

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Diseño de un sistema de protección anticorrosiva integral para instalar en
un acueducto manufacturado en hierro dúctil

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Materiales

Presentado por:

Bryan Slather Perero Segarra

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mi mamá que sin importar las dificultades pudo sacar nuestra familia adelante permitiendo que pueda culminar mis estudios, mis abuelos por haberme criado y crear las bases de la persona que soy ahora, a mi hermana por haberme acompañado en esta travesía y a muchas personas que fueron parte del recorrido, pero no lograron estar cuando llegué a la meta. En especial a mi mamá Yolanda Domínguez, espero haber alcanzado las expectativas que alguna vez tuviste de mí y que desde donde estés puedas verme lograr lo que tanto te prometí, pero no alcanzaste a ver.

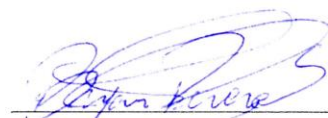
AGRADECIMIENTOS

Agradezco al PhD. Clotario Tapia que fue el que me incursionó en el campo de los materiales, varios profesores que fueron de gran aporte en mi formación académica, a mis amigos de carrera con quienes nos esforzábamos para alcanzar esta meta y a ESPOL por darme la oportunidad de vivir esta experiencia obteniendo como regalo muchas personas de valor.

Gracias al DreamTeam, al TeamAmanecidas, pero en especial al TeamCeibo. Julio y María han sido grandes personas con quienes he cursado gran parte de estos últimos 2 años de carrera, son personas increíbles y espero tener la oportunidad de seguir compartiendo parte de nuestra vida para continuar creciendo juntos como lo hemos hecho desde mediados de la pandemia. Les deseo el mejor de los éxitos en lo que se propongan y recuerden que “vida solo hay una”.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Bryan Slather Perero Segarra y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Bryan Perero Segarra

EVALUADORES

.....
PhD. Clotario Tapia Bastidas

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
MSc. Julián Peña Estrella

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La corrosión es un problema que afecta de manera considerable a la economía global por los valores que representan tomar acciones correctivas antes los daños causados. El presente proyecto trata del diseño de un sistema de protección anticorrosivo para una estructura enterrada con una longitud aproximada de 22 km formada por tuberías de hierro dúctil que transporta agua potable desde la planta hasta zonas residenciales para el sector noroeste de la ciudad asegurando la integridad de la obra según la agresividad del suelo.

El diseño se elaboró según los requerimientos de la estructura acorde a zonas con resistividades bajas que ameritaban protección a través de la norma ASTM G57-95. Estos valores definieron las zonas de interés para aplicar alternativas al sistema de protección siendo seleccionado como opción viable la protección catódica por corriente impresa en base a normas y guías como NACE CP4, ISO 2531, SP-13110 y ciertos libros que documentan información sobre la implementación del sistema de protección. Se obtuvo como resultado un rectificador de 60V con 30A, juntas de soldadura aluminotérmicas acorde a la cantidad de tuberías, metraje de cable de calibres AWG 1/0, 8 y 6, entre otras unidades.

Se concluye que el diseño es viable al compararse con el acero como principal competencia, dado que en cuestión del sistema de protección no existe mayor variación. Sin embargo, al analizar desde un marco global se determinó que el precio del proyecto es mayor dado que las tuberías de hierro dúctil son más costosas que las de acero.

Palabras Clave: Protección catódica, corriente impresa, hierro dúctil, agresividad del suelo.

ABSTRACT

Corrosion is a problem that considerably affects the global economy due to the values that take corrective actions before the damage caused. This project deals with the design of an anticorrosive protection system for a buried structure with an approximate length of 22 km formed by ductile iron pipes that transports drinking water from the plant to residential areas for the northwest sector of the city, ensuring the integrity of the work according to the aggressiveness of the ground.

The design was developed according to the requirements of the structure according to areas with low resistivities that deserved protection through the ASTM G57-95 standard. These values defined the areas of interest to apply alternatives to the protection system, with impressed current cathodic protection being selected as a viable option based on standards and guides such as NACE CP4, ISO 2531, SP-13110 and certain books that document information on implementation. of the protection system. The result was a 60V rectifier with 30A, exothermic welding joints according to the number of pipes, cable footage of AWG 1/0, 8 and 6 gauges, among other units.

It is concluded that the design is viable when compared with steel as the main competition, given that in terms of the protection system there is no greater variation. However, when analyzing from a global framework, it was determined that the price of the project is higher since ductile iron pipes are more expensive than steel pipes.

Keywords: *Cathodic protection, impressed current, ductile iron, soil aggressiveness.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Marco teórico.....	3
1.4.1 Costo de la corrosión	3
1.4.2 Influencia de las condiciones ambientales en el diseño del acueducto	3
1.4.3 Propiedades del suelo	4
1.4.4 Corrosión en suelos	5
1.4.5 Técnicas de protección anticorrosivas	7
1.4.6 Influencia del material en el diseño de protección contra la corrosión	11
1.4.7 Métodos de conexión eléctrica entre tuberías.....	11
CAPÍTULO 2.....	12
2. Metodología	12
2.1 Estudio de suelo	12
2.1.1 Resistividad y clasificación del suelo	12

2.2	Selección de método de protección contra la corrosión	12
2.2.1	Protección catódica por ánodos de sacrificio (PCAS).....	12
2.2.2	Protección catódica por corriente impresa (PCCI)	13
2.2.3	Recubrimientos	13
2.3	Selección de método para unión eléctrica de tuberías	15
2.4	Consideraciones de diseño	16
2.4.1	Características de tubería	16
2.4.2	Características del ánodo	16
2.4.3	Calibres de cables	17
2.4.4	Limitaciones de zonas de aplicación y distanciamiento entre estructuras del sistema PCCI	17
2.5	Sistema de PCCI para tuberías enterradas.....	17
2.5.1	Requerimientos de corriente	18
2.5.2	Resistencia eléctrica del sistema de protección tuberías.....	19
2.6	Determinación de Voltaje requerido y selección de rectificador	21
2.7	Esquema para determinación de costos de proyecto.....	22
2.7.1	Materiales utilizados	22
CAPÍTULO 3.....		23
3.	Resultados y análisis	23
3.1	Propuesta de protección.....	23
3.1.1	Resistividad de suelo	23
3.1.2	Ubicación y distanciamiento de equipos	24
3.1.3	Resultados del diseño de PC.....	24
3.2	Lista de materiales y costo estimado de procura de materiales-equipos	26
3.3	Normativas a considerar en el desarrollo del proyecto.....	27
3.4	Análisis de propuestas desarrolladas	28
3.4.1	Técnico	28

3.4.2	Económico	30
3.4.3	Comparación entre diseños de estructuras	30
CAPÍTULO 4.....		32
4.	Conclusiones y recomendaciones	32
4.1	Conclusiones.....	32
4.2	Recomendaciones.....	33
BIBLIOGRAFÍA.....		34
APÉNDICES.....		37

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing Materials
NACE	National Association of Corrosion Engineer
CSE	Electrodo de Cofre – Sulfato de cobre
CC	Corriente Continua
CA	Corriente Alterna
PIB	Producto Interno Bruto
AWWA	American Water Works Association
API	American Petroleum Institute
BSEN	British Standards European Norm
CSA	Canadian Standards Association
ISO	International Standard Organization
PCAS	Protección catódica por ánodos de sacrificio
PCCI	Protección catódica por corriente impresa
MMO	Mixed Metal Oxide
AWG	American Wire Gauge

SIMBOLOGÍA

pH	Potencial de hidrógeno
m	Metro
mm	Milímetro
mV	Milivoltio
Cu	Cobre
A	Amperios
Ω	Ohm
km	Kilometro
DN	Diámetro nominal
V	Voltio

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Sectores económicos para los cinco países utilizados en el Estudio del Costo Global de la Corrosión	3
Figura 1.2. Mediciones de resistividad en el campo	4
Figura 1.3. Fenómeno de corrosión en la superficie de la tubería.....	6
Figura 1.4. Recubrimiento epóxico para protección de tuberías enterradas.	9
Figura 1.5. Esquema de cómo funciona un sistema de protección catódica	10
Figura 1.6. Tuberías de hierro dúctil.....	11
Figura 2.1. Esquema de ejecución de método de protección anticorrosivo según el proceso seleccionado	14
Figura 2.2. Esquemización de sistema de protección catódica.	18
Figura 2.3. Representación gráfica de la tubería y resistencias a considerar por recubrimientos	21
Figura 3.1. Gráfico representativo de los valores de resistividad obtenidos en el recorrido donde se ubica el ramal de tuberías. Datos proveídos por la empresa para el diseño del sistema de protección.....	23
Figura 3.2. Área geográfica adecuada para la ubicación del sistema PCCI	24
Figura 3.3. Esquema de distanciamiento entre equipos que conforman el sistema de PCCI-Vista superior	25
Figura 3.4. Esquema de distanciamiento entre equipos que conforman el sistema de PCCI-Vista seccional.....	25
Figura 3.5. Posicionamiento geográfico dentro del área delimitada de la Subestación eléctrica de Chorrillos	26

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Categorización de la corrosión del suelo en función de la resistividad	4
Tabla 1.2. Agresividad del suelo según puntuación de variables	6
Tabla 1.3. Calificación para cada variable según las medidas tomadas del suelo	7
Tabla 1.4. Resumen de normativas aplicadas para recubrimientos y revestimientos de tuberías.....	8
Tabla 2.1. Matriz de decisión para selección del método de protección anticorrosión ..	15
Tabla 2.2. Matriz de decisión para selección de método de continuidad eléctrica	15
Tabla 2.3. Requerimientos para el diseño del sistema de protección catódica	16
Tabla 3.1. Resultados obtenidos a partir del cálculo según las variables de diseño.	26
Tabla 3.2. Presupuesto acorde a los requerimientos del proyecto	27
Tabla 3.3. Recopilación de normas utilizadas en el desarrollo del proyecto	28

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

La población en la ciudad se ha ido incrementando progresivamente en los últimos años, actualmente la densidad poblacional ha generado una expansión de las zonas urbanas en la periferia de la ciudad generando invasiones y asentamientos informales donde antes solo eran zonas libres de contacto humano. Este crecimiento informal y acelerado en Guayaquil ha provocado que entidades municipales tomen acciones para ir solventando los problemas que se van generando, entre estos se encuentra que las zonas donde se proyecta futuras asentamientos que no poseen los servicios públicos necesarios para una calidad de vida apropiada por lo que se ven en la necesidad generar proyectos en los que se busque crear infraestructuras para la instalación y distribución de servicios básicos.

