinergmin, 2016

**Tabla 8:** Fallas por corrosión del Tramo II

| Nº | Fecha de emergencia | Ubicación   |
|----|---------------------|---|
| 1  | 03/04/2011          | Estación #7 Km.513+500 Utcubamba, Amazonas                          |
| 2  | 13/04/2012          | Km.791+600 Sechura, Piura   |
| 3  | 04/09/2012          | Km.397+300 Condorcanqui, Amazonas                                   |
| 4  | 21/09/2013          | Km.504+400 Bagua, Amazonas  |
| 5  | 25/05/2014          | Km.547+463 Jaén, Cajamarca  |
| 6  | 18/09/2014          | Km.609+031 Jaén, Cajamarca  |
| 7  | 18/11/2014          | Km.622.5 Jaén, Cajamarca  |
| 8  | 10/12/2014          | Km.835+200 Sechura, Piura   |
| 9  | 27/12/2014          | Km.814+500 Sechura, Piura   |
| 10 | 19/02/2015          | Km.504+0.86 Bagua, Amazonas   |
| 11 | 21/09/2015          | Km.797+150 Sechura, Piura   |
| 12 | 14/10/2015          | Línea de recirculación de 06pulgadas de tanque 11d13 Sechura, Piura |
| 13 | 02/11/2015          | Km.569+763 Jaén, Cajamarca  |
| 14 | 06/11/2015          | Km.516+408 Utcubamba, Amazonas,                                     |
| 15 | 25/01/2016          | Km.440+785 tramo II Condorcanqui, Amazonas                          |
| 16 | 10/08/2016          | Km.364+990 del tramo II Condorcanqui, Amazonas                      |

Fuente: OEFA, 2016

En la tabla 08 se muestran las fallas y el actual estado que ha presentado el oleoducto en sus respectivos kilometrajes y zonas de ubicación teniendo así emergencias desde el año 2011 hasta el año 2016. En la Tabla 08, podemos observar que desde el tres de abril del 2011 Petroperú tiene problemas de derrame en su línea de oleoducto tanto en sus tramos uno y dos como en su ramal norte, debido a estas fallas ha sufrido desprestigio como empresa llevando así pérdidas económicas por miles de dólares.

Debido a esta situación se realizó estudios de los ductos llegando a la conclusión que la falla de estos derrames fue por el avance de la corrosión que se presentó en dichos ductos.

**Tabla 9:** Actualidad de progresiva del ONP

| Item | Progresiva  | Coordenadas UTM (WGS 84 – Sector 18 Sur) |            | Tipo de terreno / Profundidad de agua y % Pérdida de espesor.                        |
|------|-------------|--|------------|--|
|      |             | Norte                                    | Este       |  |
| 1    | 153+ 704.40 | 9458523.9                                | 367475.33  | Canal de flotación. Profundidad a 4.60m del lomo superior Pérdida Espesor: 80%       |
|      |             |  |            | Longitud de troncos para pódicos no menor a 10m                                      |
| 2    | 169+223.57  | 9459124.26                               | 362695.7   | Canal de flotación. Pendiente determina profundidad. Perdida espesor: 79%            |
| 3    | 183+074.88  | 9460921.56                               | 339262.964 | Zanja de empuje. Profundidad 0.6 m del lomo superior. Perdida de espesor :77%        |
| 4    | 183+074.88  | 9460921.58                               | 339262.928 | Zanja de empuje. Profundidad 0.6 m a lomo superior de tubo. Perdida de espesor :77%  |
| 5    | 200+925.54  | 9466962.69                               | 322687.87  | Canal de flotación. Profundidad a 3.70m a lomo superior. Perdida de espesor a 75%    |
| 6    | 201+116.09  | 9466978.85                               | 322498.38  | Canal de flotación. Profundidad a 4.60m de lomo superior. Perdida de espesor 80%     |
| 7    | 201+174.29  | 9466985.39                               | 322440.72  | Canal de flotación, nivel de agua a 3.70m de lomo superior de tubo 80%               |
| 8    | 201+223.85  | 9466990.12                               | 322391.48  | Canal de flotación. Profundidad a 3.70m de lomo superior. Pérdida de espesor: 77%    |
| 9    | 201+247.72  | 9466992.43                               | 322367.76  | Canal de flotación. Profundidad a 3.70m de lomo superior. Pérdida de espesor 80%     |
| 10   | 202+343.17  | 9467096.8                                | 321279.32  | Terreno firme. Asumir profundidad de enterramiento a 2.5m. Pérdida Espesor: 75%      |
| 11   | 203+177.59  | 9467173.03                               | 320450.08  | Terreno firme. Asumir profundidad de enterramiento a 2.5m. Pérdida Espesor: 75%      |
| 12   | 207+118.14  | 9467536.58                               | 316536.17  | Terreno firme. Asumir profundidad de enterramiento a 2.5m Pérdida de espesor: 80%    |
| 13   | 228+800.71  | 9469303.98                               | 294998.86  | Zanja de empuje. Asumir profundidad a lomo superior de 1.0m. Pérdida espesor: 75%    |
| 14   | 310+852.09  | 9469306-93                               | 294947.63  | Zanja de empuje. Asumir profundidad a lomo superior de 1.0m. Pérdida de espesor: 80% |

Fuente: Unidad de mantenimiento de línea - Petroperú

En la tabla 9 nos indica la pérdida de espesor y su porcentaje que ha alcanzado la corrosión en dicho punto, teniendo en cuenta el tipo de terreno y profundidad del agua, esta prueba se realizó con un equipo llamado raspa tubo la cual consta de colocar el equipo internamente desde un cierto punto que va desde una estación en este caso la estación 1 hasta su punto de llegada que fue la estación 6, determinando así sus análisis de pérdida de espesor de la tubería debido a una corrosión, teniendo como referencias las coordenadas se lograron localizar los puntos más críticos de la tubería presentando así un porcentaje alto la cual ha llevado a comprometer a un cambio y reparación de dichos puntos, en esta tabla también nos indica que la tubería se encuentra bajo tierra y en algunos kilómetros bajo el agua exponiéndose a un medio de corrosión más avanzado.

### **Detección de la corrosión**

La dificultad que se tiene con este fenómeno que se presenta en una tubería enterrada es que no se pueda ver su deterioro o situación corrosiva, a menos que se hagan costosas excavaciones perjudicando el nivel económico de la empresa.

### **Resistencia a la fluencia y ruptura, grados de la tubería API-5L.**

Nuestra tubería que vamos a tomar como muestra del tramo II en el km 308 es de grado X52 con un esfuerzo de fluencia mínima (elasticidad) es de 52,000 psi-359MPa, y su esfuerzo de rotura mínima es de 66,00psi-455MPa.

**Presión máxima admisible:** La presión máxima admisible para la tubería está determinada utilizando el ANSI B 31.4 y la siguiente fórmula:

$$P = \frac{200Std}{D}$$

Dónde:

P= presión máxima admisible, kg/cm<sup>2</sup>.

S= esfuerzo admisible, kg/mm<sup>2</sup> (mínimo punto de fluencia especificado x 0.72).

t= espesor de la pared del tubo, dada en pulgadas.

d= coeficiente de acoplamiento (igual a 1.0).

D= diámetro exterior del tubo, en pulgadas

### Propiedades del suelo

La humedad que hay en un terreno la cual está unido a sales, está comprometida con la resistividad y su medio agresivo. En este caso los suelos húmedos y conductores vienen hacer más agresivos que los suelos secos y con mucha resistividad. De acuerdo a esto que se presenta es común que se clasifiquen su tipo de agresividad que ira en función a su resistividad del suelo. **(HUERTA, 2001)**

El suelo cuando presenta un bajo nivel de humedad viene a comportarse como un mal conductor de electricidad, cuando se muestra totalmente seco se comporta como un material semi conductor o un aislante. El valor de resistividad fluctúa en límites muy amplios, dependiendo de la composición del suelo, de la continuidad de sus partículas, de su estructura, de la presencia de aguas, de las sales y otros. **(HUERTA, 2001)**

**Tabla 10:** Propiedades del suelo

| UNIDAD FISIOGRAFICA | Ph  | CIC  | %SAT |
|---------------------|-----|------|------|
| Zonas de colinas    | 4,7 | 13,1 | 4,6  |
| Piedemonte          | 5,4 | 69,5 | 32,8 |
| Terraza lacustre    | 5,6 | 48,4 | 30,6 |
| Talud de terraza    | 5,9 | 57,9 | 19,2 |
| Vega de inundación  | 4,7 | 22,0 | 57,7 |
| Diques              | 4,9 | 14,2 | 42,2 |

Fuente: Unidad de mantenimiento de línea - Petroperú

pH : Potencial Hidrogeno

CIC : Capacidad del Intercambio Catiónico

%SAT: % de saturación

Por su variada composición que presenta el suelo muchas veces cambia sus propiedades en mínimas distancias ya sea vertical como horizontal. En el suelo encontramos una gran variedad de minerales tales como: materia, organismos

vivientes, materia orgánica óxidos hidratados, minerales, siendo estos componentes lo que va a permitir su estabilidad al suelo.

**Tabla 11:** Composición del suelo

| Elemento químico | %Por peso |
|------------------|-----------|
| Si               | 27,7      |
| Al               | 8,1       |
| Fe               | 5,0       |
| Ca               | <5,0      |
| Na               | <5,0      |
| K                | <5,0      |
| Mg               | <5,0      |
| Ti               | <1,0      |

Fuente: Unidad de mantenimiento de línea - Petroperú

### Potencial del hidrogeno (pH):

$$pH = \log \frac{1}{a_{H^+}} = -\log H^+ = -\log (H^+)$$

$a_{H^+}$  : Es el movimiento de los iones  $H^+$

Luego de disponer de la información sobre las propiedades del suelo la propuesta de diseño será factible concretando la información, conceptos de las mediciones y características de campo como:

Medidas de resistividad eléctrica del electrolito (suelo) a fin de evaluar sus condiciones de corrosión a que estará sometida la estructura. Definir sobre el tipo de sistema a utilizar en este caso será corriente impresa, lo que nos permitirá escoger los mejores lugares para la instalación del sistema por medio de ánodos con corriente impresa.

Con respecto a las mediciones del potencial de la estructura con el electrolito, esto tiene que ser necesario para así evaluar su avance o en qué condiciones

se encuentra la estructura en su medio corrosivo así mismo detectar los problemas de corrosión.

De estos puntos tendremos:

Zonas con baja resistividad

Distribución de corriente sobre la estructura.

Accesibilidad a los lugares para la realización de su inspección y pruebas necesarias.

Las pruebas para la determinación de corrientes necesaria que va utilizar para el diseño de la protección va hacer mediante la fuentes de corriente continua esto nos permitirá tener la intensidad requerida que se va a dividir en el área para así tener su respectivo cálculo.

Por lo tanto se realiza una recopilación de datos, donde se visualiza por medio de una tabla los datos obtenidos de una evaluación que se dio en dicho tramo el equipo es un Smart Pig geométrico o también llamado raspa tubo la cual se encarga de monitorear el estado interno de la tubería, se va a determinar el estado del oleoducto por medio del cálculo del porcentaje determinando así la perdida de espesor la cual va analizar a lo largo de la tubería.

### **La ecuación de Velocidad que penetra la corrosión:**

Por lo tanto tenemos que la velocidad  $V = \frac{D}{T}$  (movimiento rectilíneo uniforme) se define la velocidad que penetra la corrosión con la letra C entonces tenemos que

$$C = \frac{E}{T}$$

En donde:

C= Velocidad de penetración de la corrosión (profundidad/tiempo)

E= Perdida del espesor

T=Tiempo

De las siguientes definiciones generales tenemos que:

Densidad:  $\rho = \frac{W}{V}$

Volumen:  $V = A * E$

Donde:

V = Volumen

W = Peso

A = Área

$P$  = Densidad  
 $E$  = (perdida de espesor)

**Tipos de suelo que representa el ONP:** El Oleoducto Norperuano a través de su ubicación y zonas en la que se encuentra, presenta estrato de su geografía variados. Dentro de la información técnica una tabla que clasifica geotécnicamente al terreno alrededor de la tubería, la cuales son:

**Tabla 12:** Tipos de suelo

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1 | Suelos orgánicos y pantanosos |
| 2 | Deposito fluvial              |
| 3 | Deposito coluvial             |
| 4 | Deposito eólico               |
| 5 | Deposito deltaico             |
| 6 | Deposito lacustre             |
| 7 | Roca madre                    |
| 8 | Relleno                       |

Fuente: Unidad de mantenimiento de línea - Petroperú

#### **4.2. Identificar las tecnologías de los sistemas que utilizan en el oleoducto.**

##### **4.2.1. Inspecciones por procesos corrosivos internos en la tubería**

###### **Limpieza de Tubería**

Para tuberías que presentan corrosión interna (detectada con raspa tubos instrumentados). Se retira el recubrimiento protector, realizando de forma exhaustiva el lijado, escobillado y limpieza con solventes hasta eliminar óxidos e imprimante.

