

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**“DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR
CORRIENTE IMPRESA EN TUBERÍAS ENTERRADAS PARA
LA PLANTA DE ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS
TERMINAL CHIMBOTE DE PETROPERÚ”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRICISTA**

AUTORES:

**GONZALES BOZA MARCOS ANTONIO
CRUZ CASTRO JUAN FERNANDO**

ASESOR:

ING. PEDRO ANTONIO SANCHEZ HUAPAYA

**Callao, setiembre 2017
PERÚ**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



“DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE
IMPRESA EN TUBERÍAS ENTERRADAS PARA LA PLANTA DE
ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS TERMINAL CHIMBOTE DE
PETROPERÚ”

PRESENTADO POR LOS BACHILLERES:

MARCOS ANTONIO GONZALES BOZA

JULIO FERNANDO CRUZ CASTRO

CALIFICACIÓN:

(15) QUINCE

Dr. Ing. Juan H. Grados G.

Presidente de Jurado

Mg. Ing. César A. Santos H.

Secretario de Jurado

Ing. Jesús Vara Sánchez

Vocal de Jurado

CALLAO, PERU 2017

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por llenarnos de bendiciones y permitirnos llegar al momento en que terminamos una etapa importante en nuestras vidas.

A nuestros padres y familiares más cercanos, que han hecho posible esto, gracias a su apoyo nos hemos mantenido firmes en nuestro propósito de estudiar a pesar de todos los inconvenientes que se han presentado, dándonos siempre ejemplo de esfuerzo, amor, dedicación y sacrificio.

A las personas que contribuyeron para la realización de este proyecto, ya que su aporte fue nuestra mejor guía para culminar con éxito este trabajo, al Ing. Pedro Sánchez Huapaya por su constante asesoramiento en el desarrollo de la tesis y por sus valiosos aportes.

Quedamos muy agradecidos a UNAC por habernos forjado en la carrera de Ingeniería Eléctrica.

INDICE

RESUMEN	8
ABSTRACT	9
I.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.1 Determinación del problema.....	10
1.2 Formulación del problema	11
1.2.1 Problema General	11
1.2.2 Problema Específico.....	11
1.3 Objetivos de la investigación	12
1.3.1 Objetivo General.....	12
1.3.2 Objetivo Específico	12
1.4 Justificación económica.....	12
II.- MARCO TEÓRICO	14
2.1 Antecedentes de estudio	14
2.2 Definiciones de términos	14
2.3 Marco Conceptual	16
2.3.1 Definición de Corrosión.....	16
2.3.2 Corrosión de Tuberías Enterradas.....	17
2.3.3 Reacciones de corrosión en contacto con el suelo	17
2.3.4 Corrosión en suelos	18

2.3.5	Causa de corrosión en estructuras enterradas	20
2.3.6	Agresividad del suelo en función de su resistividad, pH y potencial redox	21
2.3.7	Método para determinar la resistividad del suelo.....	26
2.3.8	Sistemas de protección catódica por corriente impresa.....	27
2.3.9	Coque calcinado de petróleo	30
2.3.10	Coque metalúrgico.....	32
2.3.11	Tipo de ánodos para corriente impresa	34
2.4	Criterios para la protección catódica	39
2.5	Diseño del sistema de protección catódica	41
2.5.1	Respecto a la estructura a proteger	41
2.5.2	Respecto al medio.....	42
2.6	Cálculo del sistema de protección catódica.....	43
2.6.1	Área a proteger (A.P.).....	43
2.6.2	Corriente de protección (I.P.).....	43
2.6.3	Peso de ánodos requeridos (Pt)	44
2.6.4	Número de ánodos requeridos (Na).....	44
2.6.5	Resistencia total (Rt).....	45
2.6.6	Resistencia del lecho de ánodos verticales (Rv).....	46
2.6.7	Resistencia de los cables (Rc).....	46
2.6.8	Resistencia del cátodo (Rca)	47
2.6.9	Voltaje mínimo para rectificador (Vrec).....	47

III.- VARIABLES E HIPÓTESIS	49
3.1 Variables de la investigación	49
3.1.1 Variable independiente	49
3.1.2 Variable dependiente	49
3.2 Operacionalización de variables	49
3.3 Hipótesis General e Hipótesis Específicas	51
3.3.1 Hipótesis General	51
3.3.2 Hipótesis Específicas	51
IV.- METODOLOGÍA	52
4.1 Tipo de investigación	52
4.2 Diseño de la investigación	52
4.3 Población y muestra	53
4.3.1 Población	53
4.3.2 Muestra	54
4.4 Parámetros básicos de la investigación	55
4.4.1 Diámetro y longitud de la tubería enterrada en lecho marino	55
4.4.2 Tipo de ánodo	56
4.4.3 Recubrimiento de Tubería Enterrada	59
4.5 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos	59
4.6 Análisis y procesamiento de datos	60
4.6.1 Material de la tubería enterrada	60

4.6.2	Densidad de Corriente del Material.....	62
4.6.3	Resistividad del suelo	63
V.-	RESULTADOS	68
5.1	Cálculo del Sistema de Protección Catódica.....	68
5.2	Cálculo de caída de tensión y capacidad de corriente	71
VI.-	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	74
VII.-	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	77
7.1	Electrodo Estacionario.....	77
7.2	Soldadura Exotérmica	77
7.3	Parches (Handycap).....	77
7.4	Cinta Autofundente.....	78
7.5	Cinta Eléctrica	78
7.6	Adhesivo Polyguard 601.....	79
7.7	Cinta Polyguard RD-6.....	79
7.8	Tubería de PVC.....	80
7.9	Tubería Conduit IMC	80
7.10	Curva – Conduit IMC	81
7.11	Conduit Flexible.....	82
7.12	Conector Hermético.....	82
7.13	Cinta de Seguridad.....	82

7.14 Hierro Corrugado.....	83
7.15 Concreto Pre-mezclado.....	83
7.16 Transformador – Rectificador.....	83
7.17 Cajas de pase pesada.....	86
7.18 Lámina Aislante.....	86
VIII.- CONCLUSIONES.....	87
IX.- RECOMENDACIONES.....	89
X.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
XI.- ANEXOS.....	93
11.1 Matriz de Consistencia.....	93
11.2 Típicos de instalación del SPC por Corriente Impresa.....	94
11.3 Plano de ubicación.....	100

INDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1	Método de Wenner	27
Fig. 2.2	Sistema de protección catódica por corriente impresa	29
Fig. 2.3	Sistema de protección catódica por corriente impresa	30
Fig. 4.1	Ubicación Terminal Chimbote.....	54
Fig. 4.2	Área de investigación.....	55
Fig. 4.3	Ánodo de ferrosilicio – cromo.....	58
Fig. 4.4	Tuberías con sistema IT3 – Terminal Chimbote	61
Fig. 4.5	Ubicación de sondeos.....	64
Fig. 4.6	Perfil del sondeo WB-03	65
Fig. 4.7	Perfil del sondeo WB-04	66
Fig. 7.1	Transformador Rectificador.....	84
Fig. 7.2	Dimensiones Transformador.....	85
Fig. 11.1	Típico Esquema Básico de Rectificador	94
Fig. 11.2	Típico Montaje Lecho Anódico Vertical.....	95
Fig. 11.3	Típico Conexión de Cables del SPC.....	96
Fig. 11.4	Típico Conexión de Cables del SPC.....	97
Fig. 11.5	Típico de Disposición de lecho de ánodos.....	98
Fig. 11.6	Típico Montaje de electrodo de referencia	99

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Resistividad del suelo vs. Grado de corrosidad	22
Tabla 2.2	Grado de agresividad del suelo en función del potencial redox.....	24
Tabla 2.3	Grado de agresividad – características fisicoquímicas	25
Tabla 2.4	Características fisicoquímicas de coque de petróleo	32
Tabla 2.5	Características fisicoquímicas de coque metalúrgico	32
Tabla 2.6	Propiedades del coque	33
Tabla 2.7	Características de los ánodos empleados	38
Tabla 3.1	Operacionalización de variables}.....	50
Tabla 4.1	Parámetro de la tubería	56
Tabla 4.2	Composición química.....	57
Tabla 4.3	Dimensiones y pesos.....	58
Tabla 4.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	60
Tabla 4.5	Parámetros de las tuberías.....	62
Tabla 4.6	Resistividad en terrenos	67
Tabla 5.1	Cálculos del SPC-I.....	68
Tabla 5.2	Cálculos del SPC-II.....	69
Tabla 5.3	Cálculos del SPC-III.....	70
Tabla 5.4	Cálculos de caída de tensión Lecho N° 1	71
Tabla 5.5	Cálculos de caída de tensión Lecho N° 2	72
Tabla 5.6	Cálculos de caída de tensión Lecho N° 3	73
Tabla 6.1	Resultados con 3 ánodos	75

RESUMEN

Actualmente un problema inminente en las plantas de almacenamiento de hidrocarburos es el daño ocasionado por la corrosión en los ductos metálicos que transportan crudo, si la corrosión no es considerada en el diseño inicial de un sistema, puede causar frecuentes paros no programados y la necesidad de mantenimiento excesivo, reparaciones y reemplazo de piezas o partes dañadas para mantener el sistema en operación. El costo de estos factores comúnmente excede el costo de evitar la corrosión durante la etapa de diseño.

Como respuesta a una medida de prevención y evitar la aceleración del proceso de corrosión, se han desarrollado tecnologías diversas y entre las cuales se encuentran los sistemas con aplicación de corriente directa sobre la estructura metálica a proteger o la unión de esta mediante un ánodo de sacrificio, estos sistemas son conocidos como protección catódica.

En el presente documento se describen las bases y criterios de diseño utilizados para realizar el diseño del sistema de protección catódica (SPC) en los ductos existentes de recepción de productos negros y blancos del Terminal Chimbote de Petroperú, el alcance del SPC va desde los ductos enterrados en la playa fuera del muro perimétrico del terminal hasta el sumergimiento del ducto en el lecho marino.

ABSTRACT

Currently, an imminent problem in hydrocarbon storage plants is the damage caused by corrosion in metal pipelines transporting crude, if corrosion is not considered in the initial design of a system, can cause frequent unscheduled shutdowns and the need for Excessive maintenance, repairs and replacement of damaged parts or parts to keep the system in operation. The cost of these factors commonly exceeds the cost of avoiding corrosion during the design stage.

In response to a preventive measure and to avoid the acceleration of the corrosion process, diverse technologies have been developed and between which are the systems with application of direct current on the metallic structure to be protected or the union of this one by means of a sacrificial anode , These systems are known as cathodic protection.

This document describes the bases and design criteria used to design the cathodic protection system (SPC) in the existing pipelines for the reception of black and white products of the Petroperú Chimbote Terminal, the scope of the SPC goes from the pipelines Buried in the beach outside the perimetric wall of the terminal until the submersion of the duct in the seabed.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Determinación del Problema.

El Terminal Chimbote, actualmente operado por Terminales del Perú (TP) y propiedad de Petróleos del Perú (Petroperú), se dedica a la recepción, almacenamiento y despacho de hidrocarburos, tales como: Diésel B5, Diésel B5 S50, Gasolina 90, Producto Industrial 500, Residual 6 y Alcohol Carburante.

La planta de almacenamiento de hidrocarburos Terminal Chimbote de Petroperú se encuentra ubicado en la Av. Brea y Pariñas S/N, Zona Industrial. Gran Trapecio, 431 Km al noroeste de la ciudad de Lima en la faja costera a 65 metros de la línea de mar, en las cercanías del Puerto de Chimbote, provincia del Santa, perteneciente al departamento de Ancash, al norte del Perú. Actualmente se encuentra en construcción la nueva sub estación eléctrica, con lo cual se busca aprovechar la alimentación eléctrica para el sistema de protección catódica en las líneas de recepción que abarcan desde los ductos enterrados fuera del muro perimétrico hasta el sumergimiento de los ductos en el lecho marino.

Estos ductos son encargados de recepcionar productos blancos y negros, que los buques conllevan, pero debido a la corrosión del ambiente, las tuberías metálicas sufren riesgo de degradamiento

en el material, y ruptura por lo que puede provocar derrame del crudo, contaminando la playa y generando pérdidas económicas.

1.2 Formulación del Problema.

1.2.1 Problema General

¿Es factible diseñar un sistema de protección catódica por corriente impresa capaz de proteger de la corrosión a las tuberías enterradas de recepción, desde los ductos enterrados en la playa fuera del muro perimétrico del terminal hasta el sumergimiento del ducto en el lecho marino en la planta de almacenamiento de hidrocarburos Terminal Chimbote de Petroperú?

1.2.2 Problema Específico

- ¿Es factible el diseño y la selección de la cama de ánodos y conductores para el sistema de protección catódica por corriente impresa?
- ¿Es factible la selección del rectificador y la determinación de la acometida eléctrica para el sistema de protección catódica por corriente impresa?
- ¿Cuál será el impacto del nuevo sistema de protección catódica por corriente impresa con respecto a la operatividad actual?

1.3 Objetivos de la investigación.

1.3.1 Objetivo General

Seleccionar y diseñar el sistema de protección catódica por corriente impresa para las líneas de recepción de productos blancos y negros de la planta de almacenamiento de hidrocarburos

- Terminal Chimbote de Petroperú.

1.3.2 Objetivo Específicos

- Diseñar y seleccionar la cama de ánodos y conductores para el sistema de protección catódica por corriente impresa.
- Seleccionar el rectificador y la determinación de la acometida eléctrica para el sistema de protección catódica por corriente impresa.
- Determinar el impacto del nuevo sistema de protección catódica por corriente impresa con respecto a la operatividad actual.

1.4 Justificación Económica.

En el Terminal Chimbote de Petroperú, las líneas de recepción de productos blancos y negros, tienen unos diámetros de 12 y 16 pulgadas respectivamente; estas líneas poseen la tecnología IT3, la cual lleva en su interior una tubería hecha por fibra de vidrio con revestimiento de concreto y con protección externa de acero al carbono. Estas líneas se encuentran enterradas en suelos

clasificados entre poco y muy corrosivo por su resistividades de 14.000 a 588.000 ohm-cm; por lo que perjudica la vida útil del tendido de tuberías enterradas desde el manifold de recepción hasta la brida de aislamiento en el amarradero multiboya, por ello se exige como medida de prevención la instalación de un sistema de protección catódica por corriente impresa, en el cual se evaluará y analizará las condiciones actuales del sistema de ductos enterrados, recolectando información referente a la caracterización y antecedentes de la presencia de fallas de funcionamiento y por corrosión de dichas líneas, además de las especificaciones del suelo en las que se encuentra enterrada. A su vez, se definirá los parámetros a considerar en el diseño para que el sistema de protección catódica cumpla con las normas NACE y el Decreto Supremo N° 081-2007-EM.

Si no llevase un SPC, el tendido de líneas enterradas sería afectado por la corrosión del ambiente marino, la cual varía entre 13°C a 28°C, con una humedad relativa de 82%, estas condiciones ambientales provocaría la disminución de la vida útil de las tuberías repercutiendo en las inversiones de terminal, ya que a futuro la instalación de un SPC sería la forma más eficiente de no generar un impacto económico con respecto a otras ingenierías.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.

2.1 Antecedentes de estudio.

- Trabajo de graduación para obtener el título de ingeniero electricista, bajo el título de **“Protección Catódica y su aplicación en tanques de almacenamiento de productos petroleros en plantas Guatemaltecas”** presentado en el 2005 por el Bachiller René Oswaldo Girón Callejos asesorado por el Ing. Alfredo de Jesús Muralles Aché – Universidad de San Carlos de Guatemala de la facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
- Tesis de grado para obtener el título de ingeniero mecánico electricista, titulado **“Diseño del sistema de protección catódica por ánodos profundos para un bosque de tanques de almacenamiento e combustibles”** presentado por el Bachiller William Luis Suque Cercado – Escuela superior Politécnica del Litoral de la facultad de Ingeniería Mecánica.

2.2 Definiciones de términos

- Anión. Ion cargado negativamente.
- Ánodo. Electrodo o parte del metal de una estructura en la cual se produce la reacción de oxidación o corrosión. Opuesto a cátodo.

- ASTM. (American Society for Testing and Materials).
Sociedad americana para pruebas y materiales.
- Cama de ánodos. Grupo o conjunto de ánodos de un sistema de protección catódica. También llamado lecho de ánodos.
- Corrosión. Se define como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno.
- Cátodo. Es un electrodo con carga negativa que sufre una reacción de reducción, mediante la cual un material reduce su estado de oxidación al recibir electrones.
- Coque. Relleno de ánodos para sistemas de protección catódica. Se elabora con coque de carbón molido y/o pulverizado o con coque de petróleo calcinado y molido. Aumenta la vida útil de los ánodos y mejora la salida de corriente.
- Electrolito. Medio conductor de la corriente como un suelo húmedo, agua, industrial, potable o de mar.
- Electrodo de referencia. Dispositivo de medición de potenciales. En suelos se utilizan los electrodos de referencia de cobre / sulfato y en agua de mar se prefieren los de plata / cloruro de plata.
- NACE. (National Association of Corrosion Engineers).
Asociación nacional de ingenieros en corrosión. Organismo

norteamericano vinculado a la corrosión y su prevención.