El Acueducto V es una propuesta que tiene como proyección el abastecer de agua potable el sector noroeste de la ciudad, consiste en la instalación de un sistema de tuberías que conecten directamente de la “Planta la Toma” con unos ramales ya existentes a la altura de “Mi Lote” y creen ramales para proveer a nuevos sectores. La distribución de tuberías para el Acueducto V se especifica en el apéndice A, la longitud de todo el ramal es de aproximadamente 22 km.

Dada la magnitud del proyecto, el interés del cliente es asegurarse que la obra posea una durabilidad acorde a los costos que representa su ejecución. Muchos proyectos similares, ya ejecutados, han tenido problemas por cuestiones de averías del sistema de tuberías metálicas afectando el abastecimiento de agua potable a diferentes zonas de la urbe, por lo que se requiere prever estos tipos de incidentes en el nuevo acueducto. Los daños por corrosión generan pérdidas de alto impacto dado que destruyen a lo largo del tiempo las estructuras enterradas, se requiere un sistema de protección que asegure la integridad de la tubería ante los fenómenos de corrosión.

El sistema de protección debe prever el desgaste acelerado producido por el ambiente corrosivo generado por el suelo, disminuyendo así la probabilidad de daños a corto - mediano plazo de tal manera que se asegure que no exista daños prematuros debido a la degradación de las tuberías, ya que su respectiva reparación que solo generaría

gastos no previstos. Buscando así garantizar que el acueducto cumpla con las expectativas de vida útil y que asegure la continuidad del servicio a toda la ciudad.

1.2 Justificación del problema

Las estructuras metálicas ferrosas enterradas están sujetas a la corrosión. Los procedimientos adecuados de control de la corrosión pueden reducir o eliminar la pérdida de metal para lograr una operación segura y económica. Para nuevos sistemas de tubería, en el diseño inicial, se debe proporcionar un método comprobado de control de la corrosión, el cual se debe mantener durante la vida útil del sistema de tuberías, a menos que las investigaciones indiquen que no se requiera el control de la corrosión. El control de la corrosión externa debe ser una consideración primaria durante el diseño de un sistema de tuberías. Puesto que no es factible encontrar revestimientos perfectos, la protección catódica debe ser utilizada en conjunto con los revestimientos para extender la protección contra la corrosión.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de protección contra la corrosión para tuberías de hierro dúctil que se instalarán bajo suelo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Evaluar las alternativas de sistemas anticorrosivos seleccionando el o los óptimos a implementar en acueductos de la ciudad de Guayaquil para el establecimiento de un diseño acorde a la necesidad.
- Elaborar listado de requisitos a cumplir por el diseño recopilando normas nacionales y/o internacionales para sistemas de protección catódica para acueductos manufacturados en hierro dúctil.
- Diseñar un sistema de protección catódica para acueductos de hierro dúctil enterrados partiendo de un estudio del entorno y restricciones del proyecto para ajustarlo a los requerimientos del cliente.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Costo de la corrosión

La corrosión es un problema con el que el campo ingenieril viene luchando desde hace muchos años dado que el diseño de un producto o proyecto puede verse afectado por la influencia de este en el caso de que no sea controlado. En el 2013 se realizó un estudio en donde se determinó el costo que representa la corrosión desde el marco global es de \$2.5 trillones lo cual es el 3.4% del PIB, de los cuales se puede ahorrar un 15 a 35% del costo global si se realizan prácticas preventivas de corrosión y reducir la cantidad de problemas que se suelen suscitar por daños parciales o completos[1]. Aquí recae la importancia de eliminar o reducir en gran medida los daños causados por la corrosión en estructuras metálicas, sobre todo las que prestan servicios a la sociedad como los son tuberías de transporte de agua potable.

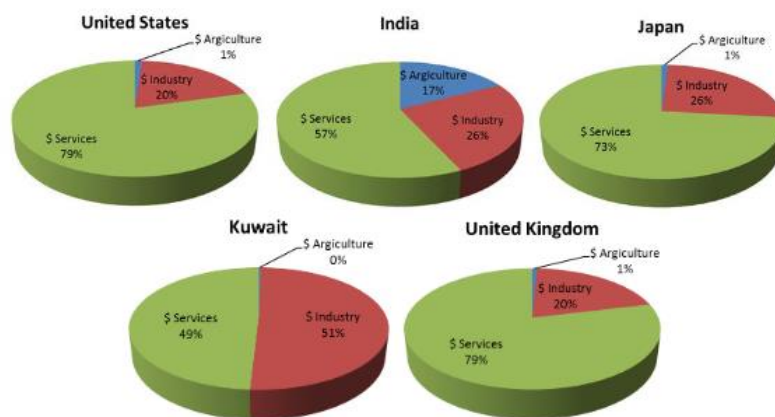


Figura 1.1. Sectores económicos para los cinco países utilizados en el Estudio del Costo Global de la Corrosión

1.4.2 Influencia de las condiciones ambientales en el diseño del acueducto

El estado de algún objeto se ve influenciado por el entorno donde se encuentra situado, por esto se debe considerar las condiciones ambientales al momento de diseñar un proyecto para asegurar su durabilidad en condiciones de servicio. Se realizan estudios para determinar qué factores influyen en la magnitud y la velocidad de degradación de materiales, los controles se realizan constantemente por ello los análisis se han cambiado de hacerse en periodos largos a más cortos dependiendo de la variabilidad de las condiciones del sitio[2]. El tener condiciones climáticas no adecuadas para determinadas estructuras metálicas puede desembocar la corrosión acelerada según la existencia de componentes contaminantes provenientes del ambiente y la temperatura

del entorno[3]. Por estas razones se debe considerar las características del medio donde se desarrolla el acueducto para establecer variables con las cuales se inicia el diseño de la estructura asegurando su integridad durante el tiempo de trabajo estimado.

1.4.3 Propiedades del suelo

Resistividad eléctrica

El acueducto es subterráneo por lo que las características del suelo donde se posiciona influyen en el diseño del proyecto, dentro de las variables a tomar en cuenta se encuentra la conductividad del suelo o su contraparte que es la resistividad. La definición varía si se habla de absoluta o relativa, pero ambas hacen referencia a resistividad eléctrica (ρ) que es la relación que existe entre la diferencia de potencial con la densidad de corriente que circula por un material específico, en este caso se refiere a un segmento del suelo, se encuentra medido en función (Ωm). Los principales factores que influyen en la resistividad son el tipo de suelo, composición química, humedad relativa, temperatura del suelo, compactación, composición y concentración de sales diluidas[4]. En la tabla 1.1 se establece una categorización del nivel de corrosividad del suelo según la resistividad extraído del Corrosion Handbook, Uhlig [5].

Tabla 1.1. Categorización de la corrosión del suelo en función de la resistividad

Rango de resistividad [Ωm]	Corrosividad
0 - 1000	Muy severo
1001 - 2000	Severo
2001 - 5000	Moderado
5001 - 10000	Ligero
10000 <	Muy Ligero



Figura 1.2. Mediciones de resistividad en el campo

Propiedades químicas

La influencia de las propiedades químicas de los suelos depende de los componentes o minerales por los cuales se encuentra compuesto y por los minerales que se encuentran diluidos en el agua presente ya que las sales disueltas en el agua afectan en la conductividad eléctrica. Acorde a la presencia de determinados minerales se tiene una clasificación donde un grupo son las arcillas, arena, carbonatos y evaporites[6].

Nivel de pH

Las condiciones del suelo también se ven afectadas por el nivel de pH el cual tiene un rango típico, este varía entre el 3.5 y 10. La contribución del pH es notable cuando sus valores son menores a 4, cuando supera este mínimo el ambiente se vuelve mucho más corrosivo en materiales ferrosos[5]. Los rangos típicos de pH su influencia en el nivel de acidez no contribuye mucho a la corrosión y es dependiente de otras variables [7].

Potencial Redox

Este término hace referencia a la tendencia que presenta un material a adquirir electrones y poder reducirse, se mide a través de un voltaje el cual relaciona el electrolito y el material analizado, por tanto, los valores de potencial no dependen solo de a quien se le mide el potencial sino cual es el medio en el que se encuentra[8].

1.4.4 Corrosión en suelos

Corrosión en metales enterrados

Las estructuras metálicas enterradas son objeto de reacciones químicas y/o electroquímicas debido a la naturaleza del material y del medio donde se encuentra. En el caso de los acueductos se tiene que el medio electrolítico es el suelo húmedo, la superficie metálica funciona como ánodo y cátodo a la vez en diferentes zonas, por último, la conexión existe ya directamente al ser un mismo cuerpo. La corrosión se llevará a cabo siempre que haya diferencia de potencial entre las zonas anódicas y catódicas en el área superficial de la tubería. Hay varios métodos para proteger la integridad de la estructura y evitar daños acelerados por la degradación, entre las más comunes se encuentran variedades de recubrimientos y protección catódica por corriente impresa o por ánodos de sacrificio [9].

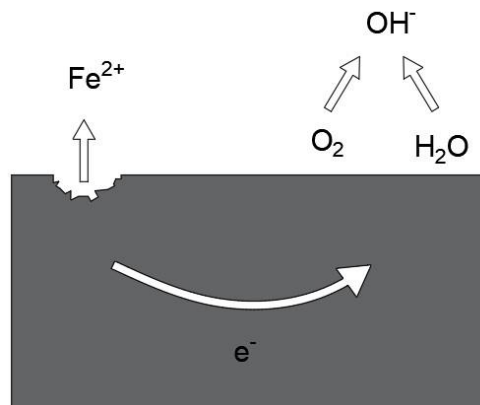


Figura 1.3. Fenómeno de corrosión en la superficie de la tubería.

Agresividad del suelo

El determinar que un suelo es o no agresivo depende de la resistividad, potencial redox y del pH en gran medida. Sin embargo, es muy común encontrarla solo en función de la resistividad por lo que esta resulta ser la variable de mayor interés al momento de realizar un estudio de suelo, dado que da una mayor aportación al momento de categorizar el tipo de agresividad del suelo. La escala de real para cuantificar el nivel de agresividad se da en función de la tabla 1.2 en donde se toma en cuenta las variables de mayor aporte y se analizan para darle la calificación adecuada de agresividad según la valoración en la escala de la tabla 1.3 obtenida de la norma AWWA C105 - Polyethylene Encasement for Ductile-Iron Pipe Systems[10].