###### **Inspección de la corrosión**

La inspección será efectuada por personal calificado que cuenta con el conocimiento y la experiencia, debe haber una estrecha coordinación entre el inspector y el supervisor de este mantenimiento predictivo antes, durante y después de la inspección.

Se efectúan las siguientes actividades:

Medir longitudes del tubo a inspeccionar.

Marcar en cada tubo los defectos críticos indicados en los registros de la inspección interna del oleoducto.

Calibrar el equipo de ultrasonido utilizando el bloque de calibración escalonado.

Efectuar el barrido de espesores con el equipo de ultrasonido en la zona inferior de la tubería.

Durante la fase de barrido de espesores se determinarán las características y dimensiones de los defectos (longitud, ancho y profundidad).

Criterios para decidir la reparación (de camisetado).

### **Inspecciones para procesos corrosivos externos en la tubería**

#### **Limpieza de tubería**

Para tuberías que presentan corrosión externa se retira el recubrimiento protector, elimina el óxido, la suciedad y se limpia con solventes. Para los tramos I y ORN, no es necesario el retiro del revestimiento protector ya que este es pintura termo aplicada.

#### **Inspección de la corrosión**

La inspección es efectuada por personal calificado que cuente con el conocimiento y la experiencia, debe haber una coordinación entre el inspector y el supervisor.

Se efectúan las siguientes actividades.

Medir las longitudes del tubo a inspeccionar.

Verificar la ubicación de los defectos encontrados en cada tubo.

Medir los espesores de tubería.

#### 4.2.2. Métodos a utilizar para medir la resistividad del suelo

Método inductivo con equipo EM31-MK2.

##### Procedimiento de cómo medir la resistividad del suelo

Este método electromagnético (método inductivo) es una alternativa para realizar estudios de resistividad, esta técnica se realiza con el equipo EM31- MK2, el cual consiste en medir la conductividad del suelo casi tan rápido como el operador puede caminar, teniendo un alto rendimiento en el tamaño de la muestra, y también una mejor resolución de la resistividad.



**Figura 19:** Equipo Geonic EM31 Wk2

Fuente: Unidad de mantenimiento de línea - Petroperú

La profundidad efectiva de exploración es de aproximadamente 6 metros, lo que hace ideal para el monitoreo de contaminantes geotécnicos. Una ventaja importante del EM 31-MK2 con respecto a los métodos de medición convencionales de la resistividad son: la velocidad con la cual se puede llevar a cabo la medición, la precisión donde se pueden medir las pequeñas variaciones y la recolección continua de información mientras se atraviesa la zona de medición.

**Tabla 13:** Características del equipo Geonic EM31 Wk2

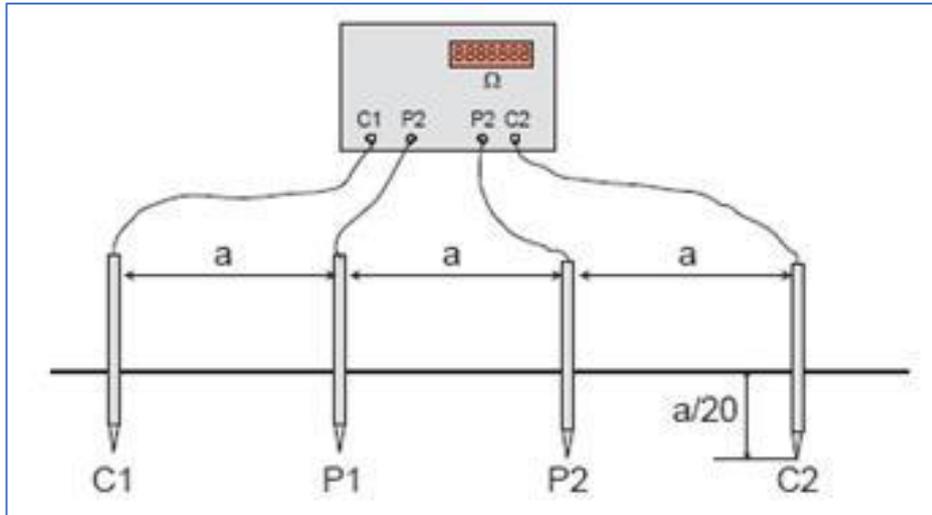
|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Cantidades Medidas          | 1: Conductividad Aparente, en millisiemens por metro (mS/m)   |
|                             | 2: Proporción en fase (in-phase) del campo magnético secundario con respecto al primario en partes por mil (ppm). |
| Fuente de Campo Primario    | Transmisor dipolo auto contenido.   |
| Sensor                      | Receptor dipolo auto contenido.   |
| Espaciamiento del Intercoil | 3.66 metros   |
| Frecuencia de Operación     | 9.8 kHz   |
| Fuente de Energía           | 8 baterías alcalinas descartables tamaño 'C' (aprox. 20 h continuas)  |
| Rango de Medición           | Conductividad: 10, 100, 1000 mS/m   |
|                             | In-phase: +/- 20 ppm  |
| Resolución de la Medición   | +/- 0.1% a escala completa  |
| Precisión de la Medición    | +/- 5% at 20 mS/m   |
| Nivel de Ruido              | Conductividad: 0.1 mS/m   |
|                             | In-phase: 0.03 ppm  |
| Almacenamiento de la Data   | 10,000 registros (2 componente); 16,500 registros (1 componente) (memoria externa disponible)                     |
| Dimensiones                 | Boom: 4.0 m extendido, 1.4 m almacenado   |
|                             | Caja de Embalaje: 145 x 38 x 23 cm  |
| Peso                        | Instrumento: 12.4 kg  |
|                             | Embalaje: 28 kg   |

Fuente: Unidad de mantenimiento de línea - Petroperú

#### 4.2.3. Método Wenner

Este es un método y es el más usual en resistividad del suelo, que consta de equipos especializado con parámetros de voltaje y resistencia, el cual consiste en insertar cuatro electrodos en el suelo en línea recta y a una misma profundidad. Se utiliza un teluometro la cual permite realizar la medición correcta para así comprobar la agresividad del suelo.

La medición de la resistividad dependerá de la distancia de electrodos.



**Figura 20:** Proceso Método Wenner

Fuente: Corrosión en metales, 2014.



**Figura 21:** Teluómetro digital MTO20KW

- Visor numérico de 3½ dígitos
- Medición de resistividad del terreno
- Medición de tensiones espurias
- Resolución: 0,01  $\Omega$
- Rango de resistencia hasta 20 k $\Omega$
- Alta inmunidad a las interferencias

#### 4.2.4. Pig o diablo de limpieza

Los pigs son dispositivos que se insertan y viajan por la longitud de una tubería, impulsados por el flujo de la misma.



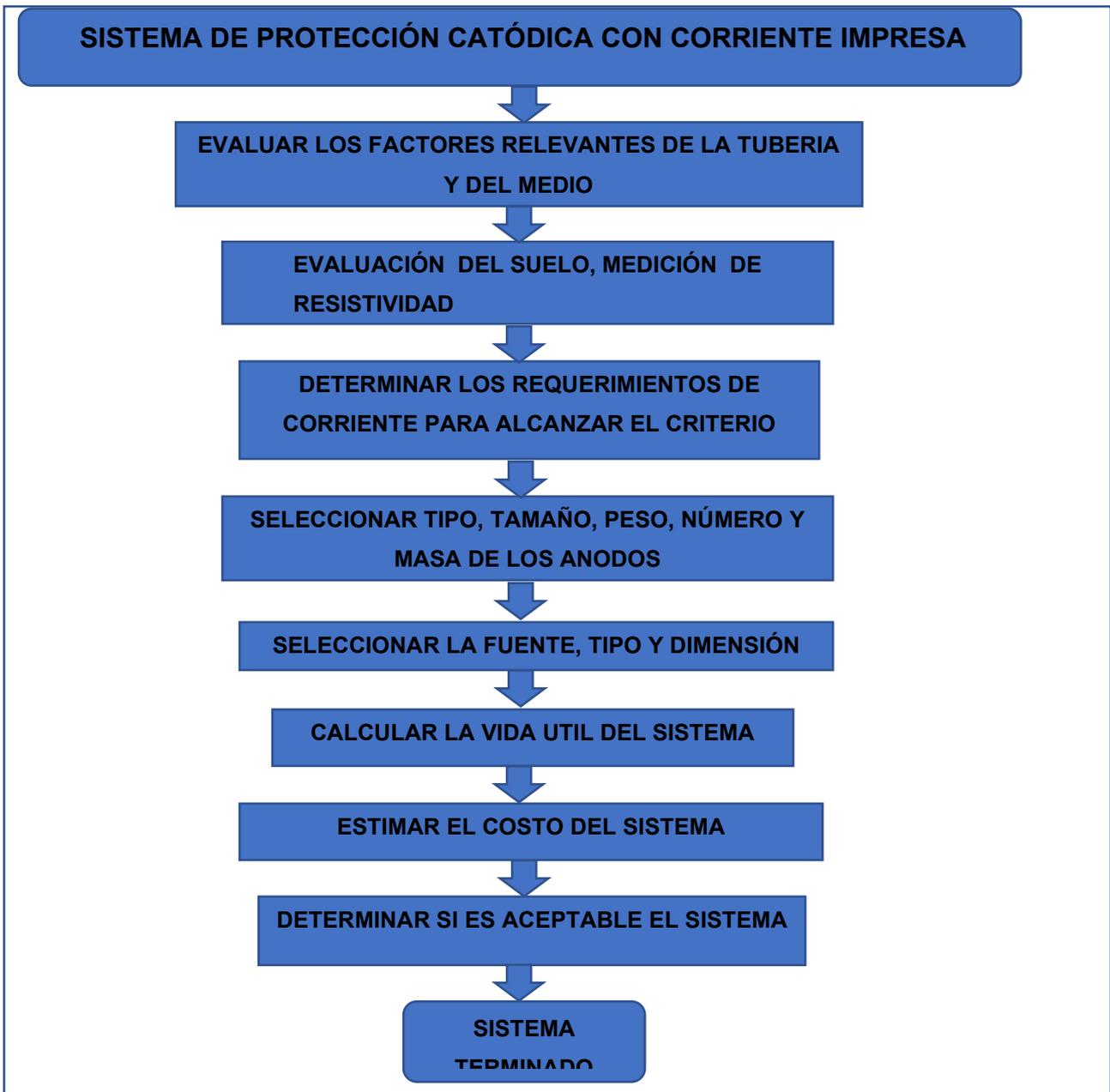
**Figura 22:** Equipo Pig

Fuente: Unidad de mantenimiento de línea - Petroperú

#### 4.3. Proponer y calcular un sistema de protección catódica utilizando corriente impresa.

##### 4.3.1. Cálculos que se dan para la propuesta del sistema

El cálculo tiene por objetivo dimensionar un sistema de protección catódica por medio de corriente impresa, para proteger 18 Km de tubería de 36 pulgadas de diámetro, se detalla a continuación su procedimiento que tendrá dicho sistema, los cuales fueron definidos con mejor criterio en definición a las mediciones realizadas de campo sobre la estructura y su medio electrolito (suelo).



**Figura 23:** Evaluación del suelo

Fuente: (NACE International, 2005)

**Resistividad:** En esta prueba utilizaremos el método del “four-pin method wenner” la cual consta de cuatro varillas de metal sumergidas en el suelo que serán utilizadas como electrodos, estarán separadas en línea recta que no sobrepase el 5% de profundidad a la separación mínima de los electrodos la cual

van a estar separados a un metro uno al otro, realizamos 6 pruebas con una distancia de 200mts entre sí.



**Figura 24:** Evaluación de la resistividad del suelo

**Tabla 14:** Características corrosivas del suelo

| Resistividad (ohm-cm) | Características corrosivas del Suelo |
|-----------------------|--------------------------------------|
| <900                  | Muy corrosivo                        |
| 900-2.300             | Bastante corrosivo                   |
| 2.300-5.000           | Moderadamente corrosivo              |
| 5.000-10.000          | Ligeramente corrosivo                |
| >10.000               | Muy ligeramente corrosivos           |

Este resultado según nuestra tabla nos encontramos frente a un terreno ligeramente corrosivo.