- Polarización. Cambio de voltaje de una estructura desde el potencial natural hasta el potencial de protección.
- Resistividad. Es la resistencia eléctrica de un volumen determinado de electrolito, sea suelo, agua o medio químico. Se emplea para determinar el nivel de corrosividad del medio. En suelos se mide generalmente con el método de Wenner o de las cuatro varillas.
- Wenner. Técnica de medición de la resistividad de suelos.

2.3 Marco Conceptual.

2.3.1 Definición de Corrosión

Se entiende por corrosión a la interacción entre un metal con el medio que lo rodea, dando origen a la deterioración en sus propiedades físicas y químicas. Las características fundamentales de este fenómeno solo ocurre en presencia de un electrolito, ocasionando regiones identificadas como anódicas y catódicas. En la zona anódica se da la reacción de oxidación en la cual los electrones son liberados dirigiéndose a otras regiones catódicas y por lo tanto en esta zona se producirá la corrosión del metal y en la zona anódica, será inmune.

2.3.2 Corrosión de Tuberías Enterradas

Uno de los medios donde se puede generar corrosión es el suelo, este es un electrolito que puede contener agua y sales al mismo tiempo, con resistencia específica que varía según el contenido de los mismos, aumentando o disminuyendo el grado de agresividad del terreno.

Existe una gran cantidad de estructuras metálicas, que por requerimientos de instalación deben ser enterradas y están en contacto con este tipo de electrolito, entre ellas las tuberías de transporte de crudo.

El suelo constituye un medio muy heterogéneo con respecto a su composición química, humedad, pH, resistividad eléctrica, etc. Todos estos factores pueden aumentar o disminuir la agresividad del suelo y ser muy o poco agresivo.

Cuando una tubería se encuentra enterrada, se pueden presentar las siguientes reacciones químicas debido a los mecanismos de corrosión electroquímica, siempre y cuando exista humedad que permita la existencia de una película condensada sobre la superficie de la tubería expuesta al medio.

2.3.3 Reacciones de corrosión en contacto con el suelo

Los suelos están conformados por una gran cantidad de micro poros rellenos de aire y/o humedad, estas pueden poseer desde partículas gruesas de arena con tamaños entre 0.07 y 2

milímetros, hasta partículas coloidales características de suelos arcillosos con tamaños menores a 0.07 milímetros. Los suelos arenosos se caracterizan por ser secos, aireados, con una resistividad alta y por lo tanto, poco agresivos, en cambio, los suelos arcillosos tienen una resistividad baja por el nivel de humedad que poseen, convirtiéndolos en suelos agresivos.

Por otro lado, es preciso señalar que generalmente cuando se realiza una zanja para situar allí la tubería, la zanja es rellena con otro tipo de material orgánico y así se alteran las condiciones y características del terreno.

La humedad del terreno, unido al contenido de sales, está íntimamente relacionado con su resistividad y su nivel de agresividad. Los suelos húmedos y conductores son más agresivos que los suelos secos y resistivos. De acuerdo a esto, es común clasificar a los suelos en cuanto a su agresividad en función la resistividad de los mismos, tal como se observa en la tabla N° 2.1.

2.3.4 Corrosión en suelos

El suelo por su contenido variable de humedad, sales y materia orgánica en descomposición, es el electrolito más complejo de todos los que se pueden encontrar.

Por necesidades mecánicas, económicas y de seguridad, la

industria tiene que apoyar sobre él y enterrar numerosas estructuras de materiales metálicos, las cuales se ven sometidas a un proceso de corrosión que en algunos casos puede ser complicado.

Para tener un buen control de la corrosión de estas estructuras, se han de combinar los dos tipos de protección a nuestro alcance: un buen recubrimiento pasivo, complementado por un sistema de protección catódica adecuado. Confiar la protección anticorrosiva de una estructura enterrada solamente a la protección catódica, puede hacerse, pero será siempre antieconómico si la estructura no es de dimensiones pequeñas.

El suelo generalmente es un medio heterogéneo en donde se dan muchas variaciones en la velocidad de corrosión de los metales. Un suelo natural contiene los siguientes elementos: arena, arcilla, cal y humus. Estos componentes pueden estar mezclados en el suelo en diferentes proporciones, que darán lugar a distintos grados de agresividad.

Por lo general, los suelos arenosos, margo-arenosos, margo-calcáreos y calcáreos no son agresivos; los suelos arcillosos en algunas condiciones son agresivos. Los que son agresivos de por sí son las turbas, los humus libres de cal y también los suelos cenagosos y de aluvión. Los suelos artificiales, esto es, los formados por escorias y basuras, elementos en putrefacción y

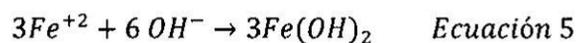
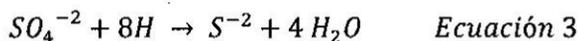
residuos humanos e industriales, también son agresivos.

2.3.5 Causa de corrosión en estructuras enterradas

Si el oxígeno atmosférico no puede penetrar en el suelo, es frecuente para el caso de suelos arcillosos o turbosos, que el hidrógeno producido a consecuencia de la reacción catódica en la estructura enterrada, puede llegar a ser eliminado (oxidado) por una acción microbiana. Este proceso es el resultado de la actividad metabólica de un microorganismo (la bacteria *Sporovibrio desulfuricans*) que se desarrolla en ausencia completa de oxígeno libre (condiciones anaerobias).

Para oxidar el hidrógeno de estos medios nutritivos orgánicos, esta bacteria no utiliza el oxígeno libre, sino el ion sulfato (SO_4^{-2}), reduciéndolo a sulfuro (S^{-2}).

Uno de los mecanismos más comúnmente aceptados para explicar lo anterior es el siguiente:

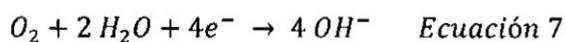


El resultado neto es que haya una corrosión continua y se denomina corrosión anaerobia, ésta se ve reflejada con el ennegrecimiento local del suelo por la formación del sulfuro de hierro y a veces el olor a ácido sulfhídrico.

Cuando las tuberías se encuentran enterradas se pueden dar reacciones anódicas y catódicas, donde la reacción anódica viene dada como siempre indicando la disolución del metal.



La reacción catódica viene dada en algunos casos por la reducción del oxígeno o reducción de protones en el caso de suelo ricos de materia orgánica con presencia de bacterias (suelos ácidos).



2.3.6 Agresividad del suelo en función de su resistividad, pH y potencial redox

La velocidad de corrosión está ligada a la resistividad del terreno de la forma que se señaló en la tabla N° 2.1.

TABLA N ° 2.1

RESISTIVIDAD DEL SUELO VS. GRADO DE CORROSIÓN

Resistividad del suelo (Ohm-cm)	Grado de Corrosividad
0 - 500	Muy Corrosivo
500 - 1,000	Corrosivo
1,000 - 2,000	Moderadamente Corrosivo
2,000 - 10,000	Medianamente Corrosivo
> 10,000	Despreciable

Fuente: Norma NACE Corrosión Basics.

La resistividad de un terreno depende de su estructura, de las dimensiones de sus partículas constituyentes, de su porosidad y permeabilidad, del contenido de agua (humedad) y de su contenido de iones.

Por ejemplo, en lo que se refiere a un suelo arcilloso, con un 5% de humedad, dicho suelo puede presentar una resistividad de 10000 ohm-cm, en cambio, con un 20% de humedad, la resistividad disminuye hasta 100 ohm-cm. Es obvio que la resistividad de un terreno y especialmente la de los estratos superiores, puede variar notablemente con las estaciones del año, la precipitación pluvial, la

actividad agrícola e industrial, etcétera.

En cambio, la temperatura no ejerce una influencia tan marcada, a menos que supere el punto de congelación, después de lo cual hay un aumento significativo de la resistividad.

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

Estas medidas permiten establecer las condiciones que favorecen la actividad microbiológica responsable de la corrosión anaerobia. El pH más favorable es entre 5.5 y 8.5 (neutro). En estas condiciones, la medida del potencial redox efectuada con un electrodo de platino, permite establecer si un terreno está predispuesto al crecimiento de bacterias sulfato-reductoras.

TABLA N ° 2.2
GRADO DE AGRESIVIDAD DEL SUELO EN FUNCION DEL
POTENCIAL REDOX

Valor del potencial redox en mV vs electrodo de hidrógeno	Grado de agresividad potencial (posibilidad de corrosión anaerobia)
< 100	Severa
100 – 200	Moderada
200 – 400	Escasa
> 400	Nula

Fuente: Norma NACE Corrosión Basics.

Basándose en los datos reportados en la tabla N° 2.2, es posible determinar la agresividad potencial de un suelo desde el punto de vista del crecimiento de bacterias sulfato-reductoras, lo cual permite establecer una clasificación de los suelos. Por ejemplo, un suelo cuyo contenido en sulfatos sea apreciable y su potencial redox esté alrededor de +200 mV está en condiciones favorables para que esta corrosión pueda tener efecto. Si en otro terreno se obtiene un valor del potencial redox de +400 mV, es posible excluir la posibilidad del crecimiento y desarrollo de bacterias anaerobias. Naturalmente existe la posibilidad de que se desarrollen otras familias de bacterias. Un grupo de bacterias aerobias particularmente dañinas son los tiobacilos (*Ferrobacillus ferrooxidans*), que son capaces de oxidar el azufre y los sulfuros para convertirlos en ácido sulfúrico.

TABLA N ° 2.3
GRADO DE AGRESIVIDAD – CARACTERISTICAS
FISICOQUIMICAS

Tipo	Peso específico	Consumo.
Resistividad	> 12000	0
	12000 - 5000	-1
	5000 - 2000	-2
	< 2000	-4
Potencial redox (mV vs enh)	> +400	2
	400 - 200	0
	200 - 0	-2
	< 0	-4
pH	> 5	0
	< 5	-1
Cloruros (mg/kg)	< 100	0
	100 - 1000	-1
	> 100	-4
	200 - 300	-1
	> 300	-2
Sulfuros (mg/kg)	0	0
	0 - 0,5	-2
	> 0,5	-4
Características del suelo	Valores (suma)	
No agresivo	0	
Débilmente agresivo	-1 a -8	
Medianamente agresivo	-8 a -10	
Sumamente agresivo	< -10	

Fuente: Libro más allá de la herrumbre II – Javier Ávila / Joan García

En la tabla N° 2.3 se presentan unos índices que permiten determinar las características agresivas de un suelo, basándose en el contenido de aniones del mismo, cloruros, sulfatos y sulfuros, pH, potencial redox y resistividad.

Este tipo de información resulta de interés para predecir la agresividad de un suelo frente a, por ejemplo, una estructura metálica enterrada y con base en esto, evaluar la corrosión y la protección correspondiente.

2.3.7 Método para determinar la resistividad del suelo

El método Wenner consiste en enterrar 4 puntas de prueba (electrodos) equidistantemente y en línea recta sobre el suelo que va a ser estudiado. Estas puntas se conectan a través de unos cables a un instrumento de medición llamado medidor de resistencia de suelos, este introducirá corriente en el terreno a través de las barras externas y una diferencia de potencial a través de las puntas internas. Tal como se observa en la figura N° 01 Una vez cerrado el circuito, el instrumento medirá la resistencia del suelo al paso de corriente mediante la relación.

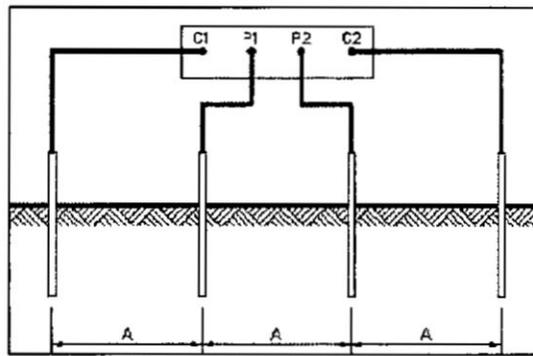
$$R = \frac{V}{I} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde R es la resistencia del suelo, V el voltaje de la corriente. Por otro lado, la resistividad del suelo (ρ) vendrá dada por la siguiente expresión:

$$\rho = 2\pi AR \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde A es la distancia de separación entre las barras, y R la resistencia del suelo.

FIGURA N° 2.1
METODO WENNER



Fuente: Página web – Catedra Ingeniería

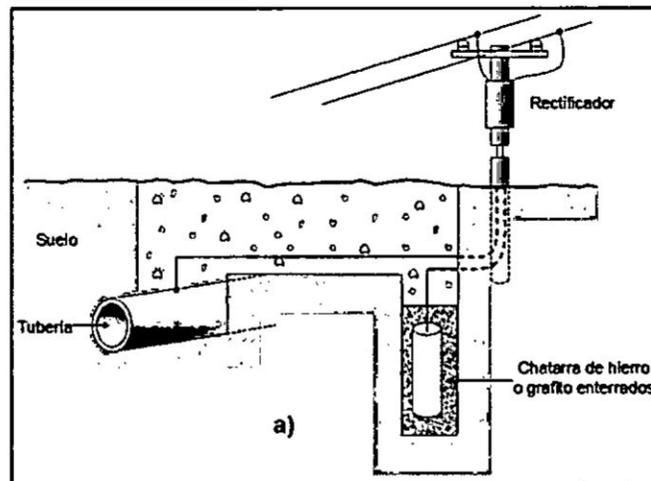
2.3.8 Sistemas de protección catódica por corriente impresa

Los sistemas de protección catódica por corriente impresa, utilizan como medio de alimentación una fuente externa de energía para su funcionamiento. Este tipo de sistemas son favorables bajo requerimientos de alta demanda de corriente.

Los usos más comunes del método de corriente impresa de protección catódica incluyen largas tuberías de transportan fluidos,

complejas estructuras enterradas, estructuras marinas, tanques de almacenamiento, etc. La figura N° 2.2 muestra un sistema de corriente impresa por ánodos convencionales para proteger una tubería, en el cual, los ánodos enterrados y tuberías están conectados al rectificador eléctrico que suministra corriente al ánodo y la tuberías enterradas del sistema. A diferencia de los ánodos de sacrificio, los ánodos de corriente impresa no necesitan ser naturalmente anódicos con respecto al acero, y de hecho rara vez lo son. La mayoría de los ánodos para corriente impresa están hechos de materiales de electrodo no consumible que son catódicos con respecto al acero. Si estos electrodos estuviesen conectados directamente al acero, estos actuarían como cátodos y podrían ocasionar la corrosión acelerada de la estructura a la que están destinados a proteger. La fuente de corriente directa invierte la polaridad natural y permite que los materiales seleccionados como ánodos de corriente impresa actúen como ánodos, y en vez de darse lugar la corrosión de estos, se da origen a alguna reacción de oxidación, como la de oxígeno o desprendimiento de cloro, evitando que el ánodo o los ánodos se consuman a altas velocidades.

FIGURA N° 2.2
SISTEMA DE PROTECCION CATODICA POR
CORRIENTE IMPRESA.

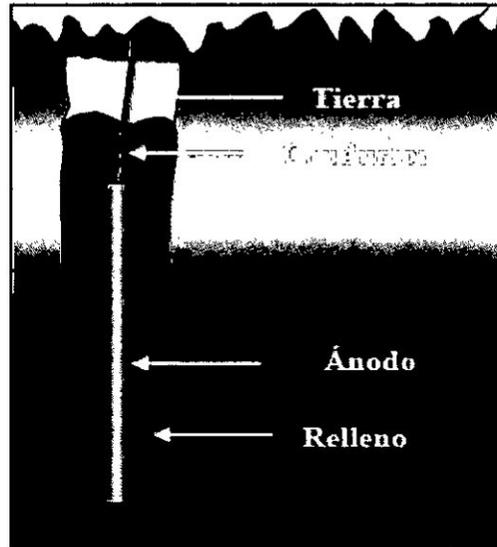


Fuente: Universidad Politécnica de Valencia - 2006

Los ánodos utilizados en un sistema de corriente impresa son usualmente construidos de un material relativamente inerte, con el fin de que tengan una muy baja velocidad de corrosión, comparados con las de los materiales de los ánodos galvánicos. En la figura N° 2.3 se ilustra la conformación de la cama anódica, la cual contiene los ánodos de corriente impresa y los rellenos con coque metalúrgico o coque calcinado de petróleo. La función del relleno sirve para tres propósitos:

- Reducir la resistencia eléctrica ánodo a tierra.
- Incrementar la capacidad de corriente de drenaje del ánodo, por extensión del área de la superficie de éste.
- Prolongar la duración de vida de los ánodos.

FIGURA N° 2.3
SISTEMA DE PROTECCION CATODICA POR
CORRIENTE IMPRESA



Fuente: Universidad Industrial de Santander Daniel
Tesis Rocha González, 2006

2.3.9 Coque calcinado de petróleo

Los coques de petróleo son producto del uso de residuos pesados de la destilación del crudo. Después del proceso inicial de craqueo de hidrocarburos, estos residuos son usados como alimentación para un proceso de coquización. Un ejemplo de obtención de este tipo de coques, es por medio de hornos fluidizados, donde la materia prima se deposita sobre la superficie de un lecho fluidizado en una vasija; éste tipo de reactor opera entre 480 y 565°C a presión atmosférica. El producto obtenido resulta denso, cuyas partículas que lo constituyen son esféricas y fluidas.

Los coques de petróleo en estado verde o pastoso, los cuales tiene altos contenidos de volátiles y no son buenos conductores eléctricos, no pueden ser usados como rellenos de carbón sin antes hacer un tratamiento térmico previo o calcinación. Dependiendo del tipo de tratamiento térmico los coques pueden ser tratados en calcinadores o vasijas de calentamiento, entre 500 y 1250°C, además la conductividad electrónica al igual que la densidad real, durante el tratamiento térmico se incrementa y por consiguiente hay pérdida de materia volátil.