Tabla 1.2. Agresividad del suelo según puntuación de variables

Suma de puntos (s)	Agresividad
$10 \leq s$	Muy corrosivo
$8 \leq s \leq 10$	Corrosivo
$5 \leq s \leq 8$	Moderado
$2 \leq s \leq 5$	Poco corrosivo
$0 \leq s \leq 2$	Muy poco Corrosivo

Tabla 1.3. Calificación para cada variable según las medidas tomadas del suelo

Parámetros del suelo	Asignación de puntos
Resistividad [Ωcm]	
<700	10
700-1000	8
1000-1200	5
1200-1500	2
1500-2000	1
>2000	0
pH	
0-2	5
2-4	3
4-6,5	0
6.5-7.5	0
7.5-8.5	0
>8.5	3
Potencial Redox [mV]	
>100	0
50-100	3.5
0-50	4
<0	5
Humedad	
Siempre Húmedo	2
Generalmente Húmedo	1
Generalmente Seco	0

1.4.5 Técnicas de protección anticorrosivas

Recubrimientos

Generalmente las tuberías vienen con sistemas de protección basados en revestimientos que proveen cierta resistencia reduciendo la velocidad de corrosión. La protección por revestimientos varía según el tipo de material con el que está hecha la estructura, estos se realizan en base a normas específicas. En la tabla 1.4 se muestra un resumen de las normas típicas asociadas a los recubrimientos externos que se aplican a tuberías y uniones.

Tabla 1.4. Resumen de normativas aplicadas para recubrimientos y revestimientos de tuberías

Standard	Título
AWWA C203	Coal-tar protective coatings and linings for steel water pipes
AWWA C210	Liquid-epoxy coating systems for the interior and exterior of steel water pipelines
AWWA C214	Tape coating system for the exterior of steel water pipelines
AWWA C217	Petrolatum and petroleum wax tape coatings for the exterior of connections and fittings for steel water pipelines
AWWA C225	Fused polyolefin coating systems for the exterior of steel water pipelines
API RP 5L9	External fusion-bonded epoxy coating of line pipe
BS EN 10300	Steel tubes and fittings for onshore and offshore pipelines. Bitumen hot applied materials for external coating
BSEN 12068	External organic coatings for the corrosion protection of buried or immersed steel pipelines used in conjunction with cathodic protection—tapes and shrinkable materials
CSA Z245.20	Plant-applied external fusion-bonded epoxy coating for steel pipe
CSA Z245.21	Plant-applied external PE coating for pipe
CSA Z245.22	Plant-applied external polyurethane foam insulation coating for steel pipe
CSA Z245.30	Field-applied external coatings for steel pipeline systems
ISO 21809-1	Petroleum and natural gas industries—External coatings for buried or submerged pipelines used in pipeline transportation systems—Part 1: Polyolefin coatings (3-layer PE and 3-layer PP)
ISO 21809-2	Petroleum and natural gas industries—External coatings for buried or submerged pipelines used in pipeline transportation systems—Part 2: Single layer fusion-bonded epoxy coatings
ISO 21809-3	Petroleum and natural gas industries—External coatings for buried or submerged pipelines used in pipeline transportation systems—Part 3: Field joint coatings
ISO 21809-4	Petroleum and natural gas industries—External coatings for buried or submerged pipelines used in pipeline transportation systems—Part 4: Polyethylene coatings (two-layer PE)
ISO 21809-5	Petroleum and natural gas industries—External coatings for buried or submerged pipelines used in pipeline transportation systems—Part 5: External concrete coatings
NACE SP0394	Application, performance, and quality control of plant-applied single layer fusion-bonded epoxy external pipe coating

A pesar de que la estructura se puede encontrar protegida por recubrimientos, se ha experimentado que durante la manipulación al momento de instalar se malogra de alguna manera dando como resultado zonas donde el recubrimiento se pierde. Esto genera zonas de sensibilidad en las cuales se promueve la corrosión localizada y resulta ser más agresiva que si afectara a la estructura completa por lo que muchos sistemas al

momento de instalar utilizan métodos de protección adicionales para proveer la sostenibilidad del proyecto como son mangas de polietileno, protección anódica o protección catódica [11].



Figura 1.4. Recubrimiento epóxico para protección de tuberías enterradas.

Protección catódica (PC)

Un sistema de PC consiste en proveer protección a una estructura que en condiciones de servicio presenta un estado de degradación, se inyecta una corriente en sentido contrario con la magnitud necesaria para contrarrestar la que provoca la corrosión y puede ser proveída por diferentes métodos[12]. Dado que la situación en donde se desarrollará el acueducto no es posible alterar el medio y se buscan alternativas para no manipular la superficie se termina optando por dos metodologías conocidas como protección por ánodos de sacrificio o por corriente impresa.

Protección catódica con ánodos de sacrificio

Consiste en la adición de un elemento menos noble según la serie galvánica como electrodo al circuito en donde ahora el material que se comportará como ánodo será el electrodo adicionado. Las dimensiones del ánodo de sacrificio y el tipo de material que se utiliza dependerá del diseño del sistema a proteger, del tiempo y la corriente a proveer para anular los efectos corrosivos en la estructura. No se requiere de una fuente energética, solo de materiales de sacrificio donde predominan normalmente ánodos de zinc o de magnesio [13].

Protección catódica con corriente impresa

Para este sistema de protección se utiliza una fuente de voltaje con CC que provea la corriente necesaria para la estructura. Dado que las principales fuentes proveen CA, se hace uso de un rectificador el cual convierte a CC para poder ser suministrado a la

tubería, la magnitud de la corriente impresa debe ser estimada en función de los requerimientos de diseño del sistema de protección [14]

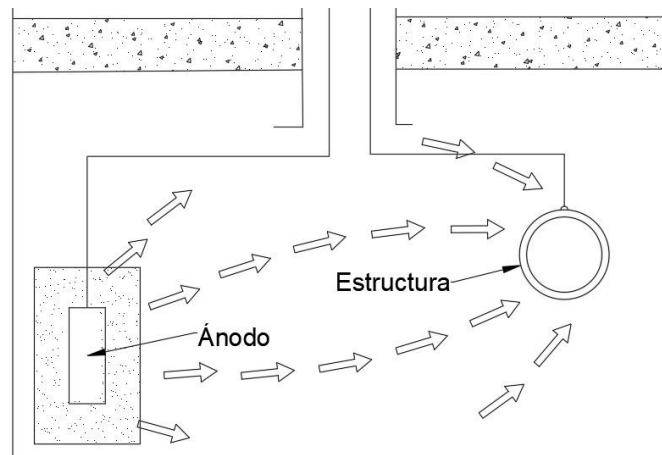


Figura 1.5. Esquema de cómo funciona un sistema de protección catódica

Criterios para asegurar la protección de la estructura

La protección catódica utiliza como base la inyección de corriente necesaria para mantener la estructura protegida. Se suelen utilizar valores de densidad de corriente referenciales que se han usado en condiciones similares en otros sistemas de protección, pero al momento de proveer el amperaje se va ajustando dado que la agresividad del suelo depende de muchas variables. Estos ajustes se lo realizan en bases a criterios que aseguren que la estructura se encuentre protegida, los criterios dependen del material con el que está fabricado la estructura. Para tuberías fabricadas de acero o hierro fundido se considera el criterio de -850 mV [15].

Este criterio debe cumplir los siguientes puntos:

- El potencial negativo debe tener un valor de al menos -850 mV con la protección catódica. El potencial debe ser medido con un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre saturado en contacto con el electrolito. Se debe considerar las caídas de voltaje a lo largo de la estructura para una interpretación válida de esta medición
- Un potencial polarizado negativo con una magnitud de -850 mV como mínimo referente a un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre saturado
- Debe tenerse como valor mínimo de -100 mV de polarización catódica entre el electrodo de referencia estable que se encuentra en contacto con el electrolito y la superficie de la estructura.

Esta información se basa en la norma NACE RP0169, sección 6 donde se muestra también para otros sistemas diferentes del hierro fundido y acero [16].

1.4.6 Influencia del material en el diseño de protección contra la corrosión

El tipo de material con el cual está fabricado la tubería modifica las variables de diseño de la protección catódica ya que cada uno posee diferentes propiedades, las cuales son requeridas para las especificaciones de protección. El análisis del sistema de protección se remite al uso de hierro dúctil como material a proteger y para el diseño de protección aplicada en las tuberías se tiene en consideración la corriente necesaria para poder proteger la cantidad de tubería, esto es en función de la densidad de corriente requerida para la protección en el hierro dúctil. Según el estudio realizado por Kroon, se establece que el valor de densidad recomendada para el hierro dúctil es de $1\mu A/cm^2$, lo que equivale a $10 mA/m^2$ para tuberías de hierro dúctil desnudas [17]



Figura 1.6. Tuberías de hierro dúctil

1.4.7 Métodos de conexión eléctrica entre tuberías

La protección de las tuberías se realiza en función del área superficial del sistema, dado que son varios kilómetros de estructura se debe minimizar la cantidad de material requerido. No es favorable tener equipos para unidad por tal motivo se conectarán las tuberías mediante cables estableciendo una continuidad eléctrica reduciendo la cantidad de equipos requeridos. Los tipos de uniones existentes para puentear las tuberías son las conexiones mecánicas, soldadura convencional, soldadura aluminotérmica, adhesivos conductores, soldadura suave y dura[18].

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Estudio de suelo

Se tuvo que realizar un análisis de las condiciones del suelo dado que era crucial conocer sus variables para identificar que tan corrosivo es el entorno. Existen varios criterios a tomar en cuenta para la delimitación de la agresividad del suelo, pero se consideró la de mayor contribución al momento de categorizar el ambiente.