La resistividad ( $\rho$ ) se calcula mediante la siguiente formula:

$$\rho (\Omega.cm) = 2 * \pi * a * R$$

Donde:

$\rho$ : Resistividad ( $\Omega.cm$ )

$a$ : Separación entre los electrodos (cm)

$R$ : Resistencia en  $\Omega$

## Resultados medidos con teluometro

**Tabla 15:** Resultados del teluometro

| Tramo                           | Punto de Medición. Progresiva (m) | Resistividad(ohm.cm) |
|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| Tramo2<br>kilómetro 308-<br>326 | 0                                 | 13,5                 |
|                                 | 320                               | 11,4                 |
|                                 | 400                               | 11,7                 |
|                                 | 600                               | 12,1                 |
|                                 | 800                               | 12,9                 |
|                                 | 1000                              | 14,0                 |

Tomamos como referencia el más alto en resistividad que es: 14.0 ohm.cm

Aplicamos la fórmula:

$$\rho (\Omega.cm) = 2 * \pi * a * R$$

Reemplazamos:

$$\rho = 2 * 3.1416 * 90 * 14,0$$

$$\rho = 7912.8 \text{ ohm. cm}$$

### 4.3.2. Dimensión de la estructura a proteger

El área que se va a proteger depende siempre de la eficiencia de las técnicas empleados en la protección de las estructuras, como veremos en este caso el estado del recubrimiento que obtiene la tubería que se encuentra enterrada. El área a proteger depende del tipo de estructura y del porcentaje de protección que se requiera, o el porcentaje de la estructura que está en contacto con el electrolito (suelo).

Longitud a proteger (L): 18 Km = 18,000 m

**Diámetro externo de la tubería (De):** 36 pulg. =  
36 pulg. X (2,54 cm/1 pulg) x(1 m/100 cm)

$$De = 0.9144 \text{ m.}$$

#### 4.3.3. Cálculo del área total (At)

|                |                       |                |
|----------------|-----------------------|----------------|
| Longitud total | 708661,42 pulgadas    | 18,000 metros  |
| Diámetro       | 36 pulgadas           | 0.9144 metros  |
| Espesor        | 0,3122-(1/4) pulgadas | 0,00793 metros |

Área externa:

$$At = PI \times De \times L$$

$$At = 3,1415 \times 0.9144m \times 18,000 \text{ m} = 51,708 \text{ m}^2$$

#### 4.3.4. Estimación del % de área sin revestimiento o con poca pérdida de propiedad aislante (factor de rotura o factor de eficiencia del revestimiento)

Para calcular el porcentaje del área de la eficiencia de revestimiento; se evaluó las propiedades aislantes dadas por el fabricante.

| Kilometro                     | Espesor | Tipo de revestimiento   | Condición de tendido | Tipo de terreno         |
|-------------------------------|---------|---|----------------------|-------------------------|
| 308 Hasta<br>325+998.54<br>KM | 0.312"  | Cinta de polietileno negra de 0.5mm esp.+cinta de polietileno blanca de 0.6mm esp, recubrimiento epóxicos deteriorados en algunos kilometros. | enterrada            | Moderado con vegetación |

El área a proteger depende del tipo de estructura y del porcentaje de protección que se requiera, o el porcentaje de la estructura que está en contacto con el electrolito (**Bedon, 2005**).

La tubería de 36" de diámetro externo ha sido instalada en el año 1977 y enterrada a una cota de 1.50 m. El estado actual del revestimiento en este caso el porcentaje de revestimiento de área desnuda o dañada se calculó en un promedio del 2.3% (factor de daño anticipado) para una vida útil del sistema de 20 años. Esto se irá incrementando a través de los años.

#### **4.3.5. Cálculo del área a proteger (Ap.)**

El área total de la tubería se multiplica por el factor de rotura o daño anticipado del revestimiento.

Área a proteger:

$$Ap = At \times f$$

Donde:

A = área a proteger ( $m^2$ )

At = área total

F = porcentaje de protección

$$Ap = (51,708) \times (0.023) = 1,189.86m^2$$

#### **4.3.6. Densidad de corriente (Dc)**

Existen métodos para estimar los requerimientos de corriente de una estructura, estos pueden no ser del todo determinantes por diversas razones.

Es común en la práctica asumir una densidad de corriente que acoja tanto las recomendaciones y tablas normalizadas, como la experiencia del diseñador en sistemas similares. La densidad de corriente a emplear en el diseño del sistema de este problema es de 15 mA/m<sup>2</sup>, la cual ha ofrecido un nivel adecuado de protección en casos similares.

#### **4.3.7. Corriente requerida para la protección**

Para estimar la corriente necesaria para proteger dicha estructura se da por la siguiente ecuación:

$$IC = Dc \cdot Ap$$

Dónde:

Dc: Densidad de corriente [15mA/m<sup>2</sup>].

Ap.: Área de tubería protegida [m<sup>2</sup>]

$$I_C = \left( \frac{15mA}{m^2} \right) \times (1,189.26 m^2) = 17.838 A$$

#### 4.3.8. Intensidad de corriente factor de seguridad

Se debe considerar que a la intensidad de corriente se debe agregar un porcentaje aproximado del 10% por razones de seguridad, pero en este caso asumiremos un valor del 15%.

Calculo de factor de seguridad:

I seguridad= I requerida\*fc%

I seguridad= 17.838\*0.15.

I seguridad= **2.6757 A**

Por lo tanto tenemos:

$$17.838+2.6757=\mathbf{20.4A}$$

#### 4.3.9. Selección del tipo de material anódico

El material anódico fue escogido principalmente en función de la resistividad del terreno y de la vida útil esperada para el sistema.

**Tabla 16:** Características de los ánodos de grafito

| Ánodo de Grafito                          | Descripción |
|---|-------------|
| Diámetro (cm)                             | 7.2         |
| Longitud (cm)                             | 152.4       |
| Masa (Kg/Ánodo)                           | 12.3        |
| Densidad de Corriente (A/m <sup>2</sup> ) | 3 a 5       |
| Consumo (Kg/A x Año)                      | 0.2 a 1     |
| Rendimiento Eléctrico (%)                 | 70          |

Fuente: INGESCO



**Figura 25:** Ánodo de grafito

Fuente: INGESCO

El grafito puede utilizarse principalmente en terrenos de resistividad media, con un relleno de grafito o de carbón de coque.

Sus dimensiones varían: su longitud oscila entre 100 y 200 cm y su diámetro entre 6 y 10 cm. Son más ligeros de peso que los de ferro silicio. La salida máxima de corriente que tienen estos ánodos es de 3 a 5 A por ánodo y su desgaste varía entre 0.4 y 1 kg/A-año.

#### **4.3.10. Cálculo de la masa anódica requerida (ma)**

Se consultó la experiencia según diversos proveedores/fabricantes utilizando una tasa de consumo promedio para el ánodo de grafito de 0.4Kg/A x año, la corriente demandada de protección (Cp.) y su eficiencia eléctrica del grafito en un 70% alrededor.

Tenemos:

$$ma = \left( \frac{cp*cr*vu}{Rend} \right)$$

ma=Peso del material anódico

cp=Corriente de protección en A.

Cr= Velocidad de consumo en Kg/A-Año

Vu= vida útil esperada en años.

Rend= Rendimiento o eficiencia eléctrica.

Por lo tanto tenemos:

$$ma = \frac{20 * 0.4 * 20}{0.7} = \mathbf{228.5Kg}$$

Por su factor de seguridad de 15% que se dara en su masa de ánodo queda:

$$ma = 228 * 1.15 = \mathbf{261.25kg}$$

#### 4.3.11. Cálculo del número de ánodos (N)

$$N = \frac{ma}{\text{peso de ánodo}}$$

Donde:

$$N = \frac{262.75}{12.3} = \mathbf{21 \text{ ÁNODOS}}$$

#### 4.3.12. Lecho anódico a considerar

Se instalaran 21 ánodos dispersores en forma perpendicular a la estructura y vertical en cuanto a profundidad, separados 5 metros cada uno. Así mismo de acuerdo al Estándar N° NACE SP0169-2013 menciona que comúnmente se utiliza como backfill al Coque de Carbón, Coque Calcinado de petróleo por Corriente Impresa se ha seleccionado el Coque Calcinado de Petróleo (Loresco Tipo SC-2), debido a que este material presenta excelente conductividad y un alto nivel de pureza con un contenido de carbón del 99.35%. El backfill de Coque Calcinado de Petróleo se instala alrededor del ánodo dispersor de corriente dentro de un canister, con la finalidad de reducir la resistencia del ánodo a tierra, aumentando el área del ánodo e incrementando su vida útil. En el diseño se requieren 21 ánodos dispersores/cama anódica, por lo cual es necesario la adquisición de 147 bolas de Coque Calcinado de Petróleo (densidad de 1.18Kg/dm<sup>3</sup>), los cuales serán distribuidos homogéneamente en los canisters de 0.30 m. de diámetro y 2 m. de longitud.

**Tabla 17:** Características del lecho anódico a instalar

| <b>Descripción</b>   | <b>Cantidad</b>  |
|--|--|
| <b>Números de Ánodos</b>                                   | 21 Unidades  |
| <b>Separación de Ánodos</b>                                | 5m   |
| <b>Ubicación</b>   | Vertical conectados en paralelo perpendicular a la tubería |
| <b>Peso del Ánodo</b>                                      | 12.3 kg  |
| <b>Diámetro del Ánodo</b>                                  | 7.2 cm   |
| <b>Material del Ánodo</b>                                  | Grafito  |
| <b>Longitud del Ánodo</b>                                  | 152.4 cm   |
| <b>Consumo(kg/A. Año)</b>                                  | 0.4kg x año  |
| <b>Densidad del Ánodo (A/m<sup>2</sup>)</b>                | 3 a 5 A/m <sup>2</sup>                                     |
| <b>Vida estimada del Ánodo</b>                             | 20 años a 0.4kg de consumo por año                         |
| <b>Cable de salidas del Ánodo y Cátodo al retificador</b>  | 1414m cable n°4 AWG doble                                  |
| <b>Cable de separación entre Ánodos en la cama Anódica</b> | 140m entre Ánodo a 5m de distancia                         |
| <b>Tipo de Relleno</b>                                     | Coque calcinado de Petróleo tipo SC-2                      |
| <b>Números de Canister(donde se va a alojar el ánodo)</b>  | 21 unidades  |
| <b>Diámetro del Canister</b>                               | 0.30m  |
| <b>Longitud del Canister</b>                               | 2m   |

### 4.3.13. Cálculo de resistencias eléctricas del circuito del sistema

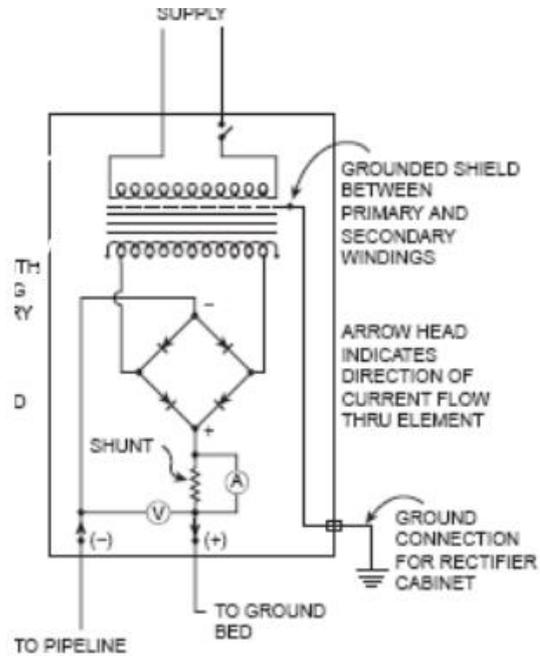


Figura 26: Circuito de protección por corriente impresa

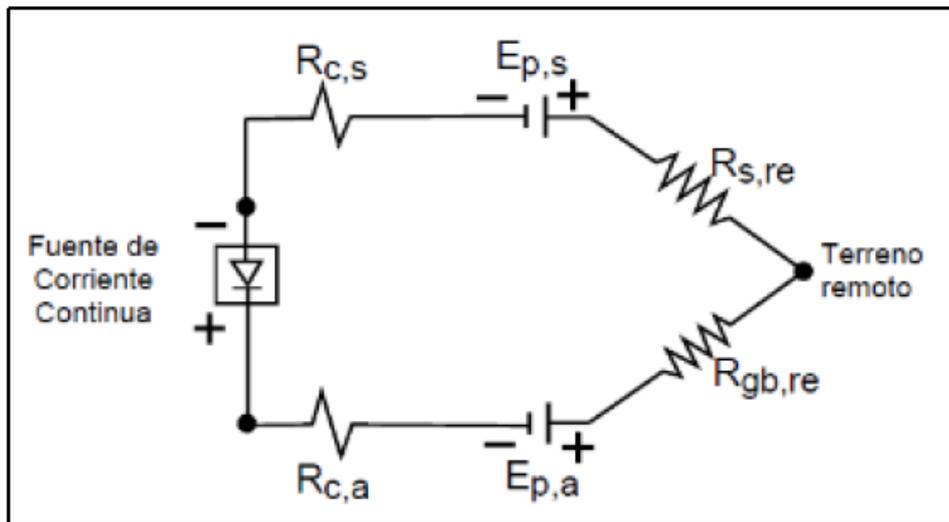


Figura 27: Resistencia eléctrica

- $R_{C,S}$  = Resistencia del cable negativo desde la estructura.
- $E_{P,S}$  = Potencial polarizado de la estructura (V).
- $R_{S,re}$  = Resistencia de la estructura al terreno remoto (ohm).
- $R_{gb,re}$  = Resistencia del dispensor al terreno remoto (ohm).
- $E_{p,a}$  = Potencial polarizado del dispensor (V).