El objetivo principal de un relleno de carbón en una cama anódica, es conducir electrónicamente la corriente descargada desde la superficie del ánodo a la interface del electrolito que rodea la cama, donde ocurren las reacciones electroquímicas propias del sistema, cuya finalidad deben tener menor impacto sobre el comportamiento del ánodo. La corriente que fluye del ánodo hacia el relleno, tiene dos posibles caminos de conducción, uno de tipo electrónico a través de las partículas de carbón y otro electrolítico o iónico a través del agua o la humedad contenida en el medio. Como la resistividad del relleno es baja comparada con la humedad contenida en el medio que circunda la cama anódica, la corriente tenderá a fluir a través de caminos electrónicos en la interface ánodo – relleno de carbón, el resultado es una reacción de degradación en la superficie del relleno, prevaleciendo la integridad del ánodo.

TABLA N ° 2.4
CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS
DE COQUE DE PETRÓLEO

Propiedades fisicoquímicas	
Volátiles	2.5 % máximo
Cenizas	1.0 % máximo
Carbono	97.0 % máximo
Azufre	0.7 % máximo
Resistividad eléctrica	26 Ω xcm
Humedad	0.20%

Fuente: Libro más allá de la
herrumbre II – Javier Ávila / Joan García

2.3.10 Coque metalúrgico

El coque metalúrgico puede ser de muchas calidades y granulometrías. Algunas de las siguientes características corresponden a material anódico de alta calidad.

TABLA N ° 2.5
CARACTERÍSTICAS FISICOQUIMICAS
DE COQUE METALURGICO

Propiedades fisicoquímicas	
Volátiles	1.5 % máximo
Cenizas	11.5 % máximo
Carbono	87.0 % máximo
Azufre	0.7 % máximo
Resistividad eléctrica	20 Ω xcm a 150 psi
Humedad	0.10%

Fuente: Libro más allá de la
herrumbre II – Javier Ávila / Joan García

Las ventajas de usar este relleno son:

- Reducir la resistencia de contacto entre el ánodo y el terreno.
- Hacer que el contorno del ánodo sea homogéneo y por lo tanto también la salida de corriente en su superficie.
- Disminuir el desgaste del ánodo debido a que la salida de corriente y su transmisión en el relleno tiene una parte electrónica (no iónica), con lo cual el desgaste del ánodo es menor cuanto mayor sea la calidad del relleno.

TABLA N ° 2.6
PROPIEDADES DEL COQUE

Químicas	Físicas
Humedad: constituye un inerte que reduce el contenido de carbono, y por lo tanto el poder calorífico del coque.	Solidez: resistencia que presenta el coque a sufrir fracturamiento y abrasividad, generadas por falta de cohesión debido a una fusión insuficiente.
Materia volátil: el contenido de materia volátil en el coque, se da por un rompimiento térmico incompleto, determinante para evaluar el grado de coquización.	Densidad: está relacionada con la densidad real de coque pulverizado, donde se elimina la influencia de la porosidad y la densidad aparente de trozos de coque.
Azufre: favorece la formación de subproductos en la superficie del coque que actúan como impurezas aislantes.	Color: lo define el tipo de sistema de apagado que tenga, tendrá un color gris claro o plateado si no ha estado en contacto con el agua.
Poder calorífico: depende de las impurezas presentes tales como las cenizas y de la humedad.	Sonido: si presenta un sonido metálico seco, corresponde a un buen coque; si el sonido es sordo y apagado su coquización no ha sido completa. Reactividad: se define como la velocidad de reacción del coque en presencia de un gas reactante como dióxido de carbono, oxígeno, hidrógeno o vapor de agua.

Fuente: Análisis del Consumo de Coque de Petróleo en Algunos Sectores

2.3.11 Tipo de ánodos para corriente impresa

Dado a que este proyecto se basa en el diseño y selección de un sistema de protección de tuberías por corriente impresa, se describirán a continuación los tipos de ánodos utilizados para tal fin. Una de las características principales de este tipo de ánodos es que estos deben poseer bajas tasas de consumo cuando son conectados a una fuente de energía para la protección catódica, entre estos se encuentran:

- **Ánodos de ferrosilicio**

Son usados para aplicaciones de protección catódica en tierra y en otros lugares donde la resistencia a la abrasión y otras consideraciones de daños mecánicos son importantes. Son recomendables en terrenos de media y baja resistividad. Se coloca hincado o tumbado en el suelo, y normalmente rodeado de un relleno de carbón de coque.

A intensidades bajas de corriente de 1 A, su vida útil es prácticamente ilimitada, y su capacidad máxima de salida de corriente es de unos 12 a 15 A por ánodo. Su consumo oscila a intensidades de corrientes altas, entre 0.1 a 0.3 kg/A-año.

Sus dimensiones más normales corresponden a 1500 mm de longitud, 75 mm de diámetro, y su peso aproximado es de 60 kg. El ferrosilicio es muy frágil en virtud de su estructura

cristalina, por lo que se ha de tener un extremo cuidado en su embalaje y transporte.

- **Ánodos de grafito**

El grafito puede utilizarse principalmente en terrenos de resistividad media, con un relleno de grafito o de carbón de coque. Este ánodo es frágil, por lo que su transporte y embalaje debe ser cuidadoso.

Su dimensiones longitud oscila entre 1 000 y 2 000 mm y su diámetro entre 60 y 100 mm. Son más ligeros de peso que los de ferrosilicio. La salida máxima de corriente que tienen estos ánodos es de 3 a 4 A por ánodo y su desgaste varía entre 0.5 y 1 kg/A-año.

- **Ánodos de titanio platinado**

El de titanio platinado es un ánodo especialmente indicado para instalaciones en agua de mar, aunque también es perfectamente utilizable en aguas dulces o incluso en suelos. Su principal característica es que con pequeños voltajes de hasta 12 V se pueden sacar intensidades elevadas de corriente, y además, su desgaste es apenas perceptible.

En el agua de mar tiene, sin embargo, algunas limitaciones con respecto a la tensión a la que se puede aplicar, la cual nunca

puede pasar de 12 V, ya que las tensiones más elevadas podrían ocasionar que se despegara la capa de óxido de titanio y que, por tanto, se deteriorara el ánodo.

En aguas dulces que no tengan cloruros estos ánodos pueden actuar a tensiones de 40-50 V. La salida máxima de corriente puede ser de 3 000 A/m², y su desgaste en las condiciones más adversas es de 0.01 g/A-año.

Su forma es diversa, pueden estar hechos en forma de una barra maciza, de tubo, chapa, alambre, etc. El platinado puede ser continuo o a intervalos, según las necesidades, y los espesores de platino pueden ser de 2.5 y 5 micras. La vida de los ánodos con 2.5 micras de espesor de platino se estima en 10 años aproximadamente y los de 5 micras duran entre 20 y 25 años.

- **Ánodos de tántalo platinado**

El ánodo de tántalo platinado es semejante al anterior, aunque tiene sobre aquél la ventaja de que en agua de mar puede trabajar a tensiones altas de 50 a 60 V; sin embargo, su adquisición es complicada y su precio es mucho más elevado. Dado que en agua de mar y a voltajes bajos se emplean grandes intensidades de corriente, el uso de este ánodo, en general, no se justifica del todo.

- **Ánodos de plomo-plata**

La aleación plomo plata está constituida por 1% de plata y una pequeña cantidad de antimonio. El peróxido de plomo que se forma al actuar anódicamente posee unas propiedades mucho más elevadas en virtud de los elementos de aleación que se traducen en un mejor funcionamiento y duración del electrodo.

Se utiliza más frecuentemente en agua de mar, en donde la corriente máxima de salida no pueda ser superior a 270 A/m².

Se desgasta entre 50 y 200 g/A-año.

- **Titanio-óxido de titanio y óxido de rutenio**

Estos ánodos, desarrollados en Estados Unidos en 1968, están constituidos por una combinación de óxidos de titanio y de rutenio, que se adhieren a un soporte de titanio, mientras se controla el proceso a alta temperatura (700° C), como resultado se obtiene una estructura cristalina y dura que presenta una superficie extremadamente rugosa, lo que aminora los problemas de resistencia y facilita el proceso electroquímico. Su máxima capacidad de corriente de 1100 A/m² lo coloca a la altura de los ánodos de titanio platinado, y su costo es, aproximadamente, 20% menor.

TABLA N ° 2.7.
CARACTERISTICAS DE LOS ANODOS EMPLEADOS

Tipo	Peso específico g/cm ³	Consumo kg/ A-año	Densidad de corriente		Utilización (medio)
			Máxima	Práctica	
			A/m ²		
Acero Chatarra	7.8	~9	5	1	Todos
	7.0	4.5-1			
Grafito	1.6	0.1-1	10-100	2.5-40	Terreno, agua de mar, excluido el fondo marino y agua dulce.
Ferrosilicio 0.95 % C 16 % Si 0.75 % Mn	~7	0.25-1	30-40	10-100	Agua dulce, terreno.
Fe-Cr-Si 0.95 % C 4.5 % Cr 0.75 % Mn 14.5 % Si	7	0.25-1	270		Terreno, agua de mar, excluido el fondo marino.
Pb-Ag 2 % Ag	11.3	~0.2	300	30-65	Solo agua de mar, excluido el fondo marino
Pb-Ag-Sb 1 % Ag 6 % Sb	11	~0.5	300	50-200	
Titanio platinado	4.5	8x10 ⁻⁶	400 por cada micra de platino de espesor	500-1000	Terreno no salino con backfill, agua de mar; excluido el fondo marino y el agua dulce.
Niobio platinado	8.4			500-700	
Tántalo platinado	16.6			500-1100	
Titanio-óxido de rutenio (DSA)	4.5	5x10 ⁻⁷	1100	700-1100	Todos

Fuente: Libro más allá de la herrumbre II – Javier Ávila / Joan García

2.4 Criterios para la protección catódica.

La Protección Catódica de un sistema de tuberías enterradas o sumergidas se alcanza cuando se cumple alguno de los Criterios de protección que se presentan en la Norma NACE RP0169-2002, Control de Corrosión Externa de Sistemas de Tuberías Metálicas Enterradas o sumergidas.

En la Norma se da una lista de Criterios de Protección Catódica, los cuales cuando se cumplen por separado o colectivamente indicarán que se ha alcanzado la protección catódica adecuada de una tubería en su electrolito. A continuación se presentan los criterios más usados hoy en día referidos a los valores de potenciales tubo a suelo alcanzados al recibir la corriente Protectora :

- Un voltaje negativo (catódico) de por lo menos 850 mV con la protección catódica aplicada. Este potencial se mide con respecto a un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre saturado en contacto con el electrolito. Se debe considerar caídas de voltaje distintas de aquellas a través de la interfaz estructura-a-electrolito para la interpretación válida de esta medición de voltaje.
- Un mínimo de polarización catódica de 100 mV entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia estable

en contacto con el electrolito. Se puede medir la formación o pérdida de polarización para satisfacer este criterio. La manera práctica de probar este criterio es interrumpir la corriente protectora, apagando y prendiendo la fuente de energía. Los potenciales activos (rectificador prendido) se llaman ON o Pon y aquellos inmediatamente después de interrumpir la corriente se llaman OFF o Poff. Cuando se interrumpe inicialmente la corriente protectora, ocurrirá una variación de voltaje inmediata. El voltaje después del cambio inmediato será usado como el valor base a partir del cual se mide la pérdida de polarización.

La polarización se define como el cambio de potenciales de una superficie metálica, tanto en sentido negativo como en el positivo, resultante del paso de corriente directa hacia o de un electrodo. La polarización se puede lograr en un tiempo relativamente corto, sin embargo en otros casos se requiere mayor tiempo de aplicación de la corriente protectora para que los potenciales se vuelvan más negativos.

La despolarización o cambio del potencial en sentido positivo, es el valor que se toma en cuenta cuando se aplica el criterio de protección catódica de variación en sentido positivo de 100 mV al apagar el rectificador.

2.5 Diseño del sistema de protección catódica.

La Protección Catódica de un sistema de tuberías enterradas o sumergidas se alcanza cuando se cumple alguno de los Criterios de protección que se presentan en la Norma NACE RP0169-2002, Control de Corrosión Externa de Sistemas de Tuberías Metálicas Enterradas o sumergidas.

Diseñar procedimientos para sistemas de protección catódica varía entre las organizaciones, pero las siguientes pautas generales son seguidas para proteger tuberías enterradas y requieren de la investigación de características respecto a la estructura a proteger y al medio.

2.5.1 Respecto a la estructura a proteger

- Material de la estructura.
- Especificaciones y propiedades del revestimiento protector en caso de que exista.
- Características de construcción y dimensiones geométricas.
- Mapas, planos de localización, diseño y detalles de construcción.
- Localización y características de otras estructuras metálicas enterradas o sumergidas en las proximidades.
- Información referente a los sistemas de protección catódica y/o

sistemas de operación aplicada a estructuras protegidas aledañas.

- Análisis de condiciones de operación de líneas de transmisión eléctrica de alta tensión, que estén paralelas o perpendiculares a las líneas de flujo y puedan causar inducción de corriente.
- Información sobre todas las fuentes de corriente alterna de baja y media tensión, que podrían alimentar a los rectificadores de corriente o condiciones mínimas para la utilización de fuentes alternas de energía.

2.5.2 Respecto al medio

Una vez obtenida la información anterior, el diseño será factible si se dispone además de las mediciones de las características de campo, tales como:

- Mediciones de la resistividad eléctrica del suelo, a fin de evaluar las condiciones de corrosión a las que está o estará sometida la tubería, y definir el tipo de sistema a utilizar; galvánico, o corriente impresa, además de escoger el tipo de ánodo que se utilizará.
- Mediciones del potencial tubería-electrolito, para evaluar las condiciones de corrosividad en la estructura y detectar además, los problemas de corrosión electrolítica.
- Determinación de los lugares para la instalación de los ánodos

bajo los siguientes principios:

- Distribución de la corriente
- Accesibilidad a los sitios para montaje e inspecciones futuras
- Determinación de la corriente necesaria para proteger toda la tubería o conjunto de tuberías.

2.6 Cálculo del sistema de protección catódica.

2.6.1 Área a proteger (A.P)

Para calcular el área total a proteger, se tiene en cuenta el área superficial de la tubería de recepción (productos blancos).

$$A.P = 2\pi RL \text{ (m}^2\text{)} \quad \text{Ecuación 11}$$

Dónde:

R: radio de la base de las tuberías (m)

L: longitud total de las tuberías (m)

2.6.2 Corriente de protección (I.P)

La corriente requerida, se calcula teniendo en cuenta la densidad de corriente necesaria (D.C) para proteger la estructura; el área a proteger y la eficiencia del recubrimiento.

$$I.P = \frac{A.P \times D.C}{f.s} \quad (A) \quad \text{Ecuación 12}$$

Dónde:

A.P: área a proteger (m^2)

D.C: densidad de corriente de la tubería (mA/m^2)

f.s: factor de seguridad

2.6.3 Peso de ánodos requeridos (Pt)

La masa anódica necesaria para el diseño se calcula en función de la tasa de consumo del ánodo empleado, la corriente requerida, la vida útil del diseño y la eficiencia del ánodo de la siguiente manera.

$$Pt = \frac{I.P \times Q \times Y}{f.U} \quad \text{Ecuación 13}$$

Dónde:

I.P: corriente de protección (A)

Q: tasa de consumo del ánodo ($Kg / A \times \text{año}$)

Y: vida útil del diseño (año)

f.U: factor de utilización

2.6.4 Número de ánodos requeridos (Na)

El número de ánodos para cada uno de los tubos se calcula de acuerdo a la siguiente expresión.

$$Na = \frac{Pt}{Pa} \quad \text{Ecuación 14}$$

Dónde:

Pt: peso de ánodos requeridos (Kg)

Pa: peso de un ánodo (Kg)

Teniendo en cuenta la distribución geométrica de la cama anódica y los valores de resistividad eléctrica del suelo, se recomienda instalar ésta a igual profundidad de las estructuras metálicas, siguiendo la recomendación de la norma NACE RP-0169-02 "Control of external corrosion on underground and submerged metallic piping system"; con el objetivo de garantizar una óptima distribución radial de la corriente eléctrica en cada uno de los tubos a proteger.

2.6.5 Resistencia total (Rt)

A continuación se presentan los cálculos de la resistencia eléctrica total del circuito, para uno de los tubos. Este cálculo se sustenta, teniendo en cuenta que las condiciones eléctricas de los tubos son similares. La resistencia eléctrica total de un tubo, corresponde a la suma de varias resistencias.

$$R_t = R_v + R_c + R_{ca} + R_{me} \quad \text{Ecuación 15}$$

Dónde:

R_v: resistencia de lecho de ánodos verticales (Ω)

R_c: resistencia de cables (Ω)

R_{ca}: resistencia de cátodo (Ω)

R_{me}: resistencia del equipo de medición (Ω)

2.6.6 Resistencia del lecho de ánodos verticales (Rv)

La resistencia de un lecho de ánodos depende de la resistividad del terreno, de las dimensiones, forma de los ánodos y del lecho.