2.1.1 Resistividad y clasificación del suelo

Dado la trayectoria por el cual pasa la tubería, se establecieron puntos de medición de resistividad del suelo, estos fueron tomados de manera equidistantes y con los datos se realizó un perfil de resistividad para conocer la agresividad del suelo. Se procedió realizando un recorrido por donde pasará la estructura, se tomaron valores de resistividad cada 500 metros en los 8 km a profundidades de 150, 300 y 500 cm. En el apéndice A establece todo el tramo de la obra, pero para el estudio se escoge los primeros kilómetros que se muestran en el apéndice B donde se observa el recorrido de la tubería desde la planta la toma hasta la bifurcación al final del recorrido. El procedimiento se realizó en base a la norma ASTM G57-95a [19]. Se categoriza el suelo según la resistividad promedio presente en el recorrido con la tabla 1.1

2.2 Selección de método de protección contra la corrosión

Para la selección del método anticorrosivo óptimo se tuvo que realizar un análisis de requerimiento de corriente para proteger la estructura, esto dependía del material con el que está hecho, geometrías, cantidad de tuberías y recubrimientos. Posterior a la determinación de la corriente se analiza cada procedimiento y como pueden eliminar o reducir en gran medida el fenómeno de corrosión.

2.2.1 Protección catódica por ánodos de sacrificio (PCAS)

El procedimiento para aplicar la protección catódica es el similar para ambos métodos, en este caso importa el tipo de ánodos a utilizar de acuerdo con la corriente que puedan aportar por unidad y según eso el número para poder cumplir con el requerimiento mínimo de protección del sistema de tubería. Sin embargo, estos deben ser renovados después de determinado tiempo y al ser consumibles no genera rentabilidad a largo plazo

por las dimensiones del cátodo. Se necesitaría tener una renovación de ánodos de forma recurrente, generando gastos fijos de mantenimiento que limitan su autonomía[13].

2.2.2 Protección catódica por corriente impresa (PCCI)

Aplicando esta metodología se parte de la misma base que con ánodos de sacrificio, según los requerimientos de corriente se seleccionan los tipos y la cantidad para conformar el o los lechos anódicos. Dado que se debe hacer uso de rectificadores se debe determinar el voltaje requerido el cual se obtiene con ayuda de la resistencia total del circuito, aquí se hace un análisis para determinar la cantidad óptima de rectificadores, cantidad de lechos anódicos y sus posiciones ya que se puede reducir el costo de inversión. Su mantenimiento es más factible y no es muy recurrente lo que lo hace más autónomo [13].

2.2.3 Recubrimientos

Las tuberías vienen con ciertos recubrimientos que aíslan el material del medio aportando protección, estos tienen cierta efectividad que reducen los requerimientos de corriente por tanto se disminuye la velocidad de corrosión y se extiende la vida útil. Hay recubrimientos de alta efectividad y en la mayoría de los casos se usan más de uno por lo que genera mejor aislamiento. Sin embargo, el no tener cuidado al momento de instalar las tuberías produciría picaduras en pequeñas zonas lo que generaría una corrosión acelerada y localizada generando daños en la estructura en periodos cortos [13].

Según varios proyectos realizados se puede contrastar acerca de cuál de las metodologías es la más adecuada para el proyecto. En una comparativa donde se discute diferentes criterios, se tiene que la corriente impresa resulta más económica, no existe la necesidad de renovar constantemente los bancos de ánodos de sacrificio y aporta de manera positiva en el mantenimiento integral de la estructura, la contraparte es que debe ser monitoreado por sistemas de control para verificar que los requerimientos de voltaje se cumplan y darle mantenimiento en ocasiones.

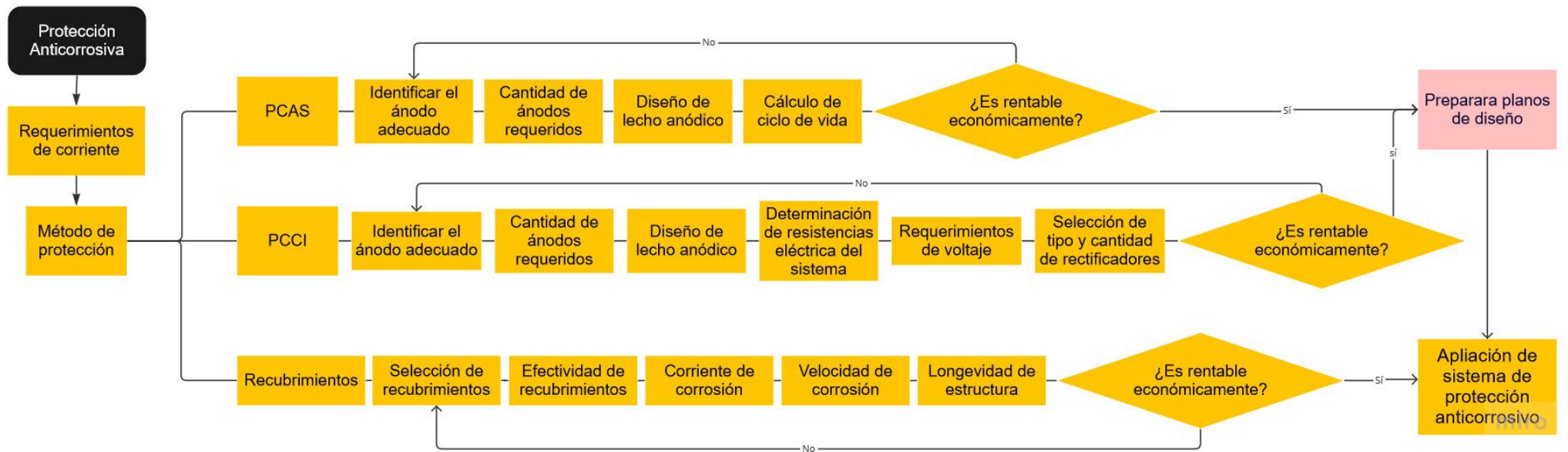


Figura 2.1. Esquema de ejecución de método de protección anticorrosivo según el proceso seleccionado

Tabla 2.1. Matriz de decisión para selección del método de protección anticorrosión

		Ponderación	Métodos de protección					
			Recubrimiento		PCAS		PCCI	
Criterios	Efectividad	0.30	7	2.10	9	2.70	10	3.00
	Rentabilidad	0.25	9	2.25	8	2.00	6	1.50
	Durabilidad	0.25	7	1.75	6	1.50	8	2.00
	Mantenimiento	0.20	4	0.80	6	1.20	9	1.80
	Puntuación	1.00	6.90		7.40		8.30	

Acorde a la matriz de la tabla 2.1 se definió que la metodología que alcanza una mayor calificación es la PCCI, por tanto, es la que se desarrolló como sistema de anticorrosivo para la obra del acueducto

2.3 Selección de método para unión eléctrica de tuberías

El método que se estableció para la continuidad eléctrica influye en la rentabilidad económica, según la matriz de la tabla 2.2 se obtuvo que la soldadura aluminotérmica es la más calificada para el proceso además que se fundamenta en base a la experiencia de varios proyectos anteriores [20]. Según la norma europea EN 13636, se establecen criterios para la selección del diámetro de cable que se usa para la conexión entre tuberías el cual consiste que al menos debe tener un mínimo de 10 mm^2 de área transversal [21].

Tabla 2.2. Matriz de decisión para selección de método de continuidad eléctrica

		Ponderación	Métodos de continuidad									
			Conexión mecánica		Soldadura Convencional		Soldadura aluminotérmica		Soldadura blanda y dura		Adhesivos conductores	
Criterios	Efectividad	0.35	8	2.80	7	2.45	9	3.15	6	2.10	6	2.10
	Rentabilidad	0.30	10	3.00	7	2.10	8	2.40	7	2.10	3	0.90
	Riesgo	0.35	4	1.40	6	2.10	8	2.80	7	2.45	4	1.40
	Puntuación	1.00	7.20		6.65		8.35		6.65		4.40	

2.4 Consideraciones de diseño

En base al seguimiento que se le ha dado al proyecto con el cliente se establecieron ciertas delimitaciones que influyeron en el diseño del sistema de protección entre ellas se encuentra la delimitación de la tubería con especificaciones técnicas, el tipo de ánodo que se seleccionó para la aplicación del sistema de protección, el calibre del cable con el que se realizará las conexiones, limitaciones de donde se aplicará y distanciamiento entre estructuras que comprenden el sistema de protección.

2.4.1 Características de tubería

Dada las especificaciones del cliente se establecieron los parámetros en función del diámetro y el material especificado. El diseño de la tubería se fundamenta en un proyecto que se encuentra en desarrollo el cual lo está elaborando otro estudiante en función de directrices análogas al proyecto por el mismo cliente [22]. En tabla 2.3 se muestra las características de dimensiones relevantes para el desarrollo del proyecto.

Tabla 2.3. Requerimientos para el diseño del sistema de protección catódica

		Material de Tubería para proteger	Hierro Dúctil
Geometría		Diámetro Nominal de Tubería	DN2000
		Espesor	21.8 [mm]
		Diámetro exterior	2082 [mm]
		Longitud	8150 [mm]
		Diámetro exterior	2082 [mm]
Recubrimientos	Externo	Pintura epóxica	1000 [μ m]
		Zincado	75 [μ m]
	Interno	Cementado	9000 [μ m]

2.4.2 Características del ánodo

Para la selección del ánodo se hizo uso de documentación basada en la norma ASTM B338-3 mostrado en el apéndice C. Aquí se muestra dimensión, valores de aporte, cables con los que vienen conectados y otras especificaciones para aplicaciones de PCCI[23]. Se observó que al ser una longitud de estructura no tan extensa es más accesible y manejable el tener ánodos más económicos por tener menores requerimientos energéticos.

2.4.3 Calibres de cables

Se debe establecer un cable acorde al requerimiento de corriente con el objetivo de tener la menor resistencia eléctrica posible. La selección se hace acorde a los parámetros que establecen documentos basados en las normas de dimensionamiento según American Wire Gage (AWG), se anexa un segmento en el apéndice D. En base a experiencia de proyectos anteriores ejecutados por el cliente se establece que el espesor mínimo de cable debe ser de AWG 1/0 para los tramos soldados ya que estos poseen una sección transversal mayor a $10 [mm^2]$. Adicional, se considera que la identificación es acorde al amperaje requerido, pero los valores máximos permisivos siguen siendo menores a los requerimientos de corriente por lo que se puede obviar esta limitación. [24].