$R_{c,a}$  = Resistencia del cable del lecho anódico al dispersor

**La resistencia total para el sistema de corriente impresa es:**

$$R_{Tci} = R_{c,a} + R_{c,s} + R_{s,re} + R_{gb,re}$$

#### 4.3.14. Cálculo de la Resistencia del Lecho Anódico (Vertical)

Formula:

$$R_v = \frac{\varphi}{2\pi LN} \left( \ln \frac{8L}{d} - 1 + \frac{2L}{S} \ln(0.656N) \right)$$

Dónde:

$R_v$  : Resistencia del lecho anódico.

$\varphi$ : Resistividad eléctrica de donde se va a enterrar los ánodos [ $\Omega$ -cm]

N: Número de ánodos en paralelo

L: Longitud de ánodo [m]

d: Diámetro de ánodo [m]

S: Separación entre ánodos [m]

Para este caso vamos a tomar las características del canister con el fin de incrementar la superficie de contacto del ánodo con el electrolito y así tener mejor distribución de corriente.

Entonces tenemos:

$$R_v = \frac{50\Omega - m}{2\pi * 21 * 2m} \left[ \left( \ln \frac{8(2m)}{0.30m} \right) - 1 + \left( \frac{2(2m)}{5m} \right) \ln (0.656 * 21) \right]$$

$$R_v = 0.96 \Omega$$

Resistividad

| Sustancia          | Resistividad (Ohm m)  |
|--------------------|-----------------------|
| <i>Conductores</i> |                       |
| Plata              | $1.47 \times 10^{-8}$ |
| Cobre              | $1.72 \times 10^{-8}$ |
| Oro                | $2.44 \times 10^{-8}$ |
| Aluminio           | $2.75 \times 10^{-8}$ |
| Tungsteno          | $5.25 \times 10^{-8}$ |
| Platino            | $10.6 \times 10^{-8}$ |
| Acero              | $20 \times 10^{-8}$   |
| Plomo              | $22 \times 10^{-8}$   |
| Mercurio           | $95 \times 10^{-8}$   |
| Manganina          | $44 \times 10^{-8}$   |
| Constantán         | $49 \times 10^{-8}$   |
| Nicromo            | $100 \times 10^{-8}$  |

Resistividad

**4.3.15. Cálculo de la Resistencia de la tubería a Tierra Remota (RS,re)**

La resistencia del Oleoducto a tierra remota Rs,re está compuesta por dos resistencias en serie, las cuales son: (a) la resistencia de la tubería hacia el recubrimiento (Rs,re1), (b) la resistencia del recubrimiento hacia el terreno (Rs,re2). Para tuberías enterradas desnudas no aplica el cálculo de la segunda resistencia pues no existiría el recubrimiento; sin embargo en este caso la tubería es si posee un revestimiento externo.

**a) Cálculo de la Resistencia de la tubería al recubrimiento:**

La resistencia longitudinal de la tubería se obtiene con la expresión mostrada a continuación: (Ley de Pouillet)

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A}$$

Dónde:

$\rho$  = resistividad del acero ( $\Omega$ -cm) [ $20 \times 10^8 \Omega$ -cm] a centímetros.

L = longitud (cm)

A = superficie de la sección transversal (cm<sup>2</sup>)

Para calcular la superficie de la sección transversal del tubo se da la siguiente ecuación:

$$A = \frac{\pi}{4}(OD^2 - ID^2)$$

Dónde:

A = superficie de la sección transversal del tubo (cm<sup>2</sup>)

OD = diámetro externo del tubo, (cm)

D = diámetro interno del tubo, (cm)

Tenemos:

$$A = \frac{3,14}{4} (0,9144^2 - 0,00793^2)$$

$$A = 0,7858(0,83612 - 0,0000624)$$

$$A = 0,785 * 0,8360$$

$$A = 0,656 \text{ cm}^2$$

Una vez obtenido la sección transversal del tubo procedemos a calcular la resistencia de la tubería al recubrimiento empleando la formula.

$$R_{s, re1} = \frac{\rho * L}{A}$$

Reemplazamos:

$$R_{s, re1} = \frac{20 * 10^{-8} * 1800000}{0,656}$$

$$R_{s, re1} = 0,0054 \Omega$$

#### **b) Cálculo de la Resistencia entre Recubrimiento y Electrolito**

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

$$R_{s, re2} = \frac{r'_c}{A_s}$$

Dónde:

$r'c$ : Resistividad específica del recubrimiento ( $\Omega\text{-m}^2$ )

As: Área superficial de la tubería ( $m^2$ )

Con una resistividad específica del recubrimiento de  $5 \times 10^4 \Omega\text{-m}^2$  para tuberías largas con pocos accesorios colocándola a una estimación de buena se para luego dividirla con el área total de la estructura llegamos obtener lo siguiente:

$$Rs, re2 = \frac{5 \times 10^4 \Omega\text{-m}^2}{51,708 m^2} = 0.96 \Omega$$

**Tabla 18:** Conductancia específica para recubrimientos protectores

| Tuberías Largas con Pocos Accesorios             | Conductancia Especifica Promedio |   | Resistencia Especifica Promedio $r'_c$  |                          |                          |
|--|----------------------------------|---|---|--------------------------|--------------------------|
|  | Calidad                          | $\theta'$ Siemens/ft <sup>2</sup>       | $\theta'$ Siemens/m <sup>2</sup>        | $\Omega\text{-ft}^2$     | $\Omega\text{-m}^2$      |
| Excelente  |                                  | $<1 \times 10^{-5}$                     | $<1 \times 10^{-4}$                     | $>10^5$                  | $>10^4$                  |
| Buena  |                                  | $1 \times 10^{-6}$ a $5 \times 10^{-6}$ | $1 \times 10^{-4}$ a $5 \times 10^{-4}$ | $2 \times 10^4$ a $10^6$ | $2 \times 10^3$ a $10^4$ |
| Regular  |                                  | $5 \times 10^{-5}$ a $1 \times 10^{-4}$ | $5 \times 10^{-4}$ a $1 \times 10^{-3}$ | $10^4$ a $2 \times 10^4$ | $10^3$ a $2 \times 10^3$ |
| Mala   |                                  | $>1 \times 10^{-4}$                     | $>1 \times 10^{-3}$                     | $<10^4$                  | $<10^3$                  |
| Caño desnudo (2 a 12") (5 a 30 cm.)              |                                  | $4 \times 10^{-3}$ a $2 \times 10^{-2}$ | $4 \times 10^{-3}$ a $2 \times 10^{-1}$ | 50 a 250                 | 5 a 25                   |
| Distribución de Agua o Gas con Muchos Accesorios | Conductancia Especifica Promedio |   | Resistencia Especifica Promedio $r'_c$  |                          |                          |
|  | Calidad                          | $\theta'$ Siemens/ft <sup>2</sup>       | $\theta'$ Siemens/m <sup>2</sup>        | $\Omega\text{-ft}^2$     | $\Omega\text{-m}^2$      |
| Excelente  |                                  | $<5 \times 10^{-5}$                     | $<5 \times 10^{-4}$                     | $>2 \times 10^4$         | $>2 \times 10^3$         |
| Buena  |                                  | $5 \times 10^{-5}$ a $1 \times 10^{-4}$ | $5 \times 10^{-4}$ a $1 \times 10^{-3}$ | $10^4$ a $2 \times 10^4$ | $10^3$ a $2 \times 10^3$ |
| Regular  |                                  | $1 \times 10^{-4}$ a $5 \times 10^{-4}$ | $1 \times 10^{-3}$ a $5 \times 10^{-3}$ | $10^4$ a $2 \times 10^4$ | $2 \times 10^3$ a $10^3$ |
| Mala   |                                  | $>5 \times 10^{-4}$                     | $>5 \times 10^{-3}$                     | $<2 \times 10^3$         | $<2 \times 10^2$         |
| Caño desnudo (2 a 12") (5 a 30 cm.)              |                                  | $4 \times 10^{-3}$ a $2 \times 10^{-2}$ | $4 \times 10^{-3}$ a $2 \times 10^{-1}$ | 50 a 250                 | 5 a 25                   |

Fuente: NACE International, 2005

Una vez calculado las resistencias anteriores procedemos a sumarlas para obtener la resistencia total de la tubería a tierra remota.

$$R_{s, re} = R_{s, re1} + R_{s, re2} = 0,9654\Omega$$

#### 4.3.16. Cálculo de resistencia de cables en el sistema propuesto (Rc)

Para la resistencia de cables sólidos de cobre tenemos la siguiente formula.

$$Rc = r_{dc} * L$$

Dónde:

Rc: Resistencia del cable ( $\Omega$ )

dc: Resistencia del cable por unidad de longitud (Se observa en el cuadro 4)

L: Longitud del cable (m).

**Tabla 19:** Conductores de cobre para uso enterrado adecuadamente aislado

| Tamaño AWG | Diámetro Total, Excluyendo la Aislación (pulgadas) | Peso Aprox. Excluyendo la Aislación (lbs/1000 ft) | Máxima Tensión de Ruptura (lbs) | Máxima Resistencia a la Corriente DC a 20°C Ohms/1000 m | Capacidad de Corriente DC Máx. Permitida (Amperios) |
|------------|--|---|---------------------------------|---|---|
| 14         | 0.0726   | 12.68   | 130                             | 8.4646  | 15  |
| 12         | 0.0915   | 20.16   | 207                             | 5.3150  | 20  |
| 10         | 0.116  | 32.06   | 329                             | 3.3465  | 30  |
| <b>8</b>   | <b>0.146</b>                                       | <b>50.97</b>                                      | <b>525</b>                      | <b>2.0997</b>   | <b>45</b>   |
| 6          | 0.184  | 81.05   | 832                             | 1.3222  | 65  |
| <b>4</b>   | <b>0.232</b>                                       | <b>128.9</b>                                      | <b>1320</b>                     | <b>0.8333</b>   | <b>85</b>   |
| 3          | 0.26   | 162.5   | 1670                            | 0.6594  | 100   |
| 2          | 0.292  | 204.9   | 2110                            | 0.5217  | 115   |
| 1          | 0.332  | 258.4   | 2660                            | 0.4134  | 130   |
| 1/0        | 0.373  | 325.8   | 3350                            | 0.3281  | 150   |
| 2/0        | 0.419  | 410.9   | 4230                            | 0.2608  | 175   |
| 3/0        | 0.47   | 518.1   | 5320                            | 0.2070  | 200   |
| 4/0        | 0.528  | 653.3   | 6453                            | 0.1640  | 230   |
| 250 MCM    | 0.575  | 771.9   | 7930                            | 0.1388  | 255   |

Fuente: NACE International, 2005.