Uno o más ánodos enterrados verticalmente en un terreno de resistividad ρ ohm-cm, rodeado de una columna de relleno (coque) de L (cm de longitud) y a (cm de radio), tiene una resistencia en ohms que viene dada por la fórmula.

$$Rv = \frac{\rho}{\pi Na} \left[\frac{1}{2L} \ln \left(\frac{4L}{ae} \right) + \frac{1}{s} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{Na} \right) \right] \quad \text{Ecuación 16}$$

Dónde:

ρ : Resistividad ($\Omega \times \text{cm}$)

L : longitud de la columna de relleno (cm)

a : radio (cm)

s : distancia de separación (cm)

e : 2.718 (base de los logaritmos naturales)

Na : número de ánodos

2.6.7 Resistencia de los cables (Rc)

La longitud total de los cables del circuito eléctrico, corresponde a la suma de los cables que conectan la estructura metálica (tubos) con el rectificador y la longitud del cableado que conecta la cama anódica y el rectificador.

$$R_c = L_c \times R_{cat} \quad \text{Ecuación 17}$$

Dónde:

L_c: longitud de cables (cm)

R_{cat}: resistencia del cable según sección (Ω)

2.6.8 Resistencia del cátodo (R_{ca})

La resistencia del cátodo se calcula teniendo en cuenta la resistencia del material de la tubería, este valor se encuentra tabulado en tablas y está en función del diámetro y el espesor de la pared del tubo.

$$R_{ca} = L_t \times R_{cato} \quad \text{Ecuación 18}$$

Dónde:

L_t: longitud de tubería (m)

R_{cato}: resistencia de la tubería (Ω/m)

2.6.9 Voltaje mínimo para rectificador (V_{rec})

El rectificador de corriente continua, posee una resistencia eléctrica de valores extremadamente pequeños, por tal razón, puede considerarse despreciable en comparación con las demás resistencias señaladas.

El equipo de medición para monitorear la corriente total del circuito, es un multímetro digital de alta impedancia, que posee una resistencia interna de 0.075 Ω.

El cálculo de la capacidad mínima del rectificador, será el voltaje total requerido utilizando la ley de Ohm.

$$V_{rec} = I.P \times R_t \quad \text{Ecuación 19}$$

Dónde:

I.P: corriente de protección (A)

R_t: resistencia total (Ω)

CAPÍTULO III

VARIABLES E HIPÓTESIS.

3.1 Variables de la investigación.

A continuación se identifican las variables involucradas como parte de la investigación, las cuales son:

3.1.1 Variable independiente

Diseñar un sistema de protección catódica por corriente impresa.

3.1.2 Variable dependiente

Inyectar corriente eléctrica en continua a lo largo de las tuberías enterradas de recepción.

3.2 Operacionalización de variables.

En la Tabla N° 3.1 se muestra la relación de las variables de la investigación con los objetivos específicos.

TABLA N ° 3.1.
OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Variables	Conceptos	Dimensión	Indicadores
<p style="text-align: center;">INDEPENDIENTE</p> <p style="text-align: center;">Diseño de protección catódica</p>	<p>Son sistemas encargados de proteger a las tuberías metálicas contra la corrosión del ambiente y del suelo marítimo para prolongar su vida útil mediante el uso de corriente eléctrica en continua, la cual es generada mediante un rectificador de energía eléctrica.</p> <hr/> <p>Los sistemas de protección catódica están conformados por: conductores de cobre con revestimiento XLPE, cama de ánodos y rectificador de corriente continua.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Cálculo y número de ánodos para el sistema - Determinación de parámetros de selección. - Selección de rectificador 	<ul style="list-style-type: none"> - Diámetro de tuberías - Potencial eléctrico - Resistividad del suelo - Longitud de las tuberías - Corriente eléctrica
<p style="text-align: center;">DEPENDIENTE</p> <p>Inyectar corriente eléctrica en continua a lo largo de las tuberías enterradas de recepción.</p>	<p>Inyección de corriente eléctrica en continua a lo largo de las tuberías enterradas de recepción, desde la parte externa del muro perimétrico hasta el sumergimiento de la tubería en el lecho marino.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Inyección de corriente eléctrica en continua como parte del sistema de protección contra la corrosión. 	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo de producto que se recepciona en la tubería - Área clasificada - Tipo de material de la tubería

Fuente: Elaboración Propia

3.3 Hipótesis General e Hipótesis Específicas

3.3.1 Hipótesis General

Si se diseña un sistema de protección catódica por corriente impresa desde los ductos enterrados en la playa fuera del muro perimétrico del terminal hasta el sumergimiento del ducto en el lecho marino, se podrá proteger las tuberías de la corrosión y cumpliremos lo requerimientos básicos de la Norma NACE Corrosion Basic.

3.3.2 Hipótesis Específicas

- Si se diseña y selecciona la cama de ánodos y conductores se podrá proteger las tuberías de recepción contra la corrosión para el sistema de protección catódica por corriente impresa .
- Si se llega a seleccionar el rectificador y la determinación de la acometida eléctrica, se podrá brindar energía rectificada para el correcto funcionamiento del sistema de protección catódica por corriente impresa.
- Si se llega a diseñar el sistema de protección catódica por corriente impresa, el impacto será de manera positiva con respecto a la operatividad actual.

CAPÍTULO IV METODOLOGÍA

4.1 Tipo de investigación.

La investigación es **aplicada** debido a que la tesis no se relaciona con conocimientos totalmente nuevos ya que se cuenta con equipos, materiales y accesorios para el sistema de protección catódica por corriente impresa ya existentes.

Es de tipo **explicativa**, ya que está dirigido a responder las causas de los eventos físicos o sociales, el interés se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se da este, o porque dos o más variables están relacionadas, esto se ve en nuestra investigación con respecto al suelo, la corrosión del ambiente y las tuberías a proteger.

Es una investigación con un enfoque **cuantitativo** ya que obtendremos datos numéricos de los ensayos realizados al suelo y luego los interpretaremos según la normativa NACE y el CNE utilización 2006.

4.2 Diseño de la investigación.

El diseño de la investigación es **experimental** debido a que se realizarán ensayos en el laboratorio de suelos y se obtendrán datos que se podrán manipular.

Es una investigación **longitudinal** puesto que se tomarán más de

una medición en el terminal Chimbote (lugar de estudio) y luego se interpretarán en el laboratorio de materiales.

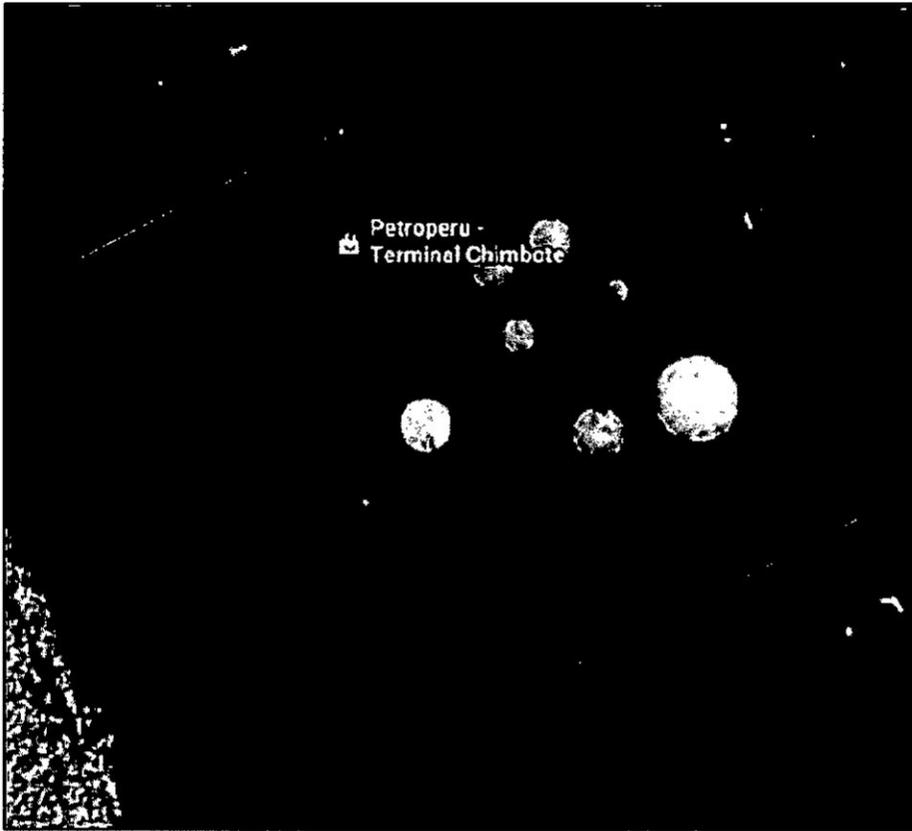
Es una investigación **retrospectiva** puesto que los datos a manipular fueron tomados con anterioridad en investigaciones y proyectos previos.

4.3 Población y muestra.

4.3.1 Población

La población está constituida por el total de tuberías enterradas que se encuentran instaladas en los límites del terminal Chimbote como se muestra en la figura N° 4.1

FIGURA N° 4.1
UBICACIÓN TERMINAL CHIMBOTE

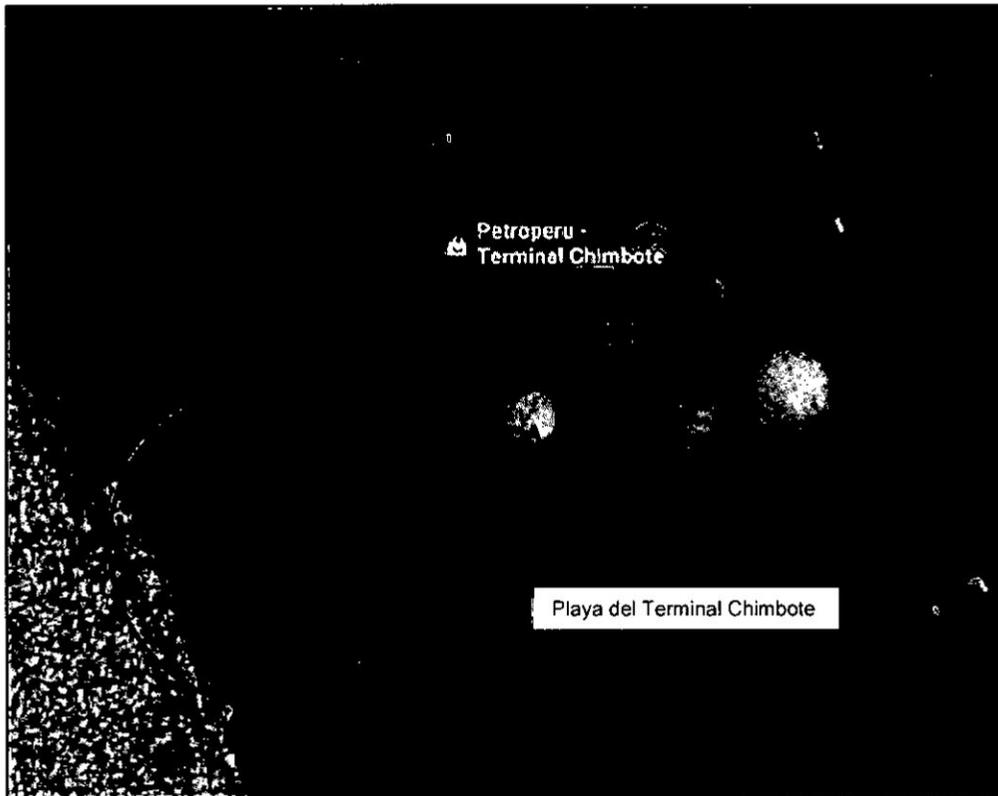


Fuente: Google Maps

4.3.2 Muestra

La muestra está constituida por las tuberías de recepción enterradas en la playa del terminal, aquí los ánodos estarán instalados para el sistema de protección catódica por corriente impresa. Los límites de la muestra van desde el muro perimétrico fuera del terminal hasta el sumergimiento de las tuberías de recepción.

FIGURA N° 4.2
ÁREA DE INVESTIGACIÓN



Fuente: Google Maps

4.4 Parámetros básicos de la investigación.

4.4.1 Diámetro y longitud de la tubería enterrada en lecho marino

En el terminal Chimbote las tuberías de recepción de productos negros y blancos sumergidas en el lecho marino tienen las siguientes medidas.

TABLA N ° 4.1
PARÁMETRO DE LA TUBERÍA

LÍNEA SUBMARINA	LONGITUD	DIAMETRO
Productos blancos	1,583 m	12 pulg

Fuente: Memoria descriptiva – Terminal Chimbote

A su vez existen unos tramos de las tuberías de recepción que se encuentra enterradas en la playa, estos tramos tienen una longitud de 30 y 28 metros para los productos blancos y negros respectivamente. En estos tramos se hará el conexionado para el sistema de protección catódica por corriente impresa, de esta forma los ánodos serán instalados en la playa del terminal.

4.4.2 Tipo de ánodo

Los aceros de alto contenido en silicio, soportan muy bien las condiciones de bajo pH que se producen alrededor de los ánodos. Cuando en la zona anódica se desprende cloro, por la electrolisis de los cloruros existentes (caso del agua de mar) la adición de cromo a la aleación proporciona una alta resistencia a la corrosión del ánodo en este medio.

La fabricación de ánodos con estos aceros de alto contenido en silicio y cromo, se viene haciendo con éxito, desde hace 50 años,

produciéndose ánodos de larga duración y bajo consumo.

La composición de estos ánodos es la que se muestra en la Tabla N° 4.2.

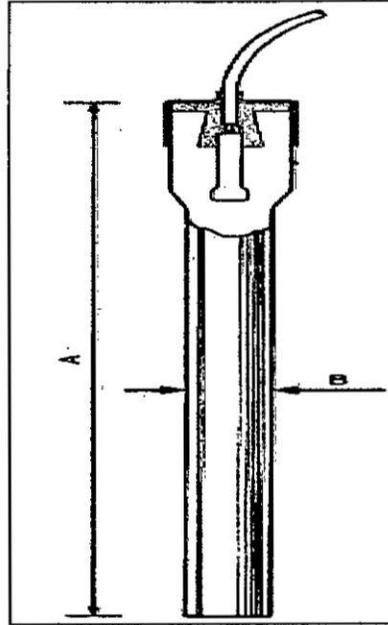
TABLA N ° 4.2
COMPOSICIÓN QUÍMICA

Elemento	Aleación Normal	Aleación Cromo
Silicio	14.25-15.25	14.25-15.25
Cromo	-	4-5
Carbono	1 máx	máx
Magnesio	0.5 máx	0.5 máx
Azufre	0.1 máx	0.1 máx
Fósforo	0.25 máx	0.25 máx
Hierro	Resto	resto

Fuente: Catálogo Argo S.A

Los ánodos de ferrosilicio en sus dos versiones, se fabrican en forma de barras macizas o en forma tubular. Los ánodos macizos tienen un ensanchamiento en uno o en los dos extremos para la conexión de los cables, mientras que los ánodos tubulares llevan la conexión del cable en el centro.

FIGURA N° 4.3
ÁNODO DE FERROSILICIO- CROMO



Fuente: Catálogo Argo S.A

En la tabla N° 4.3 se adjunta las medidas y pesos de los ánodos de Ferrosilicio macizos con conexión en cabeza.

TABLA N ° 4.3
DIMENSIONES Y PESOS

Dimensiones (mm).		Peso. (kg)
A	B	
914	28	8.6
	50	14.5
1220	50	18.5
	76	40.9
1524	50	21.5
	76	49

Fuente: Catálogo Argo S.A

Se seleccionará ánodos de ferrosilicio en aleación con cromo con una longitud de 1220 mm de largo, 76 de diámetro y peso de 40.9 Kg.

4.4.3 Recubrimiento de Tubería Enterrada

El objetivo del uso de este recubrimiento es reducir la densidad de corriente que recae en la tubería enterrada de recepción de productos blancos, de esta forma la corriente de protección requerida también disminuirá, dando a que el voltaje de salida del rectificador a seleccionar sea acorde al mercado.

El recubrimiento principal de la tubería enterrada será tipo cinta Polyguard RD-6. El espesor típico de la cinta es de 50 mils, alcanzando los 100 mils de espesor después de su aplicación con traslape del 50%.

Las juntas soldadas serán recubiertas con el mismo revestimiento. Espesor 100 mils y en las zonas de interfase serán recubiertas con el revestimiento Polyguard UV-350 que tiene una resistencia extra a los rayos UV.

4.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

La siguiente tabla define el tipo de técnicas y sus instrumentos utilizados en la presente investigación.