2.4.4 Limitaciones de zonas de aplicación y distanciamiento entre estructuras del sistema PCCI

Se estableció que las zonas que requerirán PCCI serán aquellas que tenga valores de resistividad menores a $750[\Omega.cm]$ y según los resultados del perfil de resistividad se verificó donde será necesario y que zonas estarían sujetas a alternativas de protección. Para la ubicación de las estructuras se definieron puntos como el tipo de ubicación de lecho anódico, estos presentaron una distribución equiespaciada con orientación vertical esto influye en la resistencia del sistema, y la distancia del lecho anódico-estructura, la cual en base a proyectos anteriores se han definido con valores mínimos de $90 [m]$

2.5 Sistema de PCCI para tuberías enterradas

El sistema de protección consta de la estructura a proteger que son las tuberías metálicas, un rectificador que es el que provee la corriente requerida para salvaguardar la estructura, una caja de unión y el lecho anódico. Se esquematiza en la figura 2.2 en donde se identifican las partes que lo componen. [25].

El diseño de protección catódica se apegó al siguiente procedimiento:

1. Determinación de corriente para los segmentos de tubería a proteger
 - a. Cantidad de tuberías a proteger
 - b. Área superficial de estructura a proteger
 - c. Obtención de requerimientos de corriente
2. Realizar un diagrama de distribución de equipos, tomar en cuenta:
 - a. Uniones soldadas
 - b. Ubicación de lecho anódico y cantidad de ánodos

- c. Ubicación y cantidad de rectificadores
- 3. Determinación de la resistencia total de la estructura
 - a. Resistencia del lecho anódico
 - b. Resistencia por las tuberías y recubrimientos
 - c. Resistencia debido a las uniones a partir de los cables según el diagrama de distribución de equipos.
- 4. Determinación de voltaje requerido para la selección del tipo y cantidad de rectificadores

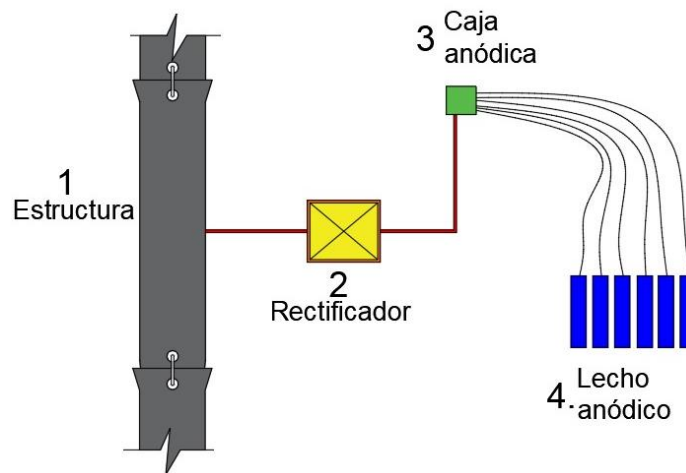


Figura 2.2. Esquemización de sistema de protección catódica.

2.5.1 Requerimientos de corriente

El proceso de diseño empieza con la estimación de la cantidad de corriente requerida para proteger las tuberías. La protección catódica consiste en proveer al sistema la cantidad de corriente necesaria y está cuantificada en la densidad de corriente para la protección catódica el cual depende del tipo de material. En la ecuación 2.1 se denota la relación entre la corriente y el material, " J_{PC} " es la densidad de corriente de protección catódica, " I_{req} " es la corriente requerida para proteger el material que posee un área superficial del conjunto " A_T ".

$$J_{PC} = \frac{I_{req}}{A_T} \left[\frac{A}{m^2} \right] \quad (2.1)$$

Se debe estimar la cantidad de corriente en función de las características del material y de la superficie. Las tuberías por utilizar deben cumplir con los requerimientos del cliente, según eso se puede determinar la superficie en base a la ecuación 2.2 que establece que el área total es un equivalente entre la cantidad de tuberías " N ", depende del

diámetro exterior " ϕ_{ext} " y de la longitud de la tubería. La cantidad de tuberías se la estima según la longitud definida previamente

$$A_T = N * (\pi\phi_{ext}L_{Tubería}) \quad (2.2)$$

La tubería viene con recubrimientos que le provee determinada protección ante la corrosión, esto genera una reducción del área a considerar por lo que se reduce el requerimiento de corriente. La ecuación 2.3 indica que el área real a considerar para el sistema de protección catódica " A'_T " es un porcentaje de A_T , este depende de la eficiencia del revestimiento " E " que normalmente posee valores del 90% en adelante.

$$A'_T = A_T * (1 - E) \quad (2.3)$$

Al unificar las ecuaciones 1.4, 1.5 y 1.6 se obtiene una ecuación generalizada en donde se establece el requerimiento de corriente según las dimensiones de las tuberías, la cantidad necesaria a proteger y el material. La ecuación 2.4 permitió el requerimiento de corriente y a partir de esto se analizan las metodologías.

$$I_{req} = J_{PC} * N * (\pi\phi_{ext}L_{Tubería}) * (1 - E) \quad (2.4)$$

Con la corriente necesaria para proteger el ramal de tuberías se tuvo que definir la cantidad de ánodos que se requerirán el cual se determina con la ecuación 2.5

$$N_{ánodos} = \frac{I_{req}}{I_{ánodo} * \%Trabajo} [unid] \quad (2.5)$$

La corriente que aporta cada ánodo se la obtiene de la documentación mostrada en el apéndice C y según eso se determina el número de ánodos, en caso de tener un valor decimal se opta por el entero superior próximo.

2.5.2 Resistencia eléctrica del sistema de protección tuberías

Contribución de resistencia por cableado

El trayecto de tuberías es extenso, dado a esta condición se ve la necesidad de conectar todo el sistema mediante soldadura para tener un sistema unificado y no varias tuberías aisladas. Esto permite tener un solo bloque para determinar los requerimientos energéticos y verificar si es necesario tener varias estaciones de control, la unión se realiza con soldadura aluminotérmica entre las tuberías y su procedimiento es en base al proceso CADWELD[26]. Adicional de la conexión entre las tuberías también existe cableado que unifica el sistema conectando el rectificador, la caja y el lecho anódico con el ramal de tuberías, estos deben analizarse de manera independiente pues cada uno tiene requerimientos particulares por lo que tendrán diferentes especificaciones. La

longitud y el calibre será en función de las especificaciones del proyecto y en base a los proyectos previos realizados por el cliente.

La resistencia del cable se determina con la ecuación 2.6, su valor depende tanto de la geometría como del tipo de material con el que está fabricado, " ρ_{cobre} " es la resistividad del cobre, " A_c " es el área de la sección transversal por donde circulará la corriente y con una longitud de cable " L_{cable} " [27]. La longitud se estableció en función de la geometría de la tubería y en donde se encontraba el espacio apropiado para realizar la soldadura del cableado.

$$R_{Cable} = \frac{\rho_{cobre} L_{cable}}{A_c} [\Omega] \quad (2.6)$$

Contribución de resistencia por el lecho anódico

Teniendo en cuenta la cantidad de ánodos que se necesitó para abarcar el requerimiento de corriente se usó la ecuación 2.7 que permite determinar la resistencia que produce la configuración del lecho anódico seleccionado en donde " ρ_{Suelo} " es la resistividad de la tierra en donde está situado el conjunto de ánodos, " N " es el número de ánodos que componen el lecho anódico, " $L_{ánodo}$ " es la longitud del ánodo, " $\phi_{ánodo}$ " es el diámetro del ánodo y " S " es el espaciamiento existente entre los ánodos [28].

$$R_{LA} = \frac{\rho_{Suelo}}{2\pi N L_{ánodo}} \left[\ln \left(8 \frac{L_{ánodo}}{\phi_{ánodo}} \right) - 1 + \frac{2L_{ánodo}}{S} (\ln 0.656N) \right] [\Omega] \quad (2.7)$$

Se tiene como referencia la *NACE CP4 Cathodic Protection Specialist Course Manual* en donde hacen un análisis de variación de resistencia según el distanciamiento entre ánodos y su influencia en la magnitud en donde se concluye que a más de 6 metros ya no hay influencia [29]. Para el dimensionamiento que se consideró del ánodo en conjunto a la columna de coque en el que se encuentra, se define las dimensiones comunes que se trabajan que son valores de $\phi_{columna} = 8"$ y $L_{columna} = 2' + L_{ánodo}$ los cuales permiten determinar en base al distanciamiento y número de ánodos la resistencia del lecho anódico [30].

Contribución de resistencia por la estructura y recubrimientos

La determinación de la resistencia que presenta la estructura está ligado al área superficial lateral y los que impiden el paso de la corriente serán la capa de pintura y Zincado. Se muestra en la figura 2.3 como está constituida la tubería y la aportación de resistencia por los segmentos que la recubren.

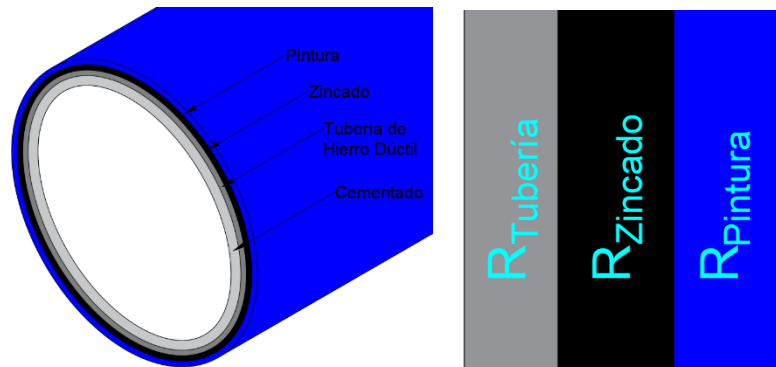


Figura 2.3. Representación gráfica de la tubería y resistencias a considerar por recubrimientos

Esta división aporta con una resistencia en serie de cada capa en donde se utilizó la ecuación 1.9 aplicada a cada capa teniendo como área la cara lateral de la tubería y de longitud el espesor. La ecuación 2.8 es la unificación de la resistencia por parte de las capas de protección y la tubería. Los valores de las resistividades son tomadas de la base de datos de Construction Material Engineers (CME) [31].

$$R_E = \sum R_{capas} = \frac{(\rho * e)|_{Tubería Fe-Dúctil} + (\rho * e)|_{Zincado} + (\rho * e)|_{pintura}}{A_S - Tubería} [\Omega] \quad (2.8)$$

Para determinar la resistencia del sistema se utiliza la ecuación 2.9 que consiste en la sumatoria de la resistencia de la tubería, la resistencia del lecho anódico y la resistencia que proveen los diferentes tipos de cables según sus diámetros especificados.

$$R_{sist} = \sum R = R_E + R_{LA} + R_{cables} \quad (2.9)$$

2.6 Determinación de Voltaje requerido y selección de rectificador

El voltaje se lo determina en base a la ley de Ohm, dado que el sistema es una resistencia enorme y se conoce el amperaje que se necesita para protegerlo el voltaje se lo obtiene con la ecuación 2.10.

$$V_{req} = I_{req} R_{sist} \quad (2.10)$$

Con esto se permitió determinar el tipo de rectificador a utilizar en la implementación del sistema de protección, este debe ser acorde a la necesidad del proyecto y la cantidad dependerá de cuantos se vayan a escoger en función del aporte por unidad de estos equipos. Para la selección se utilizó características que poseen los rectificadores de una empresa comercial encargada de ofrecer servicios para sistemas de PCCI [32].