Para nuestro sistema se eligió el conductor #4, de cobre de 7 hilos con una sección de 25mm<sup>2</sup> con aislamiento de polietileno de máximo peso molecular HMWPE. Cubrirá el espacio de 1484 metros entre el cable que sale del polo negativo del rectificador a la tubería y el cable positivo que sale del rectificador a la cama de ánodos. Para el diseño del sistema se tiene redundancia en el tendido de cable, es decir se ha considerado doble cable N° 4 AWG tanto para la salida de los polos positivo y negativo del rectificador. Tiene una tasa de resistencia de 0.833 Ohmios por cada 1000 metros de longitud ver cuadro 5.

$$Rc \#4 = \frac{0.833 \Omega}{1000 m} * x 1484 m = 1.23\Omega$$

#### 4.3.17. Cable N° 8 AWG

Se consideró calibre #8 de 7 hilos, calibre AWG #8 (10 mm<sup>2</sup> de sección), material Cu. Norma ASTM B-8 y aislamiento de polietileno de alto peso molecular HMWPE, cubre el espacio de 140 metros de distancia desde cada ánodo (5 metros) al cable principal que une el lecho anódico al polo positivo del rectificador. La tasa de resistencia es de 2.099 Ohmios por cada 1000 metros de longitud, se muestra en el cuadro anterior.

Para este calibre realizamos la misma ecuación para su respectiva resistencia:

Por lo tanto tenemos:

$$Rc\#8 = \frac{2.099\Omega}{1000m} * 140m = 0.294\Omega$$

Sumando las dos resistencias del conducto logramos obtener la resistencia total de cables del diseño a emplear.

$$RC = Rc4 + Rc8$$

$$RC = 1,23\Omega + 0.294\Omega$$

$$RC = 0,524\Omega$$

#### 4.3.18. Resistencia total del sistema (PCCI)

$$RTci = R_{gb,re} + R_{s,re} + Rc = 0.96\Omega + 0.965\Omega + 0,524\Omega =$$

$$\underline{RTci = 2.44\Omega}$$

Por lo tanto la resistencia total del sistema de protección por corriente impresa es de:

$$2.44\Omega$$

#### 4.3.19. Selección de la fuente de poder:

##### Voltaje del rectificador.

Para calcular el voltaje de la fuente utilizaremos la ley de ohm con los datos necesario para su cálculo estimándole un factor de seguridad de 5% como lo demanda las normas NACE.

Tenemos que:

$$U = I * R$$

Dónde:

U= Voltaje de fuente retificador

I= Corriente total del sistema

R= Resistencia total del sistema

$$U = 20 * 2.4$$

$$U = 48.25 V$$

Factor de seguridad de 5%

$$48.25 * 05 = 2.125 + 48.25 = 50V$$

Por lo tanto las características de la fuente del rectificador a utilizar el sistema de protección son:

Corriente de salida: **20 Amperios.**

Voltaje de salida: **50 Voltios.**

Construido dentro de la estación por motivo de seguridad.

#### **Características de la fuente:**

**Tabla 20:** Rectificador Modelo RPCC de 50Voltios y 25 Amp de salida

|  |   |
|--|---|
| Tensión Monofásica (Entrada)             | 220vv+/-10% /480v   |
| Frecuencia                               | <b>50hz + / -5%</b>   |
| Regulación de Tensión                    | <b>+/-1%.10% I<sub>max</sub>&lt; I<sub>0</sub>&lt;100% I<sub>max</sub>.</b> |
| Regulación de Corriente                  | <b>+/-2%.10% I<sub>max</sub>&lt; I<sub>0</sub>&lt;100% I<sub>max</sub>.</b> |
| Ajuste de potencial de Salida            | <b>0-5Vcc,sensor de so4 Cu.</b>   |
| Selección gruesa de la tensión de salida | <b>Selector por Pasos</b>   |
| Instrumentos de Medición                 | <b>Amperímetro/Voltímetro</b>   |
| Fusibles                                 | <b>Tipo NH</b>  |
| Protector contra sobre tensiones         | <b>Varistorés de óxido Metálico</b>   |
| Tensión de Salida DC                     | <b>50 V.</b>  |
| Corriente de salida DC                   | <b>25<sup>a</sup></b>   |
| Largo                                    | <b>600mm</b>  |
| Altura                                   | <b>900mm</b>  |
| Ancho                                    | <b>500mm</b>  |
| Acceso de Borneras                       | <b>Por la parte de adelante</b>   |
| Temperatura de Ambiente                  | <b>0/45°c</b>   |
| Ventilación                              | <b>Natural</b>  |
| Humedad de Ambiente                      | <b>&lt;95% s /condensación</b>  |
| Grado de Protección                      | <b>IP-54</b>  |
| Terminación                              | <b>Pintura Epoxi</b>  |
| Operación                                | <b>Manual/Automática</b>  |

#### **Características de la fuente**

#### **4.3.20. Cableado y Conexiones.**

Los cables de instalación al sistema serán completamente aislados para evitar desperfectos en su funcionamiento del sistema, los conectores que son soldadas deberán ser pintadas y cubiertos con resina epoxi.

Para este sistema tenemos más adelante la lista de materiales y sus precios obteniendo así una evaluación económica de cual va hacer su costo del sistema de protección por corriente impresa.

Para la protección catódica como se muestra en el listado de materiales. Los tipos de aislación que se usan en el diseño del sistema, son:

#### **Polietileno de Alto Peso Molecular (HMWPE)**

Esta aislación se usa comúnmente para los cables del ánodo y la estructura en instalaciones de protección catódica enterradas.

### **4.4. Realizar una evaluación económica del sistema de protección catódica con corriente impresa.**

#### **4.4.1. Inversión Inicial del Proyecto.**

**Tabla 21:** Listado de materiales y equipos para el diseño del sistema

| Item | Unidad | Especificación Técnica   | Cantidad | Precio Unitario (S/.) | Precio parcial (S/.) |
|------|--------|--|----------|-----------------------|----------------------|
| 1    | UN     | Anodo de grafito.<br>Diámetro: 7.2 cm<br>Longitud: 152.4 cm<br>Masa: 12.3 Kg       | 21.00    | 545.00                | 11445.00             |
| 2    | UN     | Conector tubular de compresión de cobre estañado para cable AWG #8.                | 21.00    | 1.92                  | 40.32                |
| 3    | KIT    | Kit para empalme de alta tensión con resina epóxica moldeable                      | 21.00    | 89.43                 | 1878.03              |
| 4    | M      | Cable de cobre trenzado de 7 hilos, calibre AWG #4 (25 mm <sup>2</sup> de sección) | 880.00   | 18.98                 | 16702.40             |
| 5    | M      | Tubería metálica flexible con revestimiento de PVC de 1"                           | 680.00   | 41.6                  | 28288.00             |
| 6    | M      | Cable de cobre trenzado de 7 hilos, calibre AWG#4 (25mm <sup>2</sup> de sección)   | 1200.00  | 21.32                 | 25584.00             |

|              |     |   |        |          |            |
|--------------|-----|---|--------|----------|------------|
| 7            | M   | Cable de cobre trenzado de 7 hilos, calibre AWG #8(10mm <sup>2</sup> de seccion)    | 120.00 | 10.98    | 1317.60    |
| 8            | UN  | Conector tipo perno, partido de cobre SPLIT BOLT para cable de calibre #4           | 21.00  | 10.98    | 230.58     |
| 9            | UN  | Conector de metal hermético recto de una pulgada DN para tubería.                   | 42.00  | 8.9      | 373.80     |
| 10           | BLS | Coque metalúrgico 3mm, ceniza 0.1%.carbon 99.77% de granulometría cero milímetros.  | 110.00 | 123.4    | 13574.00   |
| 11           | UN  | Material de canister de latón galvanizado de 1/40 de pulgada                        | 21.00  | 203.2    | 4267.20    |
| 12           | UN  | Fuente Rectificadora  | 1.00   | 6,500.00 | 6500.00    |
| 13           | UN  | Gabinete: llaves térmicas, barras, pernería, canaletas, rieles, fusibles, etcétera. | 1.00   | 3200     | 3200.00    |
| 14           | UN  | Instrumentos  | 3.00   | 280      | 840.00     |
| <b>Total</b> |     |   |        |          | 114,240.93 |

#### 4.4.2. Costo de Mantenimiento

**Tabla 22:** Costos de los servicios de mantenimiento

| Ítem         | Unidad | Nombre del Servicio   | Cantidad | Precio Unitario | Precio Parcial |
|--------------|--------|---|----------|-----------------|----------------|
| 1            | Unidad | Puesta a Tierra   | 1        | 1,450.00        | 1450.00        |
| 2            | Unidad | Instalación de Cama Anódica   | 140      | 130.00          | 18200.00       |
| 3            | Unidad | Instalación de cable  | 1        | 3000.00         | 3000.00        |
| 4            | Unidad | Instalación de equipos inc. Cables, conectores, etc.  | 1        | 2390.00         | 2390.00        |
| 5            | Unidad | Instalación de gabinete, incluye peinado de cables, base de concreto y tinglado de gabinete | 1        | 3500.00         | 3500.00        |
| <b>Total</b> |        |   |          |                 | 28,540.00      |

#### 4.4.3. Beneficios del Proyecto.

Si se ejecutase el proyecto propuesto, éste tendría el siguiente beneficio económico:

**Disminución del número de derrames de petróleo en la progresiva del tramo del oleoducto.**

Esto equivale a reducir las pérdidas económicas por el transporte del crudo, durante el tiempo de inoperatividad del oleoducto, que el periodo que dura la ubicación y reparación de la fuga.

En el periodo 2011 – 2016, se han registrado 16 fugas de petróleo en el oleoducto, como consecuencia de la corrosión, que equivale a 3.2 fugas cada año; sin embargo el número de fugas se incrementa cada año, debido a la antigüedad de la tubería.

En cada paralización del oleoducto, por día se deja de transportar en promedio 17500 barriles de petróleo que equivalen a 525000 barriles en un mes y de 6300000 barriles al año. Si se analiza éstas pérdidas, es necesario conocer el tiempo que demora en superar las labores de reparación después de la ocurrencia de la fuga.

Los tiempos de reparación del oleoducto, varía en función a la accesibilidad al lugar, así como también a contar con los mecanismos, repuestos y accesorios; siendo el número de días en promedio de 2,5 días.

La tarifa por el transporte del crudo de petróleo en el oleoducto es de 6,5 dólares por barril (20.8 Soles), lo que representa un costo de 364560 Soles por día, y de 911400 Soles en los 2,5 días de reparación. En los 3.2 veces en promedio al año, el costo del transporte del combustible será de 2916480 Soles. Se utilizará el 5% del costo de la tarifa de transporte del petróleo que se dejaría de percibir para la subvención del proyecto, es decir de 145824 Soles para el primer año, llegando hasta el 1% hasta el año 10 de evaluación del proyecto, es decir cada año disminuye de manera lineal dicho valor hasta 29164.8 Soles.

**Tabla 23:** Ingresos estimados del Proyecto.

| Año          | 1       | 2       | 3       | 4       | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
|--------------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ingreso (S/) | 145,824 | 132,862 | 119,900 | 106,938 | 93,975 | 81,013 | 68,051 | 55,089 | 42,127 | 29,165 |

**Flujo de caja del Proyecto.**

| Año            |                   | 0        | 1       | 2       | 3       | 4       | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
|----------------|-------------------|----------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ingreso (S/)   |                   |          | 145,824 | 132,862 | 119,900 | 106,938 | 93,975 | 81,013 | 68,051 | 55,089 | 42,127 | 29,165 |
| Egresos (S/)   | Inversión Inicial | 114240.9 |         |         |         |         |        |        |        |        |        |        |
|                | Mantenimiento     |          | 28540   | 28540   | 28540   | 28540   | 28540  | 28540  | 28540  | 28540  | 28540  | 28540  |
| Utilidad (S/.) |                   |          | 117,284 | 104,322 | 91,360  | 78,398  | 65,435 | 52,473 | 39,511 | 26,549 | 13,587 | 625    |

#### 4.4.4. Cálculos de Indicadores Económicos.

##### Valor Actual Neto

Los valores de los ingresos anuales, llevándolos al año cero, donde se inicial el proyecto, con una tasa de interés del 18% anual, que es la tasa promedio en el sector financiero en el Perú en los últimos 5 años.

Ingresos actualizados al tiempo 0:

$$Ia = \frac{Ra * [(1+i) ] ^{n-1}}{[i*(1+i)^n]} \quad (23)$$

Donde:

Ia: Ingresos actualizados año 0.