TABLA N ° 4.4
TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE
RECOLECCIÓN DE DATOS

Técnicas	Instrumentos
Análisis documental	Resultados de informe de "Estudios de suelos 120585-102-INF-01" Análisis de especificaciones técnicas de tuberías Análisis de arreglo de tuberías
Mediciones Convencionales	Medición de potencial eléctrico

Fuente: Elaboración propia

4.6 Análisis y procesamiento de datos

4.6.1 Material de la tubería enterrada

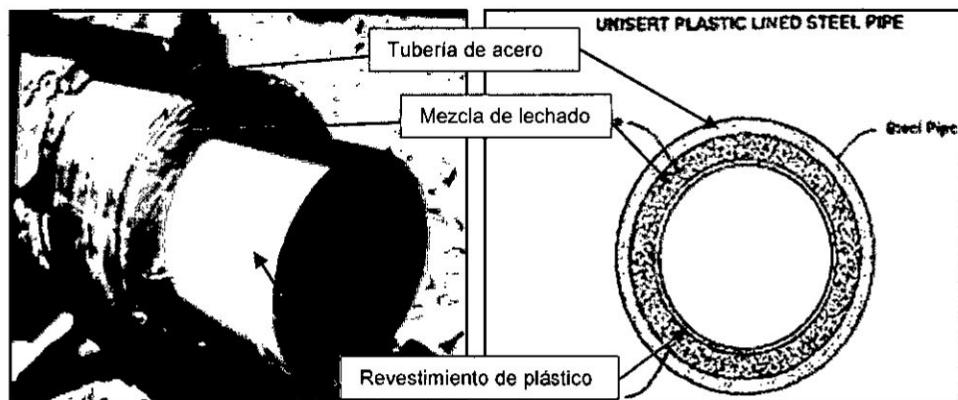
En el terminal Chimbote la recepción de los productos se hace a través de dos líneas submarinas IT3. El sistema de tuberías de paredes múltiples IT3, es un sistema patentado que consiste en una tubería de 3 paredes formadas de la siguiente manera:

- El material que entra en contacto con el fluido, es un revestimiento (lining), este material se diseña de acuerdo a las condiciones mecánicas y de operación del fluido a transportar, en el terminal las tuberías de recepción utilizan plástico reforzado con fibra de vidrio.

- Aplicación de lechada de cemento. Se aplica a presión en el ánulo entre la capa de revestimiento y el tubo de acero exterior, logrando con esto la perfecta integración de los tres elementos que conforman el sistema. Esta lechada es diseñada con las propiedades requeridas de acuerdo a las necesidades de operación de la tubería.
- Al exterior, si es nuevo, se coloca un tubo de acero, el cual soporta a la tubería de revestimiento y la capa de cemento. Si se trata de una rehabilitación in situ, la tubería existente en el terminal es acero y se toma como parte integral del sistema IT3. El material expuesto al lecho marino es el acero, por lo que a este material le tendremos que inyectar un nivel de corriente que este puede resistir en función del área a proteger.

FIGURA N° 4.4

TUBERÍAS CON SISTEMA IT3 – TERMINAL CHIMBOTE



Fuente: QuimiNet – Rehabilitación de tuberías con IT3

4.6.2 Densidad de Corriente del Material

En vista a que el material de la tubería es el acero y está enterrado en la lecho marino, nos basaremos en la tabla N° 4.5, para seleccionar la densidad de corriente que el material de la tubería puede resistir, según los puntos anteriormente vistos, nuestro material es el acero al desnudo enterrado en el lecho marino, es decir agua de mar, las aguas del Terminal Chimbote son calmadas, así que escogeremos el valor de velocidad de oleaje 0.5 m/s con un valor promedio de 140mA/m².

**TABLA N° 4.5
PARÁMETROS DE LAS TUBERÍAS**

Estado Superficial	Medio Agresivo	Densidad de corriente mA/m²
Acero desnudo	Agua de mar (Velocidad 0.5m/s)	80-200
Acero desnudo	Agua de mar (Velocidad 1-15m/s)	150-600
Acero pintado (epoxi, vinílica, cloro caucho)	Agua de mar	25-35
Acero pintado sujeto a roces por hielos	Agua de mar	50-210
Acero pintado (aluminio bituminoso)	Agua de mar	35-50
Acero desnudo	Agua dulce estancada	56
Acero desnudo	Agua dulce en movimiento	56-66
Acero desnudo	Agua dulce turbulenta o caliente	56-170
Acero desnudo	Suelo neutro o esteril	5-17
Acero desnudo	Suelo aireado y seco	5-17
Acero desnudo	Suelo húmedo	28-66
Acero desnudo	Suelo muy ácido	56-170
Acero desnudo	Suelo con bacterias	450
Acero bien revestido	Suelo normal	0.1-0.2
Acero muy bien revestido	Suelo normal	0.01

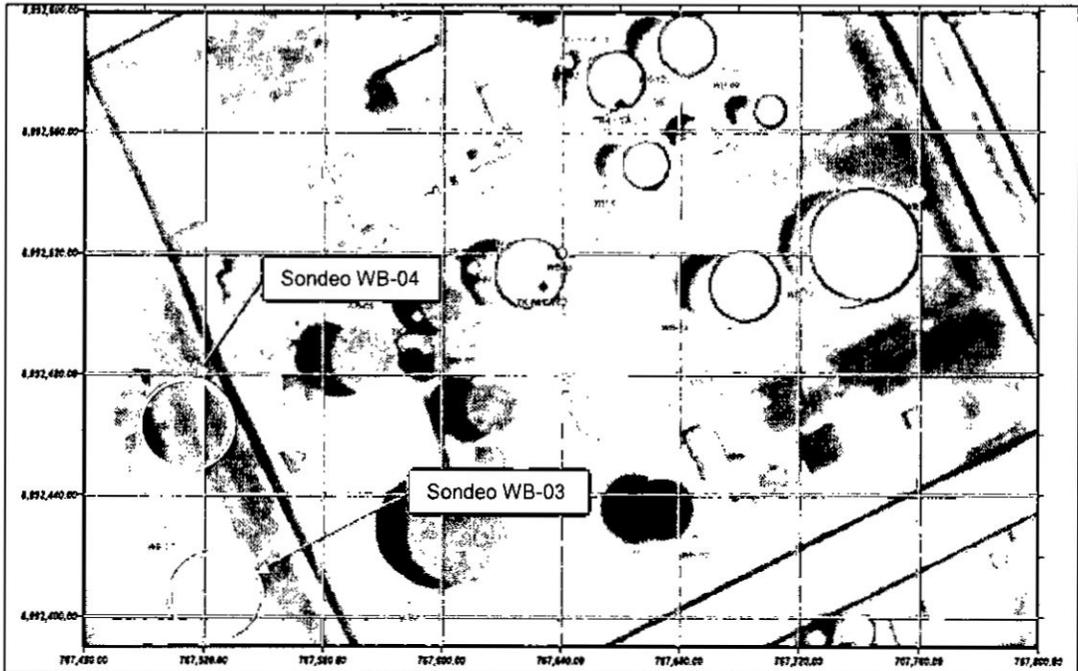
Fuente: Libro más allá de la herrumbre II – Javier Ávila / Joan García

4.6.3 Resistividad del Suelo

Actualmente el terminal Chimbote cuenta con un estudio de suelo "Estudio de Suelos para Adecuación al DS.017 en el Terminal Chimbote" en donde se consideró la ejecución de 15 perforaciones Wash Boring (Distribución en toda el área del terminal). La excavación de 06 calicatas (para inspección de 03 tanques) y ejecución de 06 auscultaciones del tipo Cono de Peck y/o auger, ejecutados de acuerdo a las características del terreno adyacente. Como se observa en la figura N° 4.5, las excavaciones están distribuidas en todo el terminal, los sondeos que forman parte de la muestra de la investigación son los **WB-03** y **WB-04**.

En estos sondeos se evaluará el tipo de suelo, grado de acidez (pH), bacterias, entre otros; todo ello en base a la profundidad de la calicata.

FIGURA N° 4.5
UBICACIÓN DE SONDEOS

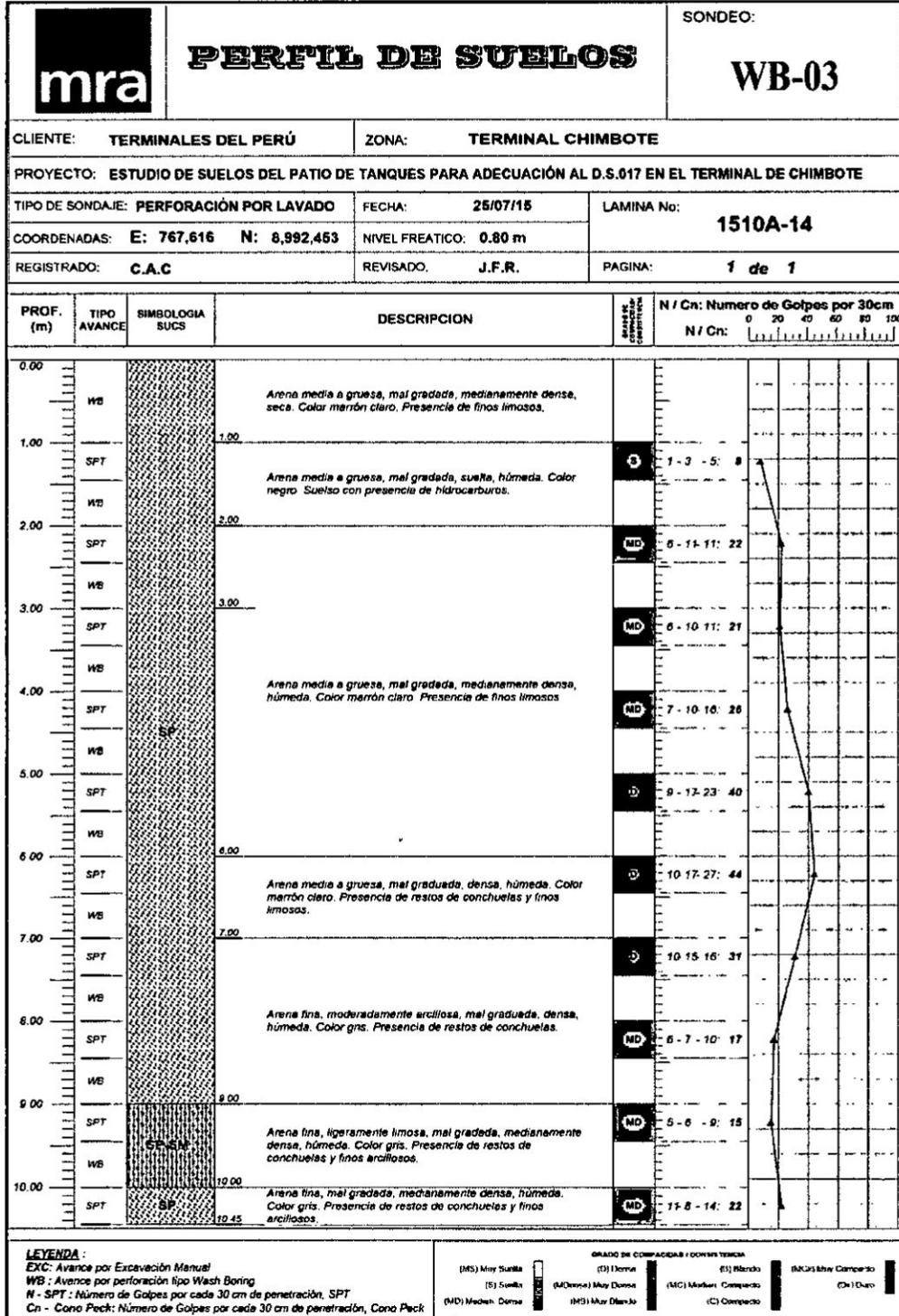


Fuente: Estudio de Suelos para Adecuación al DS .017 en el Terminal Chimbote

En las figuras N° 4.6 y N° 4.7 se muestran los perfiles de los sondeos WB-03 y WB-04, los lechos anódicos estarán enterrados a una profundidad de 2 metros, por lo que se considerará el tipo de suelo a esta profundidad según el perfil.

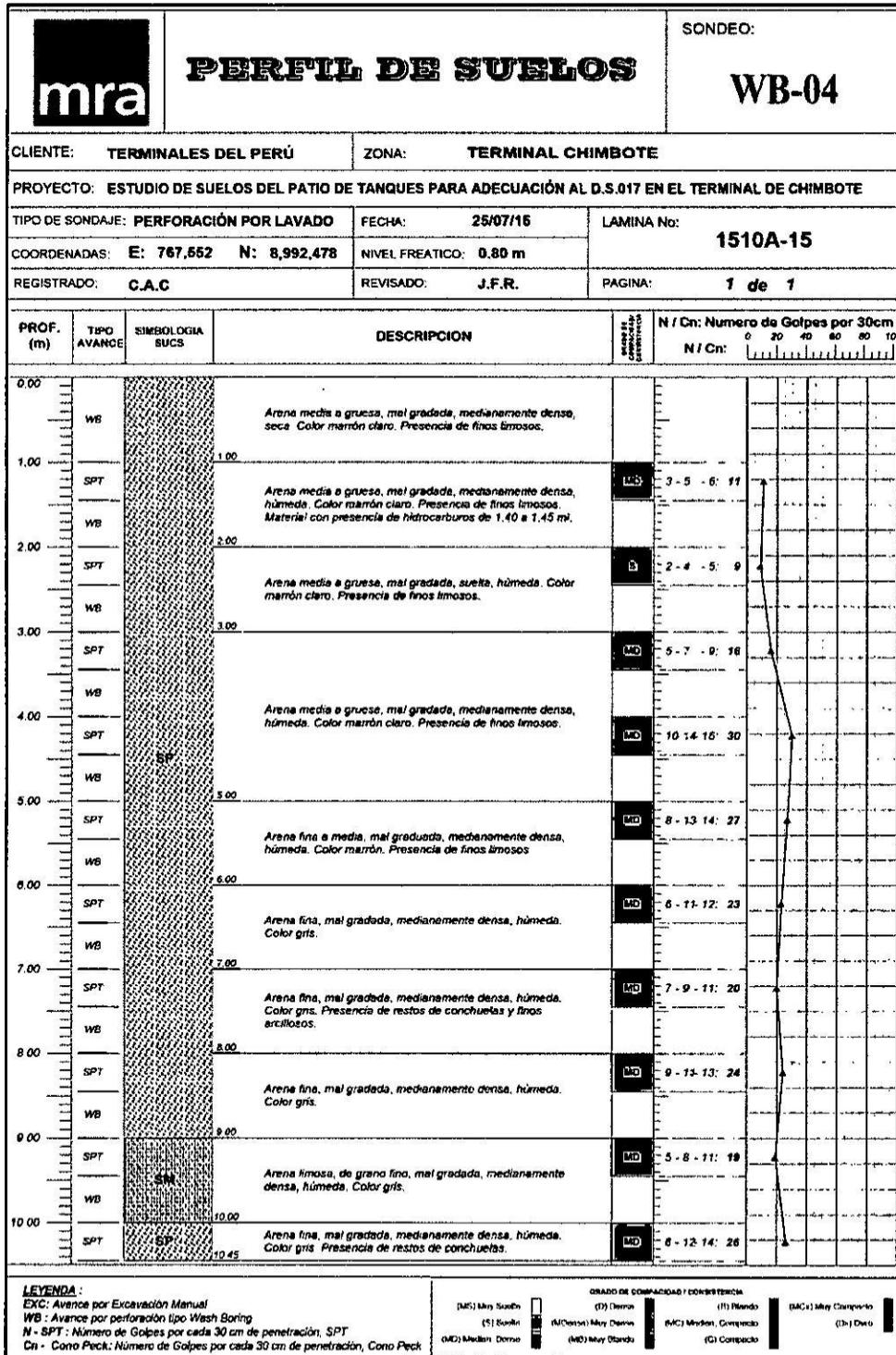
En el perfil WB-03 y WB-04 se muestra que para los primeros 9 metros el tipo de suelo presenta la simbología "SP", y para los 2 primeros metros de profundidad se presenta un suelo con arena media, húmeda, color negro con presencia de hidrocarburos.

FIGURA N° 4.6
PERFIL DEL SONDEO WB-03



Fuente: Estudio de Suelos para Adecuación al DS .017 en el Terminal Chimbote

FIGURA N° 4.7
PERFIL DEL SONDEO WB-04



Fuente: Estudio de Suelos para Adecuación al DS .017 en el Terminal Chimbote

En mecánica de suelos la simbología "SP" es arena fina a media, ligeramente limosa, mal graduada, suelta a medianamente densa, húmeda, color negro, con olor a hidrocarburo. La simbología SM es similar a SP con la diferencia que la arena es media a gruesa.

En base al CNE Utilización 2006, Tabla A2-06 para resistividades de terrenos típicos, para simbología SP y SM la resistividad varía entre 100-500 Ω .m.

En el caso más crítico, se tomó una resistividad promedio de 100 Ω .m.