2.7 Esquema para determinación de costos de proyecto.

2.7.1 Materiales utilizados

En función de los resultados obtenidos se estableció un resumen de materiales utilizados para su implementación, estos abarcan las uniones entre tuberías, distancias colocadas entre el rectificador, a los ánodos, cantidad de ánodos y posición de la caja anódica. La cotización se la realizó por precios unitarios y luego se extrapola a la cantidad requerida en función de los resultados obtenidos optimizando la cantidad de recursos y reduciendo el presupuesto.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Propuesta de protección

La propuesta se divide por etapas en las que los resultados permiten acceder a la siguiente etapa del proyecto. Se partió con el perfil de resistividad de la zona donde se encuentra la obra, estos datos permitieron identificar la severidad del caso y definir que parámetros se utilizaron en el cálculo de las variables para ejecutar el sistema de protección catódica. Al determinar los requerimientos de corriente y voltaje en conjunto a la resistencia del sistema se establecieron los equipos necesarios para abastecer la demanda del diseño.

3.1.1 Resistividad de suelo

Los valores obtenidos de la resistividad del suelo en el segmento de estudio se resumen en el gráfico de la figura 3.1 en donde se observan picos bajos en los rangos de abscisas 1 500 – 2 000 [m] y 3 000 – 7 000[m]. Estos valores fueron tomados según el recorrido de las tuberías que se observa con detalle en el apéndice B, a tres diferentes profundidades y con dos métodos (puntual y capas)

LOS PINOS

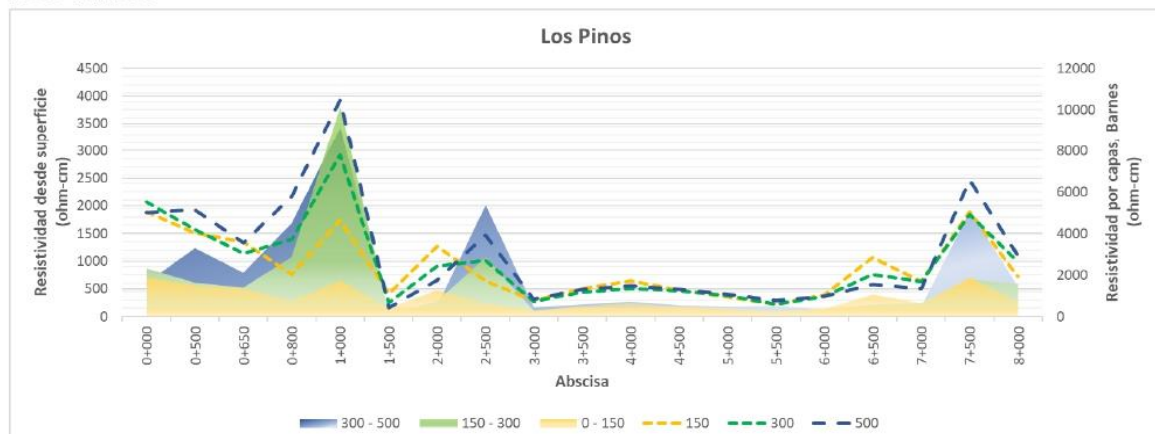


Figura 3.1. Gráfico representativo de los valores de resistividad obtenidos en el recorrido donde se ubica el ramal de tuberías. Datos proveídos por la empresa para el diseño del sistema de protección

3.1.2 Ubicación y distanciamiento de equipos

El ramal de tuberías se encuentra posicionado a un costado de la carretera en la mayoría de su trayectoria y con un seguimiento se definió como punto central de posicionamiento de las estructuras del sistema de PCCI una zona segura alejada a otras empresas que resulta como posición estratégica para la distribución de corriente a las tuberías. En la figura 3.2 se muestra la abscisa y en donde se posicionó la estructura.



Figura 3.2. Área geográfica adecuada para la ubicación del sistema PCCI

Para la distribución y el distanciamiento entre los equipos se estableció el esquema de la figura 3.3 y 3.4 en donde se observa con una vista superior y seccional como se estableció las zonas de ubicación, distancias y alturas con respecto a las tuberías.

En la figura 3.5 se muestra las distancias referenciales con respecto al tramo de la tubería y la ubicación de los ánodos con respecto al ramal. Se definió una zona segura dentro del límite de la Subestación eléctrica de Chorrillos cercana a las tuberías con las dimensiones señaladas en los esquemas anteriores

3.1.3 Resultados del diseño de PC

Acorde a las delimitaciones en el área de diseño se definieron los resultados en la siguiente tabla en donde se incluyen longitudes y cantidades respectivas según los cálculos mostrados en el apéndice E. La columna de modificación implica cambios acordados a ampliar el rango de acción y tener tramos adicionales de cable que se pierden en los seccionamientos.

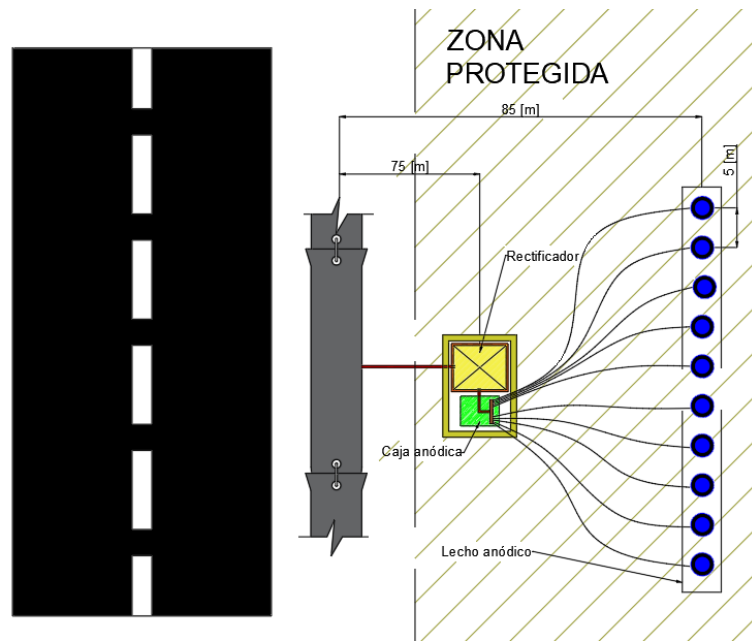


Figura 3.3. Esquema de distanciamiento entre equipos que conforman el sistema de PCCI-Vista superior

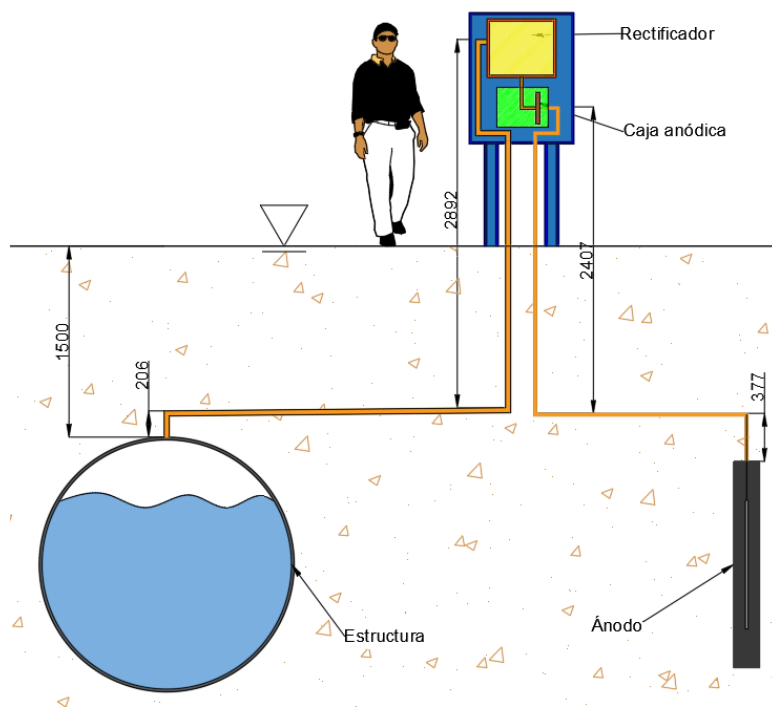


Figura 3.4. Esquema de distanciamiento entre equipos que conforman el sistema de PCCI-Vista seccional

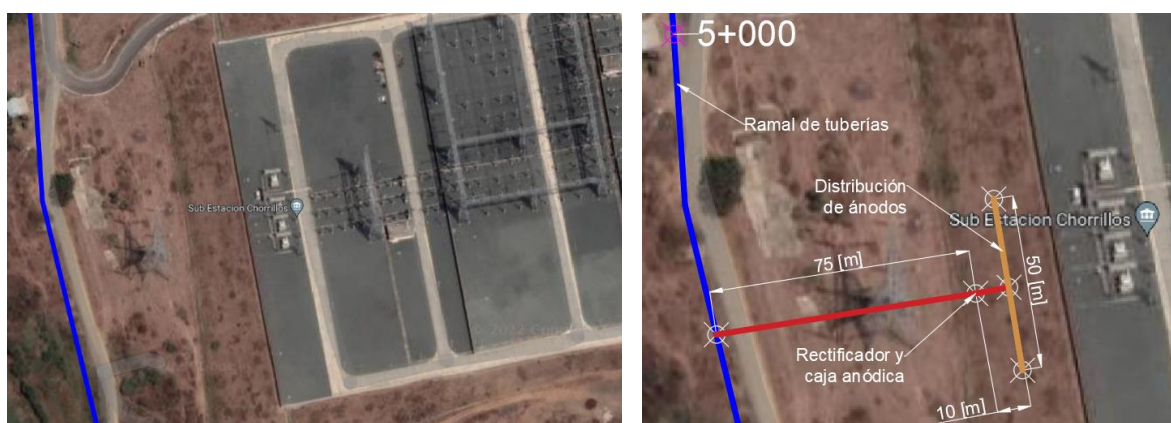


Figura 3.5. Posicionamiento geográfico dentro del área delimitada de la Subestación eléctrica de Chorrillos

Tabla 3.1. Resultados obtenidos a partir del cálculo según las variables de diseño.