Ra: Ingresos Anuales: variables de acuerdo a flujo de caja

i. Tasa de Interés: 18% anual.

n: Número de años: 10

Reemplazando valores obtenemos: S/. 469307

Los costos por mantenimiento actualizados al año cero se determinan:

$$Ca = \frac{Rc * [(1+i) ] ^{n-1}}{[i*(1+i)^n]} \quad (23)$$

Donde:

Ia: Costos actualizados al años 0

Rc: Costos mensuales: variables de acuerdo a flujo de caja

ii. Tasa de Interés: 18 % Anual

n: Número de Años: 10

Reemplazando valores, obtenemos que los costos actualizados al año cero es 128261 Nuevos Soles.

El valor actualizado neto del proyecto se determina sumando los ingresos actualizados netos menos los costos actualizados más la inversión realizada, es decir  $469307 - 128261 - 114240.9 = 226805$  Soles.

### **Tasa Interna de Retorno**

Para calcular la tasa interna de retorno, se determina haciendo que los ingresos actualizados más los costos actualizados, con una tasa de interés a determinar es igual a la inversión inicial del proyecto.

$$Inv = \frac{Rd * [(1+TIR)]^{n-1}}{[TIR*(1+TIR)^n]} \quad (24)$$

Donde:

Inv: Inversión Inicial V

Rd: Utilidades anuales variables de acuerdo a flujo de caja.

n: Número de años: 10

TIR: Tasa Interna de Retorno.

Reemplazando valores, y mediante una metodología de aproximaciones o utilizando el software Microsoft Excel, se calcula el valor del TIR, siendo éste igual a 90% anual, que representa un valor superior al interés bancario actual que oscila entre el 18 a 20 % anual.

### **Relación Beneficio Costo**

La relación beneficio / costo es de  $(469307 - 128261) / 114240.9$ , es de 2,99, valor que hace viable la ejecución de la propuesta de la instalación de la protección catódica con corriente impresa.

## V. DISCUSIÓN

El Oleoducto Norperuano (ONP) tiene una longitud de 854 kilómetros (atraviesa costa, sierra y selva). A lo largo de este entramado de tuberías existen estaciones recolectoras que pueden almacenar entre 178 mil y 1 millón 960 barriles de crudo.



### Atentados:

Petroperú denunció dos atentados contra las infraestructuras del ONP, el de Julio en el distrito de Laguna y el segundo cerca de la comunidad nativa Nueva Alianza, en el distrito de Urarinas de Loreto, cerca de donde ocurrieron los derrames de los kilómetros 55.5 y 52.4 del Tramo I del **ONP** en agosto pasado.

En las estaciones del Oleoducto Norperuano hay instalados siete turbogeneradores Ruston-General Electric de 1.100 kilovatios cada uno, y 14 moto generadores, conformados por motores Caterpillar o Perkins, cuyas potencias varían entre 75 y 800 kilovatios, de acuerdo con la necesidad de cada estación.

Petroperú ha presentado fallas emergentes desde abril 2011 hasta 2016 conllevando a la empresa a una gran baja en su producción de bombeo.

**Tabla 24:** Fallas o derrames

| Item | Progresiva  | Coordenadas UTM (WGS 84 – Sector 18 Sur) |           | Tipo de terreno / Profundidad de agua y % Pérdida de espesor.  |
|------|-------------|--|-----------|--|
|      |             | Norte                                    | Este      |  |
| 1    | 153+ 704.40 | 9458523.90                               | 367475.33 | Canal de flotación. Profundidad a 4.60m del lomo superior Pérdida Espesor: 80%<br>Longitud de troncos para pórticos no menor a 10m |
| 2    | 169+223.57  | 9459124.26                               | 362695.70 | Canal de flotación. Pendiente determina profundidad. Perdida espesor: 79%  |

|    |            |            |            |  |
|----|------------|------------|------------|--|
| 3  | 183+074.88 | 9460921.56 | 339262.964 | Zanja de empuje. Profundidad 0.6 m del lomo superior. Pérdida de espesor :77%        |
| 4  | 183+074.88 | 9460921.58 | 339262.928 | Zanja de empuje. Profundidad 0.6 m a lomo superior de tubo. Pérdida de espesor :77%  |
| 5  | 200+925.54 | 9466962.69 | 322687.87  | Canal de flotación. Profundidad a 3.70m a lomo superior. Pérdida de espesor a 75%    |
| 6  | 201+116.09 | 9466978.85 | 322498.38  | Canal de flotación. Profundidad a 4.60m de lomo superior. Pérdida de espesor 80%     |
| 7  | 201+174.29 | 9466985.39 | 322440.72  | Canal de flotación, nivel de agua a 3.70m de lomo superior de tubo 80%               |
| 8  | 201+223.85 | 9466990.12 | 322391.48  | Canal de flotación. Profundidad a 3.70m de lomo superior. Pérdida de espesor: 77%    |
| 9  | 201+247.72 | 9466992.43 | 322367.76  | Canal de flotación. Profundidad a 3.70m de lomo superior. Pérdida de espesor 80%     |
| 10 | 202+343.17 | 9467096.80 | 321279.32  | Terreno firme. Asumir profundidad de enterramiento a 2.5m. Pérdida Espesor: 75%      |
| 11 | 203+177.59 | 9467173.03 | 320450.08  | Terreno firme. Asumir profundidad de enterramiento a 2.5m. Pérdida Espesor: 75%      |
| 12 | 207+118.14 | 9467536.58 | 316536.17  | Terreno firme. Asumir profundidad de enterramiento a 2.5m Pérdida de espesor: 80%    |
| 13 | 228+800.71 | 9469303.98 | 294998.86  | Zanja de empuje. Asumir profundidad a lomo superior de 1.0m. Pérdida espesor: 75%    |
| 14 | 310+852.09 | 9469306-93 | 294947.63  | Zanja de empuje. Asumir profundidad a lomo superior de 1.0m. Pérdida de espesor: 80% |

El oleoducto nor peruano presenta fallas en dichos tramos que se aprecian en la tabla 17. De las 73 fallas que se dieron, 14 de ellas son las más críticas llegando con pérdida de espesor superiores al 70%.

Esta tabla nos muestra en qué estado se encuentra los tramos del oleoducto la cual nos indica que el oleoducto debió recibir inspecciones periódicas (perfiles de pérdida de espesor) cada 5 años.

Esto nos permitirá analizar su estructura de diseño de la tubería, tipos de diámetros y espesor, para el respectivo diseño de protección catódica que vamos a proponer a la empresa.

Para identificar las potenciales de roturas en el tramo uno y tramo dos. Dicha inspección se realizó con un Smart-pig, para así poder escanear su interior por medio de sensores, para que el equipo pueda discurrir se necesita que se bombee petróleo en su interior del ducto la cual se necesitaría 180 mil barriles por cada pasada del smart-pig su lectura del equipo se encuentra en el anexo.

Medición de resistividad tramo II kilómetro 308 de oleoducto nor peruano-Petroperú esta medición realizada apreciamos los parámetros obtenidos por nuestro equipo (telurometro).

Los kilómetros que se evaluaron fueron representativos debido a que la geografía es variada del oleoducto nor-peruano, mostrando un diferente suelo en algunos kilómetros.

La resistividad promedio que se obtuvo fue medida en un área de 1 metro consecutivo de cada pin del equipo (teluro metro) y a una profundidad que no exceda el 5% de su distancia entre pines.

Para su conductividad de la tubería se tomó una medición adicional con un ánodo dispensor directo a la tubería.

El tamaño, área que ocupa y ubicación del ánodo dispensor cumple un papel importante, debido a que si esta se instala en una zona de baja resistividad el ánodo dispensor tendrá mejor alcance en su debido trabajo cuando esta inyecte sus electrones hacia la tubería a proteger.

Los resultados obtenidos en el kilómetro 308 Tramo II con la técnica del método de wenner nos indica unos resultados favorables para nuestro sistema de protección catódica, los kilómetros inspeccionados se realizó a 5 kilómetros de muestra para esta prueba de resistividad, realizando estas medidas en el kilómetro 308,310,312,320,326, se tomaron estos kilómetros por mostrar visualmente variedad de terreno.

En cuanto a la corrosión externa, las anomalías presentadas en los kilómetros adecuados, nos indica que la protección externa del recubrimiento en el tramo II kilómetro 308 en adelante se encuentran con los siguientes recubrimientos que se muestran en el cuadro.

**Tabla 25:** Espesor de tubería

| <b>Espesor de tubería<br/>progresiva km 308-326</b> | <b>Revestimiento</b>   |
|---|--|
| 0.312"  | Cinta de polietileno negra de 0.5mm, tipo fusión bonded epoxi esp.+cinta de polietileno blanca de 0.6mm, epoxi. De alta densidad, sujeto a norma CSA-Z24s.20-02 y DIN 30670:1991. Recubrimientos deteriorados en algunos kilómetros. |

Fuente: Propia

El actual oleoducto nor peruano cuenta con un sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio que actúa de manera complementaria a los diferentes tipos de revestimientos instalados sobre la superficie exterior del ONP y cuyas características son fijadas por el tipo de terreno por el cual esta proporcionado, los ánodos utilizados son de magnesio de alto potencial y corresponden al tipo barrilla y tipo empacado, lo cual es determinado por la resistividad del terreno por el que está situado el oleoducto.

Cuenta con un recubrimiento de cinta de polietileno de 0.6 mm de espesor este recubrimiento que va como revestimiento principal para su protección, después de esta se emplea el recubrimiento con otra cinta también de polietileno negra la cual su función es proteger al revestimiento blanco.

**Tabla 26:** Índices de reparación % IR de revestimiento-Tramo II est. .5 a 6 clasificación del %IR y cantidades de anomalías.

| <b>CLASIFICACIÓN DEL<br/>IR %</b> | <b>CANTIDAD DE<br/>ANOMALIAS</b> |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| 0%-15%                            | 11                               |
| 15%-30%                           | 13                               |
| 30%-60%                           | 5                                |
| 60%-mas                           | 3                                |

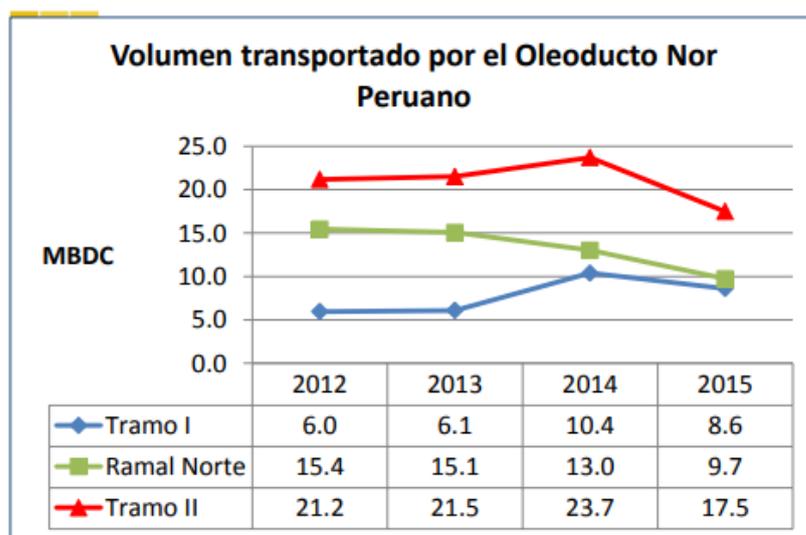
Los índices de reparación principales que indican anomalías de 60% al 100% (3) deben intervenir inmediatamente y del 30% al 60% deben realizar su verificación,

del 15% al 30% se recomienda realizar su reparación pues estas anomalías destinan una amenaza por la protección y por último del 15% al 0% no son amenazas ya que en ellas existe un porcentaje mínimo de deterioro, pero si deberían de ser monitoreadas con más continuidad.

Los cálculos realizados para el sistema de protección muestran su veracidad con respecto a los datos obtenidos de dicho tramo, teniendo así sus características inicial del tramo II (tubería) como diámetro, tipo de acero, revestimiento y longitud De acuerdo a estos datos procedí a calcular la resistividad del suelo y su potencial en la cual se obtuvo una resistividad de medio agresivo.

Para los cálculos del sistema de protección se emplearon las formulas tecnológicas como parámetros ya establecidos para dichos cálculos correspondientes, calculando así el área a proteger, corriente necesaria para el diseño tipos de ánodos y cantidad de lecho anódico y su tipo de fuente a utilizar finalizando con su costo económico que va a tener el sistema.

En la figura 23 se muestran las cantidades de barriles diarios en el tramo II que ha transportado desde el 2012 hasta el 2016, logrando obtener en el 2015 17,5 Mil barriles diarios, se obtuvieron estos datos del 2015 ya que no hubo bombeo por medio de Petroperú por presentar fallas en el oleoducto en el 2016.