TABLA N° 4.6
RESISTIVIDAD EN TERRENOS

Terreno	Símbolo del Terreno	Resistividad Media [Ω .m]
Grava de buen grado, mezcla de grava y arena	GW	600-1000
Grava de bajo grado, mezcla de grava y arena	GP	1000-2500
Grava con arcilla, mezcla de grava y arcilla	GC	200-400
Arena con limo, mezcla de bajo grado de arena con	SM	100-500
Arena con arcilla, mezcla de bajo grado de arena con limo	SC	50-200
Arena fina con arcilla de ligera plasticidad	ML	30-80
Arena fina o terreno con limo, terrenos elásticos	MH	80-300
Arcilla pobre con grava, arena, limo	CL	25-60
Arcilla inorgánica de alta plasticidad	CH	10-55

Fuente: Código Nacional de Electricidad Utilización 2006 – Tabla A2-06

**CAPÍTULO V
RESULTADOS**

5.1 Cálculo del Sistema de Protección Catódica

**TABLA N° 5.1
CÁLCULOS DEL SPC – I**

Ver ecuación 11	Valor de variable	Área a Proteger (m²)
Radio de la base de las tuberías (m)	0.1524	1515.8134
Longitud de tuberías (m)	1583	
Ver ecuación 12	Valor de variable	Corriente de Protección (A)
Área a proteger (m ²)	1515.8134	42.1059
Densidad de corriente (mA/m ²)	25	
Factor de seguridad	0.9	
Ver ecuación 13	Valor de variable	Peso de Anodos Requeridos (kg)
Corriente de Protección (A)	42.11	112.2825
Tasa de consumo del ánodo (Kg/A x año)	0.1	
Vida útil de diseño (años)	20	
Factor de utilización	0.75	
Ver ecuación 14	Valor de variable	Número de ánodos Requeridos Teórico (kg)
Peso de ánodos requeridos (kg)	112.2825	3.00
Peso de un ánodo (kg)	40.9	Número de ánodos Requeridos para reducir Resistencia de SPAT (kg)
		30.00
Ver ecuación 15	Valor de variable	Resistencia Total (Ω)
Resistencia de lecho de ánodos N° 01 (Ω)	1.1651	0.6807
Resistencia de lecho de ánodos N° 02 (Ω)	1.1651	
Resistencia de lecho de ánodos N° 03 (Ω)	1.1651	
Resistencia de cables (Ω)	0.1040	
Resistencia de cátodos (Ω)	0.000140887	
Resistencia de equipo de medición (Ω)	0	

Fuente: Elaboración propia

TABLA N° 5.2
CÁLCULOS DEL SPC – II

Ver ecuación 16	Valor de variable	Resistencia de lecho de Ánodos N° 01 (Ω)
Resistividad (Ωcm)	10000	1.1651
Longitud de la columna de relleno (cm)	430	
Radio de bolsa de relleno (cm)	40	
Distancia entre ánodos (cm)	1400	
Número de ánodos	30	
Ver ecuación 16	Valor de variable	Resistencia de lecho de Ánodos N° 02 (Ω)
Resistividad (Ωcm)	10000	1.1651
Longitud de la columna de relleno (cm)	430	
Radio de bolsa de relleno (cm)	40	
Distancia entre ánodos (cm)	1400	
Número de ánodos	0	
Ver ecuación 16	Valor de variable	Resistencia de lecho de Ánodos N° 03 (Ω)
Resistividad (Ωcm)	10000	1.1651
Longitud de la columna de relleno (cm)	500	
Radio de bolsa de relleno (cm)	50	
Distancia entre ánodos (cm)	1400	
Número de ánodos	30.00	

Fuente: Elaboración propia

TABLA N° 5.3
CÁLCULOS DEL SPC – III

Ver ecuación 17	Valor de variable	Resistencia de los Cable Lecho N° 01 (Ω)
Longitud del cableado (m)	143	0.1040
Resistencia eléctrica del tipo de cable (Ω/m)	0.000727	
Ver ecuación 17	Valor de variable	Resistencia de los Cable Lecho N° 02 (Ω)
Longitud del cableado (m)	137	0.0996
Resistencia eléctrica del tipo de cable (Ω/m)	0.000727	
Ver ecuación 17	Valor de variable	Resistencia de los Cable Lecho N° 03 (Ω)
Longitud del cableado (m)	122	0.0887
Resistencia eléctrica del tipo de cable (Ω/m)	0.000727	
Ver ecuación 18	Valor de variable	Resistencia del Cátodo (Ω)
Longitud de tubería (m)	1583	0.000140887
Resistencia eléctrica del tipo de material de la tubería (Ω/m)	0.000000089	
Ver ecuación 19	Valor de variable	Voltaje del Rectificador (V DC)
Corriente de protección (A)	42.1059	28.6635
Resistencia total (Ω)	0.6807	

Fuente: Elaboración propia

5.2 Cálculo de caída de tensión y capacidad de corriente

TABLA N° 5.4
CÁLCULOS DE CAÍDA DE TENSIÓN LECHO N° 1

Tablero rectificador 220 VAC / 24 VDC a Lecho N° 01					
N°	Parámetro	Unidad	Símbolo	Valor	Observación
1	Potencia	Watt	W	709.2096	
2	Resistencia total en lecho	Ohms	Ω	1.2690	
3	Tensión de servicio	Voltio	VDC	30.00	
4	Corriente nominal suministrada desde fuente	Amperios	In	23.6403	
5	Corriente de diseño	Amperios	Idis	29.5504	
6	Tipo de Instalación	-	-	-	Ducto
7	Tipo de cable	-	-	-	CATONAX OZ4 tipo II HMW
8	Longitud	metro	L	143	Distancia de tablero hasta último ánodo más alejado
SELECCIÓN DE ITM Y CALIBRE DE CABLES					
9	Interruptor termomagnético	Amperios	ITM	40	Llave de 2x40A
10	Calibre del cable	mm ²	S	25	-
11	Capacidad del cable	Amperios	I.cat	150	-
CORRECCIÓN POR CAPACIDAD DE CORRIENTE Y CAIDA DE TENSIÓN					
12	Factor de corrección por número de conductores	-	F.n	1	Tabla 12B CNE Utilización 2006
13	Factor de corrección por temperatura	-	F.t	1	Tabla 5A CNE Utilización 2006
14	Capacidad de corriente según catálogo del cable	-	I.cat	150	Valor obtenido por el tipo de cable
15	Corriente corregida	Amperios	I.c	150	-
16	Caída de tensión	Voltio	ΔV	6.0174	
17	Tensión a una distancia L= 143 m	Voltio	VL	23.9826	
18	Tensión que necesita el lecho de ánodos	Voltio	VLechos	17.9051	Tensión en lecho y ruteo de cableado
VALIDACION DE CAIDA DE TENSION Y CAPACIDAD DE CORRIENTE					
19	Por caída de tensión	VLechos \leq VL			Si cumple
20	Por capacidad de corriente	I.c \geq Idis			Si cumple

Fuente: Elaboración propia

TABLA N° 5.5
CÁLCULOS DE CAÍDA DE TENSIÓN LECHO N° 2

Tablero rectificador 220 VAC / 24 VDC a Lecho N° 02					
N°	Parámetro	Unidad	Símbolo	Valor	Observación
1	Potencia	Watt	W	711.6557	
2	Resistencia total en lecho	Ohms	Ω	1.2647	
3	Tensión de servicio	Voltio	VDC	30.00	
4	Corriente nominal suministrada desde fuente	Amperios	In	23.7219	-
5	Corriente de diseño	Amperios	Idis	29.6523	
6	Tipo de Instalación	-	-	-	Ducto
7	Tipo de cable	-	-	-	CATONAX OZ4 tipo II HMW
8	Longitud	metro	L	137	Distancia de tablero hasta último ánodo más alejado
SELECCIÓN DE ITM Y CALIBRE DE CABLES					
9	Interruptor termomagnético	Amperios	ITM	40	Llave de 2x40A
10	Calibre del cable	mm ²	S	25	-
11	Capacidad del cable	Amperios	I.cat	150	-
CORRECCIÓN POR CAPACIDAD DE CORRIENTE Y CAIDA DE TENSIÓN					
12	Factor de corrección por número de conductores	-	F.n	1	Tabla 12B CNE Utilización 2006
13	Factor de corrección por temperatura	-	F.t	1	Tabla 5A CNE Utilización 2006
14	Capacidad de corriente según catálogo del cable	-	I.cat	150	Valor obtenido por el tipo de cable
15	Corriente corregida	Amperios	I.c	150	-
16	Caída de tensión	Voltio	ΔV	5.7848	
17	Tensión a una distancia L= 137 m	Voltio	VL	24.2152	
18	Tensión que necesita el lecho de ánodos	Voltio	VLechos	17.7823	Tensión en lecho y ruteo de cableado
VALIDACIÓN DE CAIDA DE TENSIÓN Y CAPACIDAD DE CORRIENTE					
19	Por caída de tensión	$VLechos \leq VL$			Si cumple
20	Por capacidad de corriente	$I.c \geq Idis$			Si cumple

Fuente: Elaboración propia

TABLA N° 5.6
CÁLCULOS DE CAÍDA DE TENSIÓN LECHO N° 3

Tablero rectificador 220 VAC / 24 VDC a Lecho N° 03					
N°	Parámetro	Unidad	Símbolo	Valor	Observación
1	Potencia	Watt	W	717.8456	
2	Resistencia total en lecho	Ohms	Ω	1.2538	
3	Tensión de servicio	Voltio	VDC	30.00	
4	Corriente nominal suministrada desde fuente	Amperios	In	23.9282	
5	Corriente de diseño	Amperios	Idis	29.9102	
6	Tipo de Instalación	-	-	-	Ducto
7	Tipo de cable	-	-	-	CATONAX OZ4 tipo II HMW
8	Longitud	metro	L	122	Distancia de tablero hasta último ánodo más alejado
SELECCIÓN DE ITM Y CALIBRE DE CABLES					
9	Interruptor termomagnético	Amperios	ITM	40	Llave de 2x40A
10	Calibre del cable	mm ²	S	25	-
11	Capacidad del cable	Amperios	I.cat	150	-
CORRECCIÓN POR CAPACIDAD DE CORRIENTE Y CAIDA DE TENSIÓN					
12	Factor de corrección por número de conductores	-	F.n	1	Tabla 12B CNE Utilización 2006
13	Factor de corrección por temperatura	-	F.t	1	Tabla 5A CNE Utilización 2006
14	Capacidad de corriente según catálogo del cable	-	I.cat	150	Valor obtenido por el tipo de cable
15	Corriente corregida	Amperios	I.c	150	-
16	Caída de tensión	Voltio	ΔV	5.1962	
17	Tensión a una distancia L= 122 m	Voltio	VL	24.8038	
18	Tensión que necesita el lecho de ánodos	Voltio	VLechos	17.4769	Tensión en lecho y ruteo de cableado
VALIDACION DE CAIDA DE TENSION Y CAPACIDAD DE CORRIENTE					
19	Por caída de tensión	VLechos \leq VL			Si cumple
20	Por capacidad de corriente	I.c \geq Idis			Si cumple

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO VI

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En vista a los resultados obtenidos en la tabla N° 6.1 con respecto al número de ánodos, en este se señala que con 3 ánodos instalados verticalmente es suficiente para proteger a la tubería de recepción de productos blancos, pero esto en consecuencia genera que el rectificador de corriente continua necesite una tensión de salida en DC de 136.4359 VDC .

Debido a que para seleccionar el rectificador de corriente continua se necesita saber el voltaje de salida, se deberá conocer los parámetros de corriente de protección y resistencia total, así como se menciona en la ecuación N° 19.

La siguiente tabla ilustra cómo saldrían los valores del rectificador si es que se hubiese tomado como número de ánodos el valor de 3 unidades.

TABLA N ° 6.1
RESULTADOS CON 3 ÁNODOS

Ver ecuación 15	Valor de variable	Resistencia Total (Ω)
Resistencia del ánodo (Ω)	3.1362	3.2403
Resistencia de cables (Ω)	0.1040	
Ver ecuación 17	Valor de variable	Resistencia de los Cables (Ω)
Longitud del cableado (m)	143	0.1040
Resistencia eléctrica del tipo de cable (Ω/m)	11	
Ver ecuación 18	Valor de variable	Resistencia del Cátodo (Ω)
Longitud de tubería (m)	1583	0.000140887
Resistencia eléctrica del tipo de material de la tubería (Ω/m)	0.000000089	
Ver ecuación 19	Valor de variable	Voltaje del Rectificador (V DC)
Corriente de protección (A)	42.1059	136.4359
Resistencia total (Ω)	3.240302148	

Fuente: Elaboración Propia

Debido a que la corriente de protección ya tomó un valor constante debido a la protección con el recubrimiento tipo polyguard. Lo que se deberá hacer es aumentar el número de ánodos para así reducir más la resistencia del lecho de ánodos.

Con una cama de ánodos conformados por 30 unidades de

ferrosilicio se cumple lo visto en las tablas N° 5.1, 5.2, 5.3.

Cabe señalar que con una cama de 30 ánodos se llega a una resistencia de puesta a tierra de 0.6807Ω , cumpliendo así con el API RP 540 para instalaciones eléctricas en plantas de procesamiento de petróleo, el cual exige una resistencia menor a 5Ω .

CAPÍTULO VII

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

7.1 Electrodo Estacionario

Tipo de electrodo: Cobre /Sulfato de cobre. Estacionario.

Material del electrodo: Cerámica

Longitud del cable: 10 m

Tipo de cable: # 14 AWG recubrimiento RHH o RHW.

Color de cable: Blanco o Amarillo.

Rango de Temperatura: 5° - 50 °C.

7.2 Soldadura Exotérmica

Composición: Mezcla de óxido de cobre y aluminio

Peso: 15 gr.

Envase: Tubos de plástico.

Cada tubo contiene el material de inicio en la parte inferior del tubo de plástico, con el metal de soldadura en la parte superior. Estos materiales no son explosivos y no está sujeto a la ignición espontánea. Se empacan en cajas junto con los discos de metal. Cada soldadura utiliza un disco.

7.3 Parches (HANDYCAP)

Tapa de plástico moldeado relleno de un compuesto resistente a la

corrosión en una base de la cinta elastomérica de espesor. Auto-imprimado.

Dimensiones: 4x4 "

Lamina de plástico: 2.75x4 "

Espesor de hoja: 10 mils

Cúpula de plástico: 1.625 pulg de diámetro.

Espesor del adhesivo: 165 mils.

Peso: 2.8 oz.

Temperatura de Trabajo: 20 °C a 66 °C

7.4 Cinta Auto Fundente

Espesor de cinta: 30 mils

Temperatura de Trabajo: 90 °C

Resistencia UV: No

Elongación: 1000%

Tensión de Ruptura: 8 lbs/pulg

Rigidez dieléctrico: 800 V/mils.

Resistencia de aislación: 10^5 M Ω

Retardante de la llama: Si

Autoextinguible: No

7.5 Cinta Eléctrica

Espesor de cinta: 0.18 mm

Temperatura de Trabajo: -18 a 100 C

Resistencia UV: No

Elongación: 250%

Tensión de Ruptura: 15 lbs/pulg

Rigidez dieléctrico: 1150 V/mils.

Resistencia de aislación: 10^5 M Ω

Retardante de la llama: Si

Autoextinguible: No

7.6 Adhesivo Polyguard 601

Color: Negro

Contenido de sólidos: 14%

Punto de Inflamación: -5.9 °C (21 °F) Pensky Marten CC

Viscosidad: 800-1000 cps

Temperatura de aplicación: 25°F a 130°F (-4° a 54° C)

Temperatura de Servicio: -25°F a 170°F (-32° a 66° C)

Peso por galón: 7.62 lb/gal

VOC g/l : 0

7.7 Cinta Polyguard RD-6

Espesor de cinta: 50 mils

Ancho de cinta: 4 pulg. o 6 pulg.

Temperatura de Trabajo: -4 a 63 °C

Resistencia UV: No

Resistencia a la Tracción: 200 lbs/pulg

Resistencia al impacto: 23.0 lbs – pulg.

Elongación: 20%

Adhesión a la superficie: 20 lbs/pulg

Base: Bitumen de Caucho.

7.8 Tubería de PVC

Normas Fabricación: NTP 399.003: 2007 (tubos).

Normas Fabricación: NTP 399.003: 2007 (accesorios).

Módulo de elasticidad: 30000 kgf/cm²

Coefficiente de dilatación: 0.06 mm/0°C

Inflamabilidad: Autoextinguible

Diámetros: 3 pulgadas

Clase: SAP (pesado)

7.9 Tubería Conduit IMC

Fabricación: NTC 169 y UL 1242. E

Límite de Fluencia mínimo: 25,000 Psi

Resistencia a la tracción: 44.000 psi

% de Elongación en 2 pulgadas: 23%

Prueba de abocardado: Según norma VTC-103

Prueba de dobles: Según norma ANSI C 80, ANSI C 80.6,

Bobina Adicional: La unidad debe suministrarse con bobina de protección y depuración tipo choque en el lado DC de acuerdo con Voltaje y Amperaje del equipo.

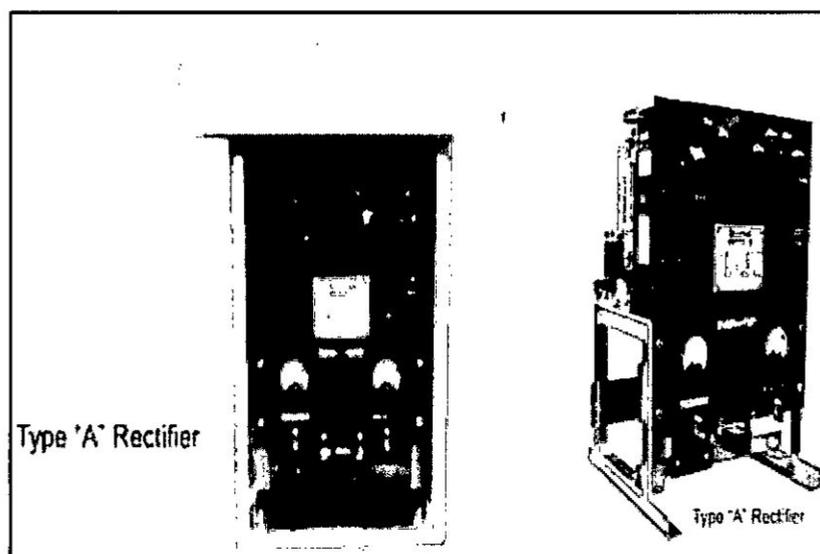
Taps: Mínimo de 3 gruesos y 5 finos ajustables por lo menos de 18 pasos iguales de aproximadamente 5% de voltaje para la salida completa.