Descripción	Simbología	Valor de diseño		Valor fijado
Número de Tuberías	$N_{tuberías}$	491 [unid]		491 [unid]
Longitud de Ramal a proteger	L_{ramal}	4001.65 [m]		4.001.65 [m]
Corriente Requerida	I_{req}	26.18 [A]		30[A]
Número de ánodos	$N_{ánodos}$	10 [unid]		10 [unid]
Calibre y longitud de Cable por secciones	ϕ y $L_{cable\ juntas}$	1/0 [AWG]	589.2 [m]	600.0 [m]
	ϕ y $L_{Cable\ Tub-Caja}$	6 [AWG]	79.0[m]	80.0[m]
	ϕ y $L_{Cable\ Caja-Lecho}$	8 [AWG]	265.0 [m]	265.0 [m]
Resistencia del Sistema	R_{sis}	1.4 [Ω]		1.5 [Ω]
Potencial necesario	V_{req}	36.19 [V]		60.0 [V]
Número de rectificadores	$N_{rectificadores}$	1 [unid]		1 [unid]
Número de juntas aluminotérmicas	N_{juntas}	1965 [unid]		1965 [unid]

3.2 Lista de materiales y costo estimado de procura de materiales-equipos

Según los parámetros de protección que se requieren para la PCCI mostrados en la tabla 3.1 se realizó una cotización de la cantidad de equipos, procura de materiales y adicionales resumidos en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Presupuesto acorde a los requerimientos del proyecto

Item	Cantidad	Unidad	Descripción	Costo unitario	Costo total
1	1	unid	Rectificador automático, enfriado por aire. Capacidad total de salida 30A - 60V, con regulación sobre terminal negativo, monofásico 240VAC.	\$25,000.00	\$25,000.00
2	2	unid	Ánodos de MMO tipo CANISTER 3/4" X 40", con 20 metros de cable # 8 AWG HMWPE.	\$965.00	\$1,930.00
3	2	unid	Ánodos de MMO tipo CANISTER 3/4" X 40", con 25 metros de cable # 8 AWG HMWPE.	\$980.00	\$1,960.00
4	2	unid	Ánodos de MMO tipo CANISTER 3/4" X 40", con 30 metros de cable # 8 AWG HMWPE.	\$995.00	\$1,990.00
5	2	unid	Ánodos de MMO tipo CANISTER 3/4" X 40", con 35 metros de cable # 8 AWG HMWPE.	\$1,010.00	\$2,020.00
6	2	unid	Ánodos de MMO tipo CANISTER 3/4" X 40", con 40 metros de cable # 8 AWG HMWPE.	\$1,025.00	\$2,050.00
7	550	lb	Coque Loresco SC-3	\$1.50	\$825.00
8	1	unid	Caja de conexiones anódicas de fibra de vidrio, impermeable y resistente a la corrosión. Con barra de cobre (busbar), 8 terminales, 1 terminal para cable #6 AWG.	\$1,000.00	\$1,000.00
9	99	caja	Cadweld, weld metal, CA 15 PLUSF33 x 20 cartuchos	\$25.00	\$2,475.00
10	1980	unid	Sellos para soldadura aluminotérmica	\$50.00	\$99,000.00
11	80.0	m	Cable AWG #6	\$2.50	\$200.00
12	265.0	m	Cable AWG #8	\$3.00	\$795.00
13	600.0	m	Cable AWG #1/0	\$4.00	\$2,400.00
				Total	\$283,290.00

3.3 Normativas a considerar en el desarrollo del proyecto

El proceso de diseño fue respaldado ante diferentes normativas las cuales se recopilan en la tabla 3.3

Tabla 3.3. Recopilación de normas utilizadas en el desarrollo del proyecto

Standard	Título
NACE CP4	Cathodic Protection Specialist Course Manual
ISO 2531	Tubos, conexiones y piezas accesorias de fundición dúctil y sus juntas para conducción de agua
SP-13110	Standard Specification. Cathodic Protection
ASTM-G187	Standard Test Method for Measurement of Soil Resistivity Using the Two-Electrode Soil Box Method
ASTMG57	Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode
Libro	Peabody's control of pipeline corrosion

3.4 Análisis de propuestas desarrolladas

3.4.1 Técnico

Tramo de protección

Según el perfil de resistividad se observó que hay tramos con resistividades que califican al suelo como un medio de corrosión muy severo según la tabla 1.1 pero como criterio de designación se estableció que a $\rho \leq 750[\Omega \cdot cm]$ son situaciones de peligro en las que se requirió PCCI, para sectores con valores mayores se les destinará un sistema de protección diferente. Con esto se identificó que existe aproximadamente 4 500 [m] que requieren protección, los cuales constan de dos tramos comprendidos por uno de 500 [m] y otro de 4000 [m]. Ante esta situación, se determinó que el tramo corto no sería tomado en cuenta ya que de lo contrario se requeriría unir estos tramos bajo cableado entre tuberías o tener su propio lecho anódico y rectificador dado que se encuentran separados 1000 [m] lo que provocaría incremento referente a inversión en el proyecto para un segmento muy corto, a este tramo solo se pretende aislar mediante recubrimientos adicionales para asegurar una mayor longevidad de vida útil. El tramo largo es el que se consideró para el diseño y los cálculos del sistema de protección en el segmento desde la abscisa 3 000 [m] a la 7 000 [m] en donde la resistividad posee un rango de 300 – 650 [$\Omega \cdot cm$]

Parámetros acordes al sistema

La corriente requerida se tornó influenciada por diferentes parámetros de los cuales se tomaron de valores referenciales en función de normas y documentación basada en normas, la corriente dependía de la dimensión y geometría de las tuberías. Dada la

longitud por unidad de 8.00[m] se estableció que el tramo de protección sería de 4000 [m] por lo que no se puede aislar una sección de la tubería, sin embargo, como longitud por tubería se fijó 8.15 [m] la longitud subió a 40016.5 [m] ya que la zona de la campana en donde se inserta las tuberías también necesita protección.

Adicional la eficiencia del recubrimiento suele tener valores de 95-99% pero se trabajó con una eficiencia del 90% para tener un requerimiento un poco mayor en caso de que el suelo presente alteraciones en las diferentes temporadas del año que puedan modificar la resistencia del suelo tornándolo más agresivo asegurando que exista protección ante medidas de mayor demanda, también depende de la calidad del material, y posibles daños adquiridos por la movilización o instalación. El valor obtenido de aproximadamente 27[A] es lo que se requiere para proteger el ramal, pero aquí hay que considerar un margen de seguridad dado que las condiciones del medio no serán siempre las mismas y en caso de requerir una mayor protección el sistema debe estar diseñado para cumplirla, por tanto, se definió un valor de 40 [A] para que el rectificador seleccionado no trabaje al 100% de su capacidad nominal.

La resistencia del sistema dependía de 3 grupos principales, el primero es la aportación por parte de los cables el cual encuentra uniendo las tuberías para la continuidad eléctrica, las tuberías al rectificador y al lecho anódico. Para la definición del calibre del cable se consideró la corriente que debería soportar, se comparó según la capacidad que soportan según la documentación dando un calibre mínimo AWG 14 pero este es un diámetro delgado el cual puede verse comprometido durante la instalación y dado que según la norma se establece una sección transversal mínima de 10 [mm²] se optó por el AWG 1/0 para tener un margen de seguridad con respecto. En base a recomendaciones y proyectos realizados previamente se fijó el AWG 6 como cable de continuidad entre el ramal de tuberías al rectificador. Los ánodos de PCCI ofertados por la empresa vienen con un cable AWG 8 como mínimo, por ello se optó este calibre como unión entre los ánodos a la caja anódica. La segunda aportación es debida al lecho anódico el cual varía según el tipo de distribución, dimensión, ubicación y orientación que presentan los ánodos entre ellos en donde influye la separación entre ellos, resistividad de la zona, cantidad, longitud y diámetro del ánodo. En base a criterios de diseño y experiencia de proyectos previos del cliente se estableció que los ánodos no deberían trabajar en toda su capacidad sino a nivel inferior para asegurar su durabilidad, por ello los ánodos trabajarán entre el 50-60% y para cumplir la demanda de amperaje se requirió 10 de ellos. La separación de los ánodos altera la resistencia del lecho, pero se estableció una

distancia en base a gráficas de comportamiento con un espaciamiento de 5 [m] para la configuración de 10 ánodos ya que a esa distancia la resistencia se minimiza en esta configuración. Para el último aporte se considera la resistencia que representa el ramal de tuberías el cual depende de las dimensiones de la tubería y los recubrimientos que lo protegen siendo el Zincado con la capa de película los responsables de aportar esta resistencia.

El voltaje requerido se determinó en función de los parámetros previamente justificados, en base a que se realizaron ajustes a estas variables el voltaje no requirió consideraciones adicionales. Una vez obtenido el valor se lo proyectó a un valor comercial próximo por lo que la selección del rectificador se fijó con un amperaje de 40 [A] y 60 [V]

3.4.2 Económico

En base a presupuestos acorde a alternativas de proyectos se limitó a realizar la cotización del diseño final dado que no se tenía mucha accesibilidad a los contactos con las empresas proveedoras. Sin embargo, se consideró durante el desarrollo la reducción de la procura que podrían elevar los costos del proyecto como es la cantidad de cable ya que según el posicionamiento de los equipos con respecto a la estructura se alteraría la cantidad de estos. En lo que respecta al rectificador, ánodos, caja anódica y juntas de soldadura aluminotérmica no hay forma de por reducir o alterar sus cantidades en función de la ubicación o distribución del sistema.