**Figura 28:** Volumen transportado por el Oleoducto Nor Peruano

Fuente : Petroperú

Dónde: MBDC es Miles de **B**arriles **D**ía **C**alendario.

**Tabla 27:** Transporte de crudo

| <b>Transporte de crudo</b> | <b>Barriles (Miles)</b> |
|----------------------------|-------------------------|
| Por día                    | 17.5                    |
| Por mes                    | 525                     |
| Por año                    | 6 300                   |

Fuente: Petroperú

**Tabla 28:** Costo estimado de bombeo año 2015

| <b>Transporte de crudo (costo)</b> | <b>Costo US\$</b> |
|------------------------------------|-------------------|
| Tarifa de transporte (Barril)      | 6.51              |
| Bombeo diario                      | 113,925.00        |
| Bombeo anual                       | 4 101,300.00      |

Fuente: Petroperú

La tarifa para transportar al crudo estima el \$6.51(Barril), la cual demostraría una pérdida de \$113,925.00 diarios si el oleoducto presentaría una falla por corrosión en el tramo II.Por otra parte se presentan también costos ambientales.

## VI.- CONCLUSIONES

1. Al conjugar todas las pruebas realizadas al suelo se obtuvo una resistividad de  $8752,497\Omega.Cm$  la cual nos muestra que el suelo para que cumpla el rol de electrolito es de un tipo ligeramente corrosivo. Para la instalación de este sistema se debe tomar consideraciones como las variables de profundidad y área en la ubicación de la cama anódica, ya que su alcance va a depender de ello de acuerdo a la norma NACE.
2. Se establece los cálculos del sistema de protección catódica por corriente impresa la cual va a disminuir la corrosión en el oleoducto nor peruano, esto permitirá realizar los cálculos de corriente requerida, área a proteger de la estructura, tipo de ánodo y sus características técnicas, fuente ratificadora la cual el sistema tendría una cama anódica de 21 ánodos de ferrosito ubicado a 400 metros del ducto en dirección perpendicular, teniendo así una estimación de vida de 20 años.
3. El sistema de protección catódica que se va realizar utilizara ánodos de de grafito por cumplir con el requerimiento de acuerdo a lo calculado, la cual obtendremos resultados favorables para el sistema.
4. El recubrimiento con la cual va hacer protegido el ánodo será el coque de petróleo calcinado debido a su bajo consumo anual. También se determinó por sus mejores parámetros de dispensar sus electrones hacia la estructura.
5. La instalación, mantenimiento y monitoreo del sistema de protección catódica por corriente impresa en el Km. 308 del ONP al largo plazo (20 años) resulta más económico que los costos de mantenimiento y monitoreo de la corrosión externa en el sistema de protección catódica galvánico, es decir, se obtiene un ahorro de 40%.
6. El sistema de protección catódica por corriente impresa tiene la ventaja de poder ser aplicada para grandes cantidades de estructura a proteger desde un solo cama anódica, siendo solamente la inversión de inicio como el único gasto elevado, pues con su mantenimiento adecuado y constante el sistema no mostrara ningún problema en su funcionamiento la cual será justificada su inversión.

## VII.- RECOMENDACIONES

1. Se deben realizar estudios de suelo más continuos para futuras instalaciones de protección por corriente impresa, esto ayudaría a maximizar el tiempo en dicho trabajos a realizar.
2. Los sistemas de protección catódica por corriente impresa deberían ser utilizados más frecuente en el oleoducto ya que estos sistemas ofrecen una amplia protección y garantizan la disminución de la estructura a proteger a largo plazo.
3. Se debe hacer inspecciones de recubrimiento a los kilómetros que sean necesarios con geografías afectadas por naturaleza para así tener una protección adecuada.
4. Se debe tener un plan de mantenimiento anual por lo menos cada tres meses revisar y monitorear el sistema a través de sus postes de toma de potencial.
5. Realizar un sistema de monitoreo interno de la tubería para obtener datos de pérdida de espesor con equipos especiales smart pigs o llamado raspa tubo por lo menos cada 3 años.
6. Se deben establecer métodos de capacitación y programas para el personal con respecto a corrosión y a la importancia que tiene una protección catódica por corriente impresa, la cual deben establecer métodos para determinar su realización de un sistema catódico.

## REFERENCIAS

Abarca García, Juan. Manual para el mantenimiento Industrial: Pinturas y revestimientos (4ta.ed.).San José, C.R.: EDITORAMA, 2003.

Alter, L. B., & Mestres, F. L. (2004). *Corrosión y protección* (Vol. 150). Univ. Politèc. de Catalunya

Ávila, Javier y Genesca Joan. Revista Mas Allá de la Herrumbre, Edición, 1996.  
Disponible en: [https://www.uv.mx/personal/rorozco/files/2011/02/Mas-  
alla-de-la-herrumbre-11.pdf](https://www.uv.mx/personal/rorozco/files/2011/02/Mas-alla-de-la-herrumbre-11.pdf)

Bendón, E., 2005, "Protección Catódica para el Control de Corrosión en Plataformas Marinas", Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico, EPN, Quito, Ecuador.

Biblioteca Digital Corrosión en suelos,2006).

Bilurbina Alter, Luis. Corrosión y protección. Barcelona: Universidad Politècnica de Catalunya, 2003.

Cardenas Reiban, Fausto Freddy. Evaluación del sistema de protección de corrosión del tramo del oleoducto transecuatoriano comprendido desde la estación de bombeo Baeza 4, hasta la estación de bombeo papallacta. Tesis (Título de ingeniero de petróleos) Quito: Universidad Tecnológica Equinoccial, Facultad de ciencias de la ingeniería, 2014.

Clavijo Cáceres, Carlo César: Sistemas de protección catódica para tuberías enterradas de transmisión de gas natural. Tesis (Título de Ingeniero metalúrgico) Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Metalúrgica: 2014

Casallas Salinas, Quilyam. La corrosión y el mantenimiento industrial.Revista Ingenio Libre. 2005. Disponible en:

<http://www.unilibre.edu.co/revistaingeniolibre/revista5/articulos/Conceptos-basicos-de-la-corrosion-2.pdf>

Chavarría, Meza Luis Eduardo. Corrosion Engineering & Catodic Protection. En línea 10 de 05 de 2017. <http://aiu.edu/publications/student/spanish/131-179/Corrosion-Engineering-Catodic-Protection.html>.

COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACION, Energía Solar Fotovoltaica, 2002. Madrid, España) <https://www.coit.es/>

Duran, Julio y Godfrin, Elena. Aprovechamiento de la energía solar en la Argentina y en el mundo. Boletín Energético 2004. Disponible en: <http://www.cnea.gov.ar/sites/default/files/duran.pdf>

Fabre, Juárez, Palma, Gálvez y Zapata (2013) Método de protección catódica para controlar la corrosión.

Fernández de Romero, Matilde. 2015. Curso de Corrosión y protección Catódica. Piura : s.n., 2015

Fernández, J. (2003) Título de la obra Electrochemical Engineerng. Recuperado de [https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=RdC9M\\_\\_eMEkC&oi=fnd&pg=PA1&dq=ley+de+la+electrolisis+libro&ots=yHX6oS0XJT&sig=ROPnQjmmDmWJXizs5cwlfcJS\\_M&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=RdC9M__eMEkC&oi=fnd&pg=PA1&dq=ley+de+la+electrolisis+libro&ots=yHX6oS0XJT&sig=ROPnQjmmDmWJXizs5cwlfcJS_M&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Faz Cano, Á., Martínez Pagán, P., & Rosales Aranda, R. M. (2012). Método para detectar y evaluar suelos contaminados por hidrocarburos en estaciones de servicio y unidades de suministro fuera de servicio. Disponible en: URI: <http://hdl.handle.net/10317/5487> CIP: G01V3/02.

García Márquez, Rogelio (1990) Título del libro La puesta a tierra de instalaciones eléctricas. Disponible en:

<https://books.google.com.pe/books?isbn=8426707998>

Hidalgo, Manuel (s.f.). Protección catódica. Caracas: Universidad Simón Bolívar. Disponible [http://ingenieros.es/files/proyectos/Proteccion\\_Catodica.pdf](http://ingenieros.es/files/proyectos/Proteccion_Catodica.pdf)

Liberato Lopez, Guido. "Diseño del sistema de protección catódica por corriente impresa para un ducto submarino". Tesis (Título de Ingeniero Mecánico Electricista" Universidad Nacional Tecnológica del cono sur de Lima. 2014

MANUAL DE MANTENIMIENTO Y REPARACION DE LOS OLEODUCTOS DE OPERACIONES TALARA – PETROPERÚ (2012). [http://www.academia.edu/8875779/MANUAL\\_DE\\_MANTENIMIENTO\\_Y\\_REPARACION\\_DE\\_LOS\\_OLEODUCTOS\\_DE\\_OPERACIONES\\_TALARA\\_2012\\_Unidad\\_Ingenier%ADa\\_de\\_Mantenimiento](http://www.academia.edu/8875779/MANUAL_DE_MANTENIMIENTO_Y_REPARACION_DE_LOS_OLEODUCTOS_DE_OPERACIONES_TALARA_2012_Unidad_Ingenier%ADa_de_Mantenimiento)

Machado Siqueira, G. (2009). Medida de la conductividad eléctrica aparente del suelo por inducción electromagnética y variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo. Univ Santiago de Compostela. Disponible:

[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=oAbR9\\_kHGnsC&oi=fnd&pg=PR1&dq=teorias+cientificas+sobre+suelos+y+su+resistividad&ots=x4MAW3UVaQ&sig=uHI4CaBCX6Td2NYlu9WD3FkSjic#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=oAbR9_kHGnsC&oi=fnd&pg=PR1&dq=teorias+cientificas+sobre+suelos+y+su+resistividad&ots=x4MAW3UVaQ&sig=uHI4CaBCX6Td2NYlu9WD3FkSjic#v=onepage&q&f=false)

Maldonado López, Fernando (Dir.). Cálculo de protección catódica Fara gauss. México: Fara gauss System, 2007. Recuperado el 24 de mayo de 2014.

Disponible:

<http://www.iscontrol.eom.mx/sites/defilultfiles/pdf7PROTECCIONo/o20CATODICA.pdf>

Morcillo, Manuel y Feliu, S. “Revista Iberoamericana de Corrosión y Protección” 1976.

Nace International. 2000. CP 1–Catholic Protection Course Manual January 2010, Buenos Aires - Argentina: sin. 2000.

[http://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro\\_documental/Institucional/Bolet%C3%ADn%20Institucional/Osinergmin%20supervisa%20derrame%20en%20ONP%2026%2009F.pdf](http://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Bolet%C3%ADn%20Institucional/Osinergmin%20supervisa%20derrame%20en%20ONP%2026%2009F.pdf)

Pacheco Alejandro, Erick Patricio. Diseño del sistema de protección catódica por corrientes impresas para el ducto de GLP desde la estación de bombeo FLOPEC hasta la estación de almacenamiento Monteverde. Tesis (Título de ingeniero en petróleo) La Libertad:

Pauli, W., Enz, C. P., von Meyenn, K., García, M., & Hernández, R. (1996). Escritos sobre física y filosofías. Debate. Universidad Estatal Península de Santa Elena, Facultad de Ingeniería en petróleo. 2012. Disponible en: [http://www.arteuna.com/laboratorio/1-Wolfgang\\_Pauli.pdf](http://www.arteuna.com/laboratorio/1-Wolfgang_Pauli.pdf)

Pierre R. Roberge “Handbook of Corrosion Engineering, McGraw-Hill, First Edition, 2000, Cap #11, US

Roberge, Pierre R. 2000. Handbook of Corrosion Engineering. s.l. : McGraw-Hill., 2000.

Rosario Francia, Samuel. Protección Catódica – diseño de ánodos de sacrificio. Revista del Instituto de Investigación. Vol.7 2004. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/326533338/PROTECCION-CATODICA-DISENO-DE-ANODOS-DE-SACRIFICIO-pdf>

Royuela, J., 1991, “Corrosión de Estructuras Enterradas”, primera edición, Quito, Ecuador, p., 155-156.

Sherwood, L. (1994). Sacrificial Anodes. En L. L. Sheir, R. A. Jarman, & G. T. Burstein (Edits.), "Corrosion", Vol. 2, Corrosion control (3rd ed., págs. 10:29 - 10:55). Oxford, England: Butterwood - Heinemann.