Terminal Negativo: 1 negativo con terminal para cable hasta # 2 AWG

Terminal Positivo: 1 positivo con terminal para cable hasta # 2 AWG

Caja: Tipo "A" para uso en exteriores. Las cajas serán de acero Inoxidable, Galvanizadas o Aluminio.

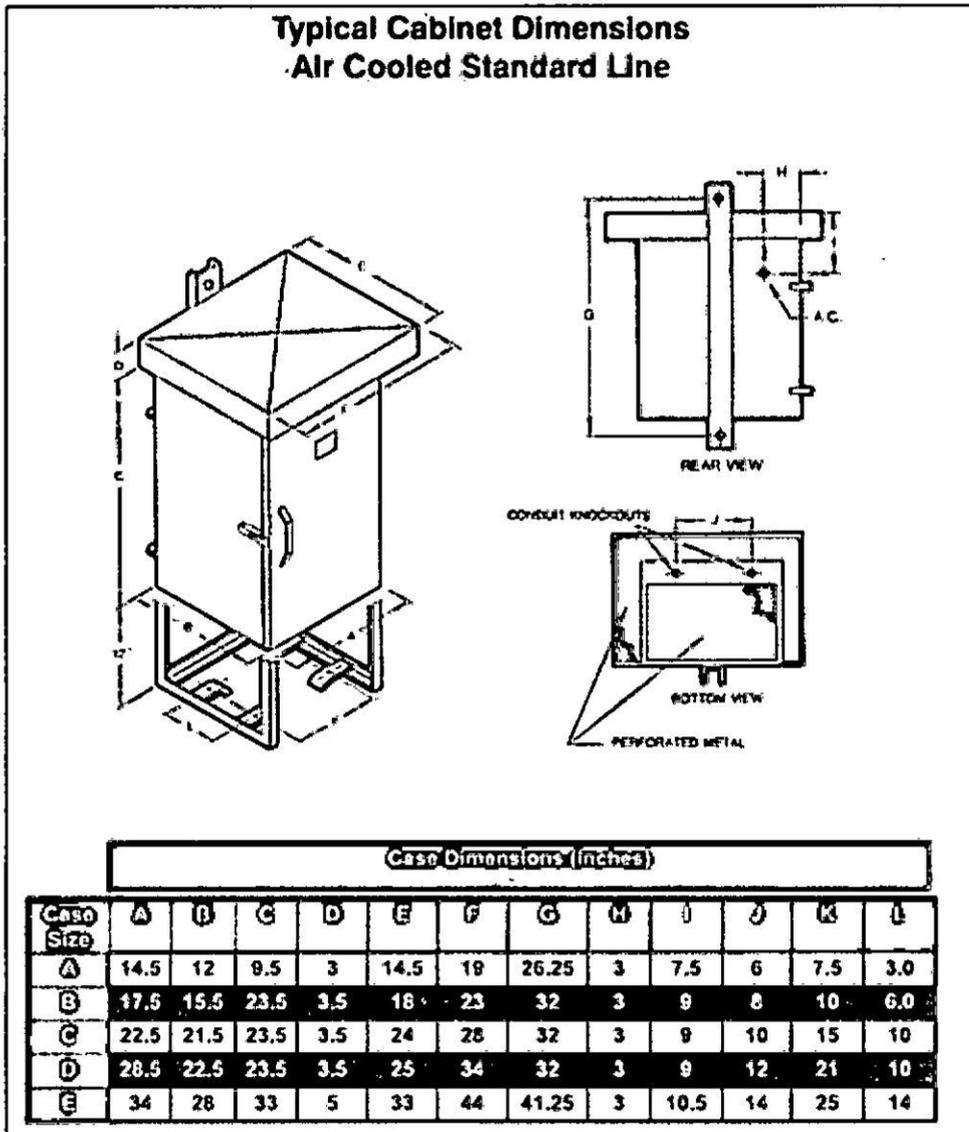
FIGURA N° 7.1
TRANSFORMADOR RECTIFICADOR



Fuente: Especificaciones técnicas - TERESOPOLIS

FIGURA N° 7.2

DIMENSIONES TRANSFORMADOR



Fuente: Especificaciones técnicas - TERESOPOLIS

7.17 Cajas de pase pesada

Marca: Crouse Hinds Condulet

Tipo: GUAC59

Clasificación: Clase I, Div.1&2, Grupos B*, C, D.

Empaque Interno: Neopreno tipo "o" ring para cubrir los requerimientos NEMA 4.

Tapa: Roscada.

Pintura: Gris Epóxi – Poliester aplicada electrostáticamente.

Dimensiones: 1 ½ pulg. x 5 pulg. (127.00 mm)

7.18 Lámina Aislante

Material: Neopreno negro.

Protección UV: Si

Enterramiento directo: Si

Resist. Compresión: > 10k PSI

Durómetro: 50 (Shore A)

Espesor: 3/16" (min)

Temp. Servicio: -20 °C a + 30 °C.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSIONES

El diseño del sistema de protección catódica por corriente impresa a la tubería de recepción de productos blancos dependió de las variables independientes tales como el tipo de suelo, diámetro de tuberías y longitud de esta, pero el factor más determinante del diseño fue el tipo de recubrimiento que se iba a usar a lo largo de las tuberías, ya que sin este, la densidad de corriente aumentaría drásticamente, elevando de forma directamente proporcional a la corriente de protección.

La corriente de protección como se vio en este documento es una de las variables para seleccionar nuestro transformador rectificador, comercial y económicamente los valores de conversión de la salida de voltaje en DC llega como máximo a 50 VDC. En nuestra tesis se ha seleccionado un rectificador de 460 VAC a 30 VDC, todo ello basado en nuestros resultados.

Debido a esto, el recubrimiento Polyguard UV-350 disminuyó la corriente de protección que necesitaba la tubería, la reducción fue de más de 20 veces la densidad de corriente que se necesitaba sin recubrimiento. Otro detalle en hacer énfasis fue la utilización de los ánodos de ferrosilicio con cromo, en la mayoría de proyectos y textos referenciales usaban el ánodo de titanio (MMO), pero debido a la diferencia de precios, elevados por

parte del ánodo de MMO, se decidió el uso del ferrosilicio, debido a que no muchas empresas usan estos ánodos para protección de tuberías sino de tanques. Pero los resultados fueron válidos hasta con 3 ánodos, pero debido a la alta impedancia del sistema se tuvo que aumentar los ánodos a 30, pero la diferencia en precios fue la misma incluyendo excavaciones.

CAPÍTULO IX

RECOMENDACIONES

Se recomienda efectuar inspección del sistema de protección catódica mensualmente, chequeando los medidores de potencia, haciendo pruebas en los rectificadores y verificar las conexiones de las tuberías a proteger debido a que en estos punto es donde se puede ocasionar fuga de corriente.

Sería ideal utilizar un sistema de adquisición de datos para monitoreo de los valores de corriente y potenciales eléctricos de las tuberías. Estos sistemas de adquisición de datos permitirían el monitoreo continuo de las principales variables de la protección catódica ahorrando costos en mano de obra.

CAPÍTULO X

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Documentación técnica de la empresa PDVSA-PETROPIAR
- Ahmad, Z. "Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control". Elsevier Science and Technology Books. Septiembre 2006. Pp. 1-7, 271-344.
- Peabody, A. W. "Peabody's Control of Pipeline Corrosion". Segunda Edición. NACE International. Houston, Texas. 2001. Pp. 1-6, 21-64, 156-200.
- Huerta, E. O. "Corrosión y Degradación de Materiales". Editorial Síntesis. 2001. Pp. 210-216.
- ASTM G57-95. "Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method". United States. 2006.
- Bardal, E. "Corrosion and Protection". Editorial Springer. 2003. Pp. 266-278.
- International Standard ISO 8044-2000. "Corrosion of Metals and Alloys. Basic Terms and Definitions". 2000
- Atkinson J.T.N. y H. VanDroffelaar, Corrosion and its Control. An introduction to the Subject, NACE, Houston, 1982.
- Ávila J. y J. Genescá, Más allá de la herrumbre, FCE-SEP-CONACYT, México, 1986, 110 pp. (Colección La Ciencia desde México, núm. 9).
- Bockris J.O'M., N. Bonciocat y F. Gutmann, An Introduction to

- Electrochemical Science, Wykeham Pub., Londres, 1974.
- Fontana M.G. y N.D. Greene, Corrosion Engineering, McGraw Hill, Nueva York, 1978.
 - Galvele J.R., Corrosion, OEA, Washington, 1979 (Monografía núm. 21).
 - González José A. (comp.), Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión, CSIC, Madrid, 1984.
 - Uhlig H.H., Corrosión y control de la corrosión, Ed. Urmo, Bilbao, 1975.
 - Van Delinder L.S., (comp.), Corrosion Basics, An Introduction, NACE, Houston, 1984.
 - Applegate L.M., Cathodic Protection, McGraw-Hill, Nueva York, 1960.
 - Byran W.T., Designing Impressed Current Cathodic Protection Systems with Durco Anodes, The Duriron Co., Dayton, 1970.
 - Lazzari L. y P. Pedferri, Protezione Catodica, CLUP, Milán, 1982.
 - Morgan J.H., Cathodic Protection, Leonard Hill, Londres, 1959.
 - Parker M.E., Pipe line Corrosion and Cathodic Protection, Gulf Publishing Co., Houston, 1954.
 - Peabody A.W., Control of Pipeline Corrosion, NACE, Houston, 1967.
 - Roche M., Protection contre la corrosion des ouvrages maritimes petroliers, Technip, Paris, 1979.
 - Shreir L.L., Corrosion, vol. II, Newnes-Butterworth, Londres, 1976.
 - Von Beckmann W. y Sohwenk, Handbook of Cathodic Protection,

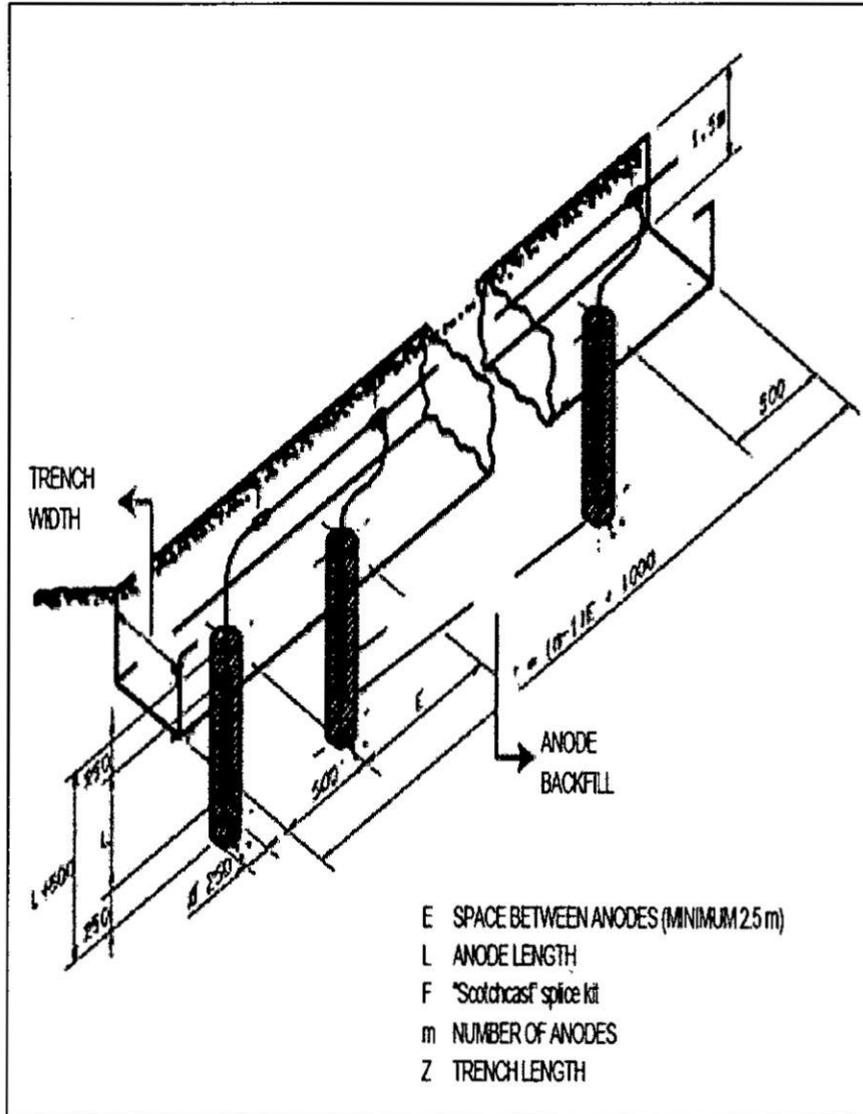
Portcullis Press, Redhill Surrey, 1975.

CAPÍTULO XI
ANEXOS.

11.1 Matriz de Consistencia

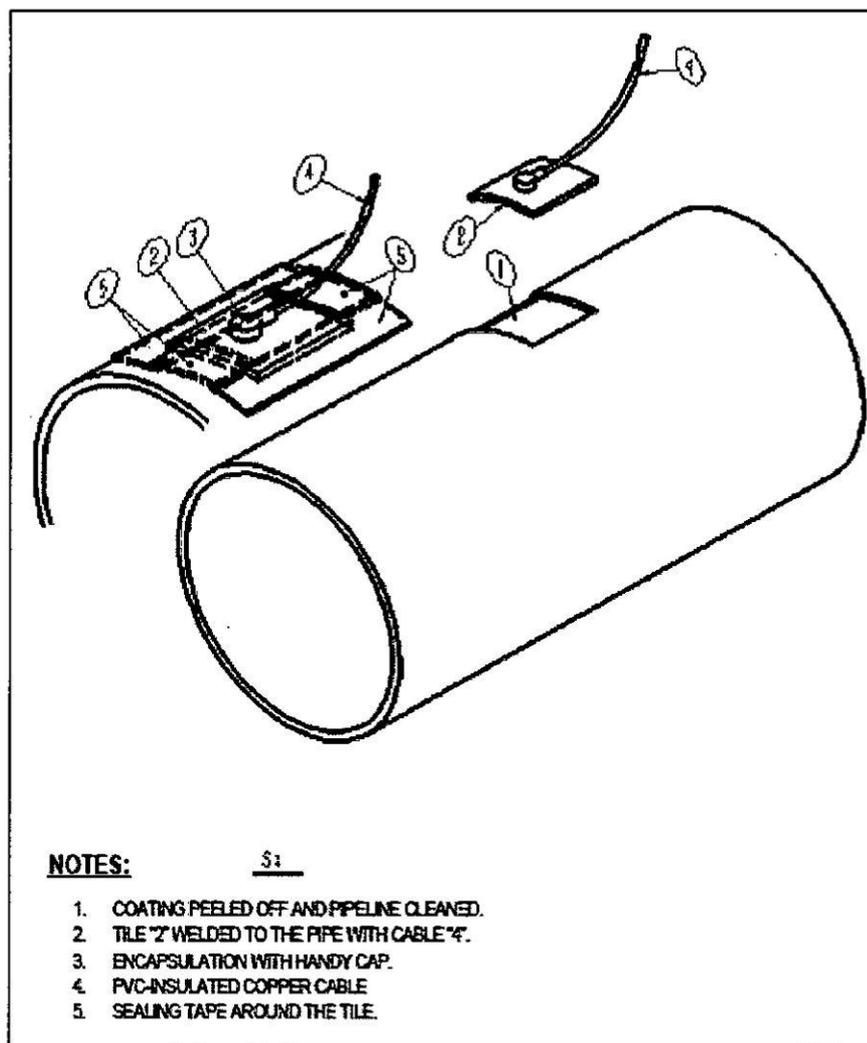
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA	POBLACIÓN
<p><u>Problema General</u></p> <p>¿Es factible diseñar un sistema de protección catódica por corriente impresa capaz de proteger de la corrosión a las tuberías enterradas de recepción, desde los ductos enterrados en la playa fuera del muro perimétrico del terminal hasta el sumergimiento del ducto en el lecho marino en la planta de almacenamiento de hidrocarburos Terminal Chimbote de Petroperú?</p>	<p><u>Objetivo General</u></p> <p>Seleccionar y diseñar el sistema de protección catódica por corriente impresa para las líneas de recepción de productos blancos y negros de la planta de almacenamiento de hidrocarburos - Terminal Chimbote de Petroperú.</p>	<p><u>Hipótesis General</u></p> <p>Si se diseña un sistema de protección catódica por corriente impresa desde los ductos enterrados en la playa fuera del muro perimétrico del terminal hasta el sumergimiento del ducto en el lecho marino, se podrá proteger las tuberías de la corrosión y cumpliremos lo requerimientos básicos de la Norma NACE Corrosion Basic.</p>	<p><u>Variable Independiente</u></p> <p>Diseñar un sistema de protección catódica por corriente impresa.</p>	<p><u>Tipo de Investigación</u></p> <p>Investigación Tecnológica</p>	<p><u>Población</u></p> <p>Sistema de ductos enterrados en todo el Terminal Chimbote Petroperú.</p>
<p><u>Problemas Específicos</u></p> <p>P1: ¿Es factible el diseño y la selección de la cama de ánodos y conductores para el sistema de protección catódica por corriente impresa?</p> <p>P2: ¿Es factible la selección del rectificador y la determinación de la acometida eléctrica para el sistema de protección catódica por corriente impresa?</p> <p>P3: ¿Cuál será el impacto del nuevo sistema de protección catódica por corriente impresa con respecto a la operatividad actual?</p>	<p><u>Objetivos Específicos</u></p> <p>O1: Diseñar y seleccionar la cama de ánodos y conductores para el sistema de protección catódica por corriente impresa.</p> <p>O2: Seleccionar el rectificador y la determinación de la acometida eléctrica para el sistema de protección catódica por corriente impresa?</p> <p>O3: Determinar el impacto del nuevo sistema de protección catódica por corriente impresa con respecto a la operatividad actual.</p>	<p><u>Hipótesis Específicas</u></p> <p>H1 : Si se diseña y selecciona la cama de ánodos y conductores se podrá proteger las tuberías de recepción contra la corrosión para el sistema de protección catódica por corriente impresa</p> <p>H2: Si se llega a seleccionar el rectificador y la determinación de la acometida eléctrica, se podrá brindar energía rectificada para el correcto funcionamiento del sistema de protección catódica por corriente impresa.</p> <p>H3: Si se llega a diseñar el sistema de protección catódica por corriente impresa, el impacto será de manera positiva con respecto a la operatividad actual.</p>	<p><u>Variable Dependiente</u></p> <p>Inyectar corriente eléctrica en continua a lo largo de las tuberías enterradas de recepción para la planta de almacenamiento de hidrocarburos - Terminal Chimbote de Petroperú.</p>	<p><u>Nivel</u></p> <p>Investigación Aplicada</p> <p><u>Método</u></p> <p>Método de Investigación Dinámico</p> <p>Diseño no experimental</p>	<p><u>Muestra</u></p> <p>Los ductos enterrados en la playa fuera del muro perimétrico del terminal hasta el sumergimiento del ducto en el lecho marino.</p>

FIGURA N° 11.2
TÍPICO MONTAJE LECHO ANÓDICO VERTICAL



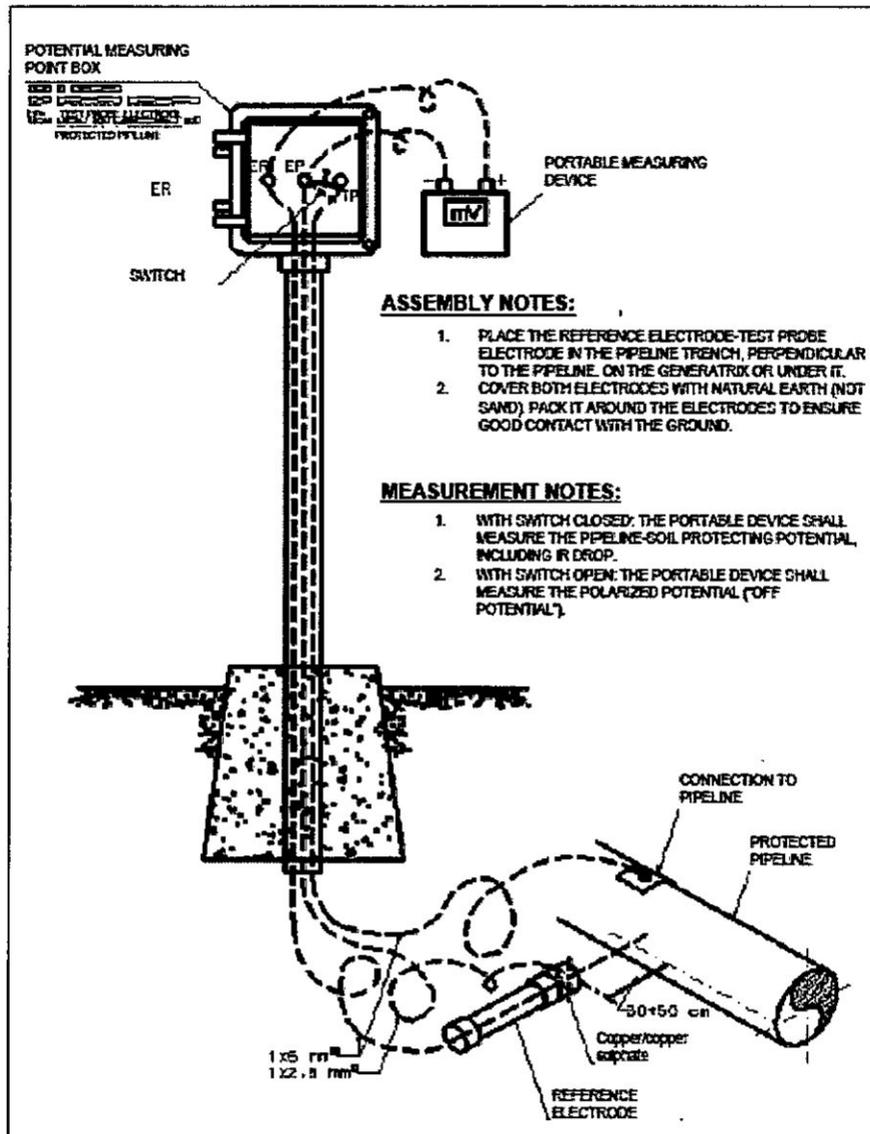
Fuente: Especificación de diseño – ED-P-01.02-02 Repsol

FIGURA N° 11.3
TÍPICO CONEXIÓN DE CABLES DEL SPC



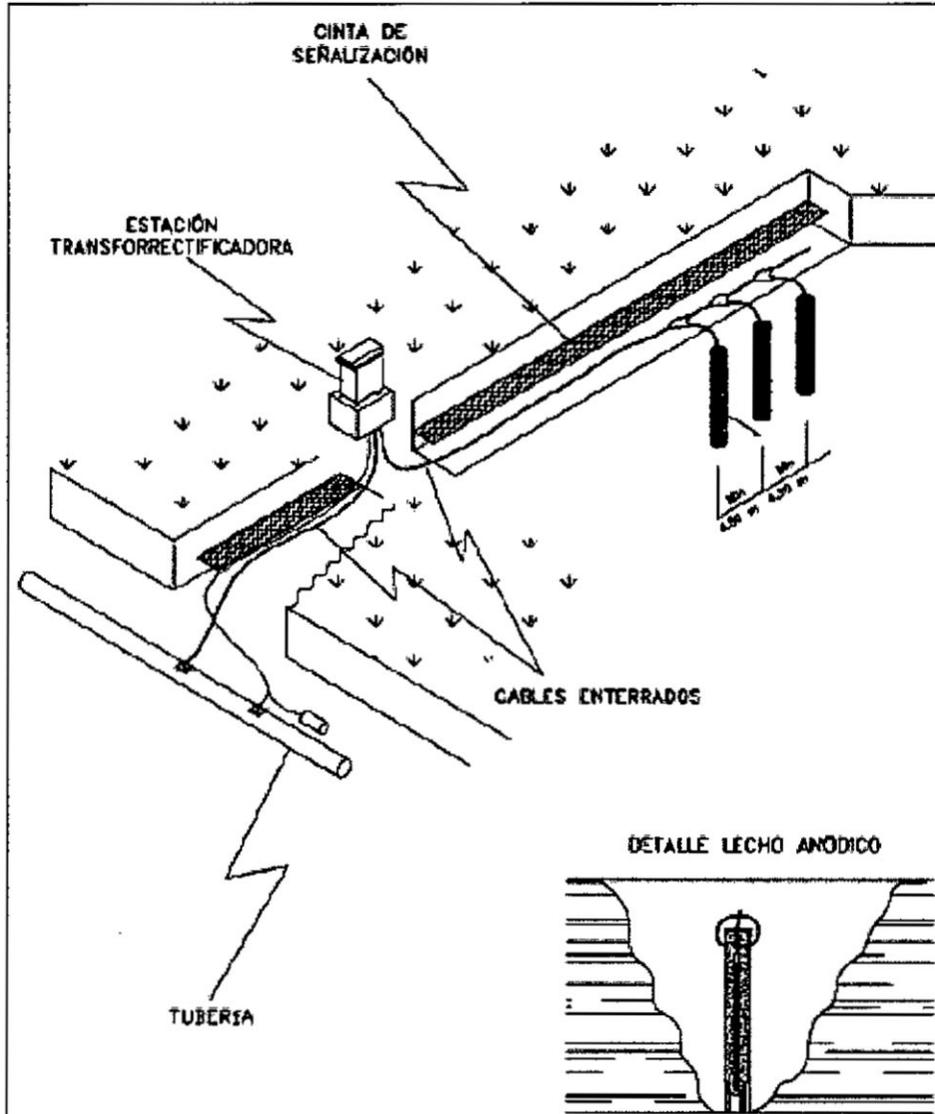
Fuente: Especificación de diseño – ED-P-01.02-02 Repsol

FIGURA N° 11.4
TÍPICO CONEXIÓN DE CABLES DEL SPC



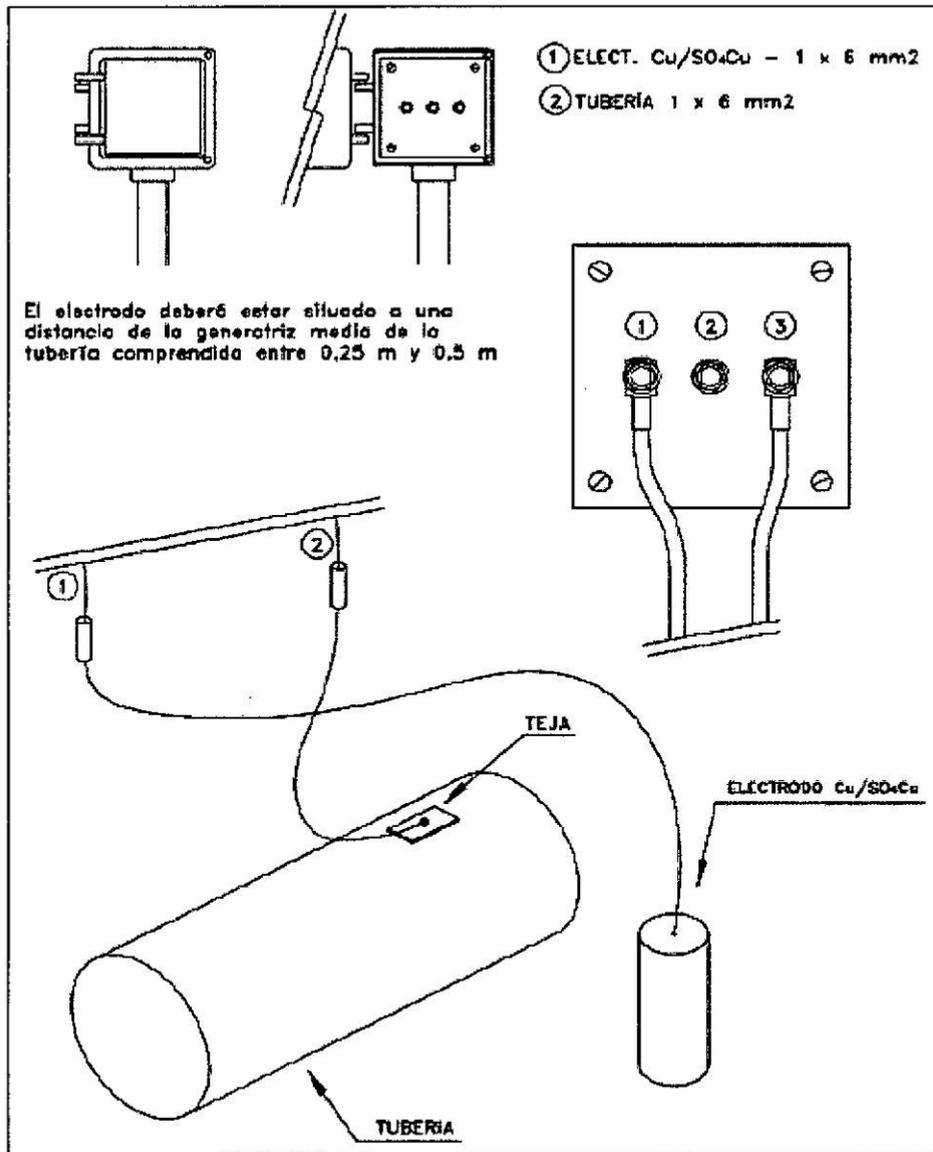
Fuente: Especificación de diseño – ED-P-01.02-02 Repsol

FIGURA N° 11.5
TÍPICO DE DISPOSICIÓN DE LECHO DE ÁNODOS



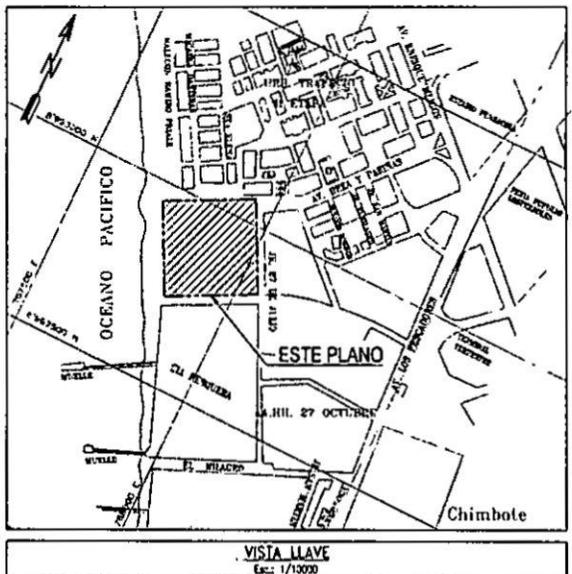
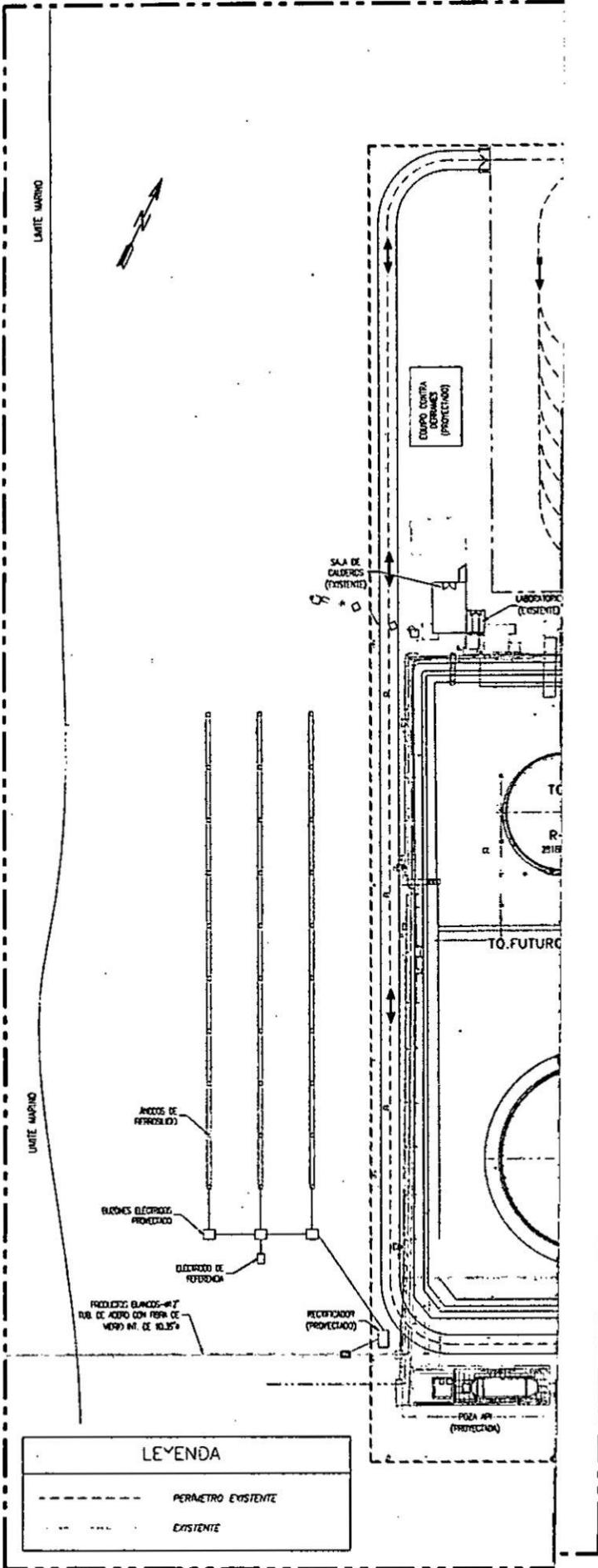
Fuente: Especificación de diseño – ED-P-01.02-02 Repsol

FIGURA N° 11.6
TÍPICO MONTAJE DE ELECTRODO DE REFERENCIA



Fuente: Especificación de diseño – ED-P-01.02-02 Repsol

11.3 Plano de ubicación



LEYENDA	
---	PERIMETRO EXISTENTE
---	EXISTENTE

CLIENTE:	UNAC - FIEE		
PROYECTO:	PLAN MAESTRO TERMINAL CHIMBOTE		
PLANO:	UBICACION DE LECHO ANÓDICO PLANTA		
COD. PROJ. CLIENTE:	Nº PLANO:	HOU:	REV:
		1 DE 1	