Trethewey, K. R., & Chamberlain, J. (1995). Corrosion for Students of Science and Engineering (2nd ed.). Singapore: Ed. Longman Singapore Publisher.  
Disponible: WESTERNFILTERCO (2005)  
[http://www.westernfilterco.com/pigging\\_seminars.html](http://www.westernfilterco.com/pigging_seminars.html) - 27k

Yasksetig Castillo, Jorge. Análisis de la integridad mecánica de un tramo de oleoducto afectado por un fenómeno geodinámica. Tesis (Título de Master en Ingeniería Mecánica Eléctrica) Piura: Universidad de Piura, Facultad de ingeniería en mecánica y ciencias de la producción. 2011.

Anexos

MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

| Variables Independientes                             | Definición Conceptual   | Definición Operacional  | Dimensiones  | Instrumentos        | Escala de Medición |
|--|---|---|--|---------------------|--------------------|
| Sistema de protección catódica con corriente impresa | El sistema de la protección catódica para una tubería enterrada es con electrones suministrados a la red mediante el uso de una fuente de corriente continua y un ánodo auxiliar. <b>(Robore, 2000)</b> . | Este sistema de protección catódica se efectúa cuando un metal es forzado a ser el cátodo de la celda corrosiva adhiriéndole de un metal que se corroe, La cual nos permitirá disminuir la corrosión de toda estructura ferrosas como tuberías y tanques. | Polarización Catódica.<br><br>Corriente continua       | Guía de observación | Nominal            |
| Corrosión en oleoducto Nor peruano kilómetro 308     | La corrosión es definida como el deterioro de un material (usualmente un metal) o de sus propiedades debido a una reacción con su medio ambiente.   | Disminuir la velocidad de la corrosión, nos permitirá alargar la vida útil de la tubería que es importante tanto para la empresa como para el medio ambiente.   | Tiempo de exposición.<br><br>Volumen de óxido ferroso. | Guía de observación | Nominal            |

## Resultados del equipo SMART PIG GEOMETRICO(Raspatubos)

| CANAL DE FLOTACION / 80%          |                 |                                    |                      |                        |  |                            |         |        | DEL Km 201095.472 AL Km 201177.822 = 82.350 metros |             |                      |           |             |            |        |              |              |                |                                 |                    |
|-----------------------------------|-----------------|------------------------------------|----------------------|------------------------|--|----------------------------|---------|--------|--|-------------|----------------------|-----------|-------------|------------|--------|--------------|--------------|----------------|---------------------------------|--------------------|
| IZAJE DE TUBERÍA FUERA DEL AGUA:  |                 |                                    |                      |                        |  |                            |         |        | 18 UNDS  |             |                      |           |             |            |        |              |              |                |                                 |                    |
| ESTIMACIÓN DE NÚMERO DE PÓRTICOS: |                 |                                    |                      |                        |  |                            |         |        |  |             |                      |           |             |            |        |              |              |                |                                 |                    |
| Distancia Abs., m.                | Número de Junta | Distancia a JT Río arriba/abajo, m | Longitud de Junta, m | Tipo de Particularidad | Abolladura/aflicción de Particularidad | Clasificación de Dimensión | O'clock | EP, mm | Longitud Axial, mm                                 | Anchura, mm | Profundidad % EP (D) | Ubicación | Nota        | Esta       | Altura | Nota (Prior) | Esta (Prior) | Altura (Prior) | Long Real para definir camiseta | Tamaño de Camiseta |
| 201072.137                        | 170840          |                                    | 11.8                 | Junta soldadura        | de soldadura longitudinal              |                            | 03:14   | 6.4    |  |             |                      |           | 9460975.072 | 322542.104 | 124.4  | 9460976.278  | 322542.425   | 124.4          |                                 |                    |
| 201072.142                        | 170840          | 0.095                              | 11.8                 | Pérdida de metal       | Corrosión                              | nura circunferenc          | 11:40   | 6.4    | 25   | 434         | 41                   | Externo   | 9460975.072 | 322542.209 | 124.4  |              |              |                | 0                               | 0.5                |
| 201083.045                        | 170850          |                                    | 11.5                 | Junta soldadura        | de soldadura longitudinal              |                            | 04:10   | 6.4    |  |             |                      |           | 9460976.017 | 322530.354 | 124.4  | 9460977.196  | 322530.923   | 124.4          |                                 |                    |
| 201095.472                        | 170860          |                                    | 12.1                 | Junta soldadura        | de soldadura longitudinal              |                            | 01:24   | 6.4    |  |             |                      |           | 9460976.975 | 322518.882 | 124.4  | 9460978.126  | 322518.746   | 124.4          |                                 |                    |
| 201107.543                        | 170860          | 12.071                             | 12.1                 | Pérdida de metal       | Corrosión                              | General                    | 11:18   | 6.4    | 46   | 987         | 49                   | Externo   | 9460978.029 | 322506.877 | 124.4  |              |              |                |                                 |                    |
| 201107.565                        | 170870          |                                    | 11.2                 | Junta soldadura        | de soldadura longitudinal              |                            | 11:24   | 6.4    |  |             |                      |           | 9460978.041 | 322506.855 | 124.4  | 9460979.182  | 322507.880   | 124.4          | 0.061                           | 0.5                |
| 201107.604                        | 170870          | 0.029                              | 11.2                 | Pérdida de metal       | Corrosión                              | nura circunferenc          | 09:54   | 6.4    | 11   | 95          | 52                   | Externo   | 9460978.045 | 322506.816 | 124.4  |              |              |                |                                 |                    |
| 201116.099                        | 170870          | 8.534                              | 11.2                 | Pérdida de metal       | Corrosión                              | nura circunferenc          | 08:30   | 6.4    | 18   | 44          | 80                   | Externo   | 9460978.059 | 322498.202 | 124.4  |              |              |                | 0.000                           | 0.5                |
| 201118.718                        | 170880          |                                    | 11.8                 | Junta soldadura        | de soldadura longitudinal              |                            | 06:54   | 6.4    |  |             |                      |           | 9460979.110 | 322488.782 | 124.4  | 9460980.270  | 322486.436   | 124.4          |                                 |                    |
| 201130.291                        | 170880          | 11.573                             | 11.6                 | Pérdida de metal       | Corrosión                              | General                    | 11:30   | 6.4    | 40   | 987         | 44                   | Externo   | 9460980.251 | 322484.286 | 124.4  |              |              |                | 0                               | 0.5                |
| 201130.335                        | 170890          |                                    | 12.0                 | Junta soldadura        | de soldadura longitudinal              |                            | 08:24   | 6.4    |  |             |                      |           | 9460980.285 | 322484.243 | 124.4  | 9460981.444  | 322484.595   | 124.4          |                                 |                    |
| 201141.358                        | 170890          | 11.023                             | 12.0                 | Pérdida de metal       | Corrosión                              | nura circunferenc          | 02:34   | 6.4    | 12   | 37          | 48                   | Externo   | 9460982.420 | 322473.456 | 124.4  |              |              |                |                                 |                    |
| 201141.401                        | 170890          | 11.066                             | 12.0                 | Pérdida de metal       | Corrosión                              | nura circunferenc          | 02:40   | 6.4    | 13   | 52          | 95                   | Externo   | 9460982.425 | 322473.414 | 124.4  |              |              |                | 0.915                           | 1.5                |
| 201141.945                        | 170890          | 11.610                             | 12.0                 | Pérdida de metal       | Corrosión                              | hazo, defecto por          | 10:12   | 6.4    | 21   | 29          | 48                   | Externo   | 9460982.535 | 322472.882 | 124.4  |              |              |                |                                 |                    |
| 201142.273                        | 170890          | 11.938                             | 12.0                 | Pérdida de metal       | Corrosión                              | General                    | 11:32   | 6.4    | 43   | 1090        | 58                   | Externo   | 9460982.600 | 322472.561 | 124.4  |              |              |                |                                 |                    |
| 201142.300                        | 170900          |                                    | 11.5                 | Junta soldadura        | de soldadura longitudinal              |                            | 03:36   | 6.4    |  |             |                      |           | 9460982.895 | 322472.324 | 124.4  | 9460982.547  | 322473.181   | 124.4          |                                 |                    |
| 201153.815                        | 170900          | 11.515                             | 11.5                 | Pérdida de metal       | Corrosión                              | General                    | 00:12   | 6.4    | 45   | 1075        | 47                   | Externo   | 9460983.626 | 322461.873 | 124.4  |              |              |                |                                 |                    |
| 201153.948                        | 170910          |                                    | 12.0                 | Junta soldadura        | de soldadura longitudinal              |                            | 05:52   | 6.4    |  |             |                      |           | 9460983.629 | 322461.840 | 124.4  | 9460983.620  | 322461.155   | 124.4          | 0.058                           | 0.5                |

## GABINETE DE METAL



## ANODO DE GRAFITO



3" DE DIÁMETRO POR 60" DE LONGITUD  
\$211 USD

## Guías de Observación

### Guía de Observación N° 01 Instrumentos de Medición - Teluometro

| <b>TUBERIA<br/>(Km)</b>                     | <b>DISTANCIA<br/>(metros)</b> | <b>RANGO<br/>(Adimensional)</b> | <b>LECTURA</b> | <b>RESISTIVIDAD<br/>PROMEDIO<br/>(Ohm xcm<sup>2</sup>)</b> |
|---|-------------------------------|---------------------------------|----------------|--|
| <b>PRIMERA<br/>MEDICION -Km<br/>308+750</b> | 1.00                          | 0,1                             | 2,0            | 10,300.50  |
|   | 1.00                          |                                 |                |  |
|   | 1.00                          |                                 |                |  |
| <b>SEGUNDA EDICION<br/>-Km 310+750</b>      | 1.00                          | 0,1                             | 1,8            | 12,400.30  |
|   | 1.00                          |                                 |                |  |
|   | 1.00                          |                                 |                |  |
| <b>TERCERA<br/>MEDICIÓN-Km<br/>312+750</b>  | 1.00                          | 0,1                             | 1,5            | 11,400.20  |
|   | 1.00                          |                                 |                |  |
|   | 1.00                          |                                 |                |  |
| <b>CUARTA<br/>MEDICION -Km<br/>316+750</b>  | 1.00                          | 0,1                             | 1,5            | 12,500.60  |
|   | 1.00                          |                                 |                |  |
| <b>QUINTAMEDICION-<br/>Km 322+750</b>       | 1.00                          | 0,1                             | 1,8            | 13,700.10  |
|   | 1.00                          |                                 |                |  |
| <b>SEXTA MEDICION -<br/>Km 326+230</b>      | 1.00                          | 0,1                             | 2,0            | 12,500.50  |
|   | 1.00                          |                                 |                |  |
| <b>SETIMA MEDICION<br/>-Km 326+500</b>      | 1.00                          | 0,1                             | 1,5            | 12,000.20  |
|   | 1.00                          |                                 |                |  |
|   | 1.00                          |                                 |                |  |

## Guía de Observación N° 02

Indicador: Medición de temperatura y humedad

| TESIS: <b>Diseño de un Sistema de Protección Catódica para disminuir la corrosión en tubería de Oleoducto en la Zona Norte del Perú</b>   |                           |                              |
|---|---------------------------|------------------------------|
| GUIA DE OBSERVACION DE PROTECCION CATODICA  |                           |                              |
| Instrucciones:<br>Realizar las mediciones cuando no existan precipitaciones<br>El número de mediciones realizarlas 2 veces en cada hora y obtener el dato que se asemeja más a lo real. |                           |                              |
| Día de observación  | 1°                        | 2°                           |
| Lugar   | Amazonas Km308-zaramirisa | Amazonas puente nieva Km 320 |
| Temperatura del ambiente °C   | 32°,33°,32°,29°,33°       | 30°28°,32°,28°,32°           |
| Humedad relativa  | 75%                       | 75%                          |
| Altitud   | 420(msnm)                 | 410(msnm)                    |

**“Diseño de un Sistema de Protección Catódica para disminuir la corrosión en tubería de Oleoducto en la Zona Norte del Perú”.**

AUTOR: Santos Chero José Luis

### **Declaratoria de Autenticidad del Asesor**

Yo, JAMES SKINNER CELADA PADILLA, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO - CHICLAYO, asesor de la Tesis titulada: "Diseño de un Sistema de Protección Catódica para disminuir la corrosión en tubería de Oleoducto en la Zona Norte del Perú", cuyo autor es Santos Chero José Luis, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 28%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

CHICLAYO, 1 de Junio del 2024



Nombres y Apellidos: James Skinner Celada Padilla

DNI: 16782335

ORCID: 0000-0003-1389-4093