La ubicación de los equipos de PCCI también involucran ciertos gastos por el hecho de mantener su integridad durante su periodo de operación, por ello el colocarlo dentro de un área custodiada es viable para asegurar que los equipos no serán sustraídos y tener la facilidad de acceder en caso de necesitar mantenimientos o revisión de los parámetros.

3.4.3 Comparación entre diseños de estructuras

El sistema de PCCI es aplicable para obras similares hechas con otros materiales como las típicas tuberías de acero, el cual es su competencia como principal alternativa para sistemas de tuberías de acueductos. Dada las propiedades que presenta el acero comparado con el hierro se establecieron que los requerimientos de corriente para proteger la estructura no variarán de manera representativa, pero al tener una estructura de acero no se requiere utilizar puentes entre las tuberías lo que reduce

significativamente el presupuesto debido a la eliminación de soldadura aluminotérmica para puentear a las estructuras el cual representa un 40% del presupuesto proyectado. En base a la durabilidad, se tiene que el acero presenta una menor durabilidad natural comparada con el hierro dúctil, pero hablando bajo un sistema de protección anticorrosivo basado en corriente impresa ambos se encuentran en igualdad de condiciones siempre que se mantenga el cuidado y precaución adecuada debido al mantenimiento y control del sistema. Esto lo realizan las personas encargadas de supervisar los parámetros de control del sistema diseñado. Adicional que si se considera un valor por proyecto global se conoce que el presupuesto requerido para la adquisición de tuberías de hierro dúctil es mayor comparadas con las de acero.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

1. La corrosión es un problema serio que afecta todo tipo de obras desde sistemas simples a mucho más complejos. Los costos generados por daños a causa de la corrosión tienen un peso considerable es por esto que el diseño de una obra debe ser en base a las necesidades de la estructura.
2. El entorno es el factor de mayor peso que se debe considerar al establecer un sistema de protección, esto influye en las alternativas diseñadas acorde a los requerimientos de la estructura a través de una evaluación técnica.
3. El sistema de protección que se definió es la propuesta más viable entre las opciones definidas inicialmente, el desarrollo de la PCCI cumple requerimientos acordes a las normativas y directrices establecidas por el cliente en el proceso de diseño de protección.
4. Los recubrimientos afectan de manera indirecta la resistencia del sistema, por lo que el voltaje de protección requerido es dependiente de su efectividad.
5. La distribución de los equipos que conforman el sistema de PCCI también afectan el voltaje de protección, pero su aporte es mucho menor dado que la resistencia por parte de los cables representa un 5% del valor total.
6. La alteración de las longitudes de cable afectaba el presupuesto, la resistencia del sistema y el voltaje de protección, pero estas alteraciones no representan mayor contribución.
7. En el diseño se establecieron conexiones dobles para crear continuidad entre las tuberías, estas se unen con cables AWG 1/0, pero en caso de asumir una conexión simple se reduciría el presupuesto en un 30%

4.2 Recomendaciones

1. Para proyectos similares se aconseja establecer la estación de protección en el sector con mayor agresividad y usar este como base de referencia para el potencial que tendrá como parámetro de entrada el rectificador.
2. Se sugiere analizar la atenuación en casos de tener una estructura con mayores dimensiones debido a que al tener cables muy extensos conectados a los ánodos se produce un efecto donde se disminuye el potencial eléctrico en el recorrido.
3. Para su ubicación se debía considerar sitios estratégicos para una correcta ejecución técnica del proyecto y que exista la facilidad de acceso para realizar mantenimientos preventivos o seguimientos de control.
4. Dado que no existe variación considerable entre la aplicación de PCCI entre el hierro dúctil y el acero, se recomienda evaluar el costo global del proyecto dado que el presupuesto para ejecutar la obra en acero es mucho menor que en hierro.

BIBLIOGRAFÍA

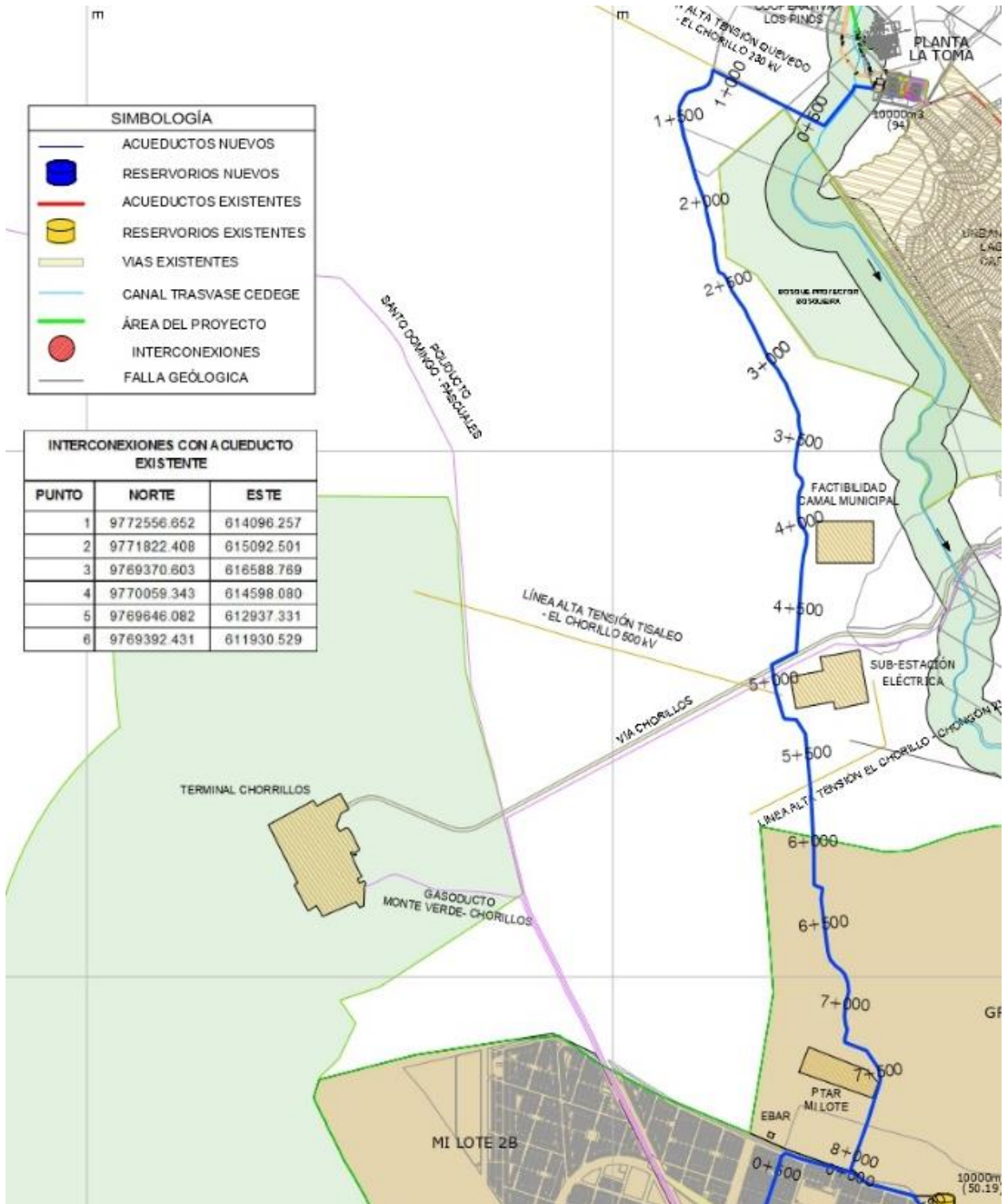
- [1] G. Koch, J. Varney, N. Thompson, O. Moghissi, M. Gould, and J. Payer, "International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study," *NACE INTERNATIONAL IMPACT*, 2016.
- [2] C. González and R. Marrero, "Factores ambientales y su influencia en la agresividad corrosiva de la estación de ensayos de Cojímar. Comparación con otras estaciones," *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, vol. 36, no. 3, pp. 181–185, 2005.
- [3] B. Chico, M. Morcillo, and D. de la Fuente, "Corrosión atmosférica de metales en condiciones climáticas extremas," *Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio*, vol. 3, no. 9, pp. 329–332, 2000.
- [4] Área Ingeniería Distribución EPM, "Medidas de Resistividad del Suelo," *Normas técnicas*, pp. 1–20, 2008.
- [5] H. H. Uhlig, *Uhlig's Corrosion Handbook*, Third Edit. 2011.
- [6] R. W. Revie and H. H. Uhlig, *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering: Fourth Edition*. 2008. doi: 10.1002/9780470277270.
- [7] E. M. Esparza, M. A. Veloz, V. E. Reyes, and J. Uruchurtu, "Efecto del pH en la corrosión de acero al carbono en presencia de un medio amargo," *Superficies y Vacío*, vol. 25, no. 2, pp. 139–145, 2012.
- [8] J. Zhang *et al.*, "Redox potential control in molten salt systems for corrosion mitigation," *Corros Sci*, vol. 144, pp. 44–53, 2018, doi: 10.1016/j.corsci.2018.08.035.
- [9] F. Y. M. De, B. D. E. L. Ultrasonido, D. E. L. Alcance, and E. N. La, *Control de corrosión en estructuras enterradas e inmersión*. 2021.
- [10] American Water Work Association, "AWWA C105-10 Polyethylene Encasement for Ductile-Iron Pipe Systems," 2018.
- [11] J. H. Fitzgerald, "Corrosion Control for Buried Piping.," *National Physical Laboratory*, vol. 4, no. 3, p. 30, 2020.
- [12] P. A. Schweitzer, "Cathodic protection," *Corrosion and Corrosion Protection Handbook, Second Edition*, no. 1, pp. 33–46, 2017, doi: 10.1201/9781315140384.
- [13] M. Hanif, B. Harun, M. A. Islam, N. Mohammad, and K. T. Ahmmed, "Comparison of Sacrificial Anode and Impressed Current Cathodic Protection Methods using

- Electric Resistance of Mild Steel,” *5th International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering, IC4ME2 2019*, no. July, pp. 1–4, 2019, doi: 10.1109/IC4ME247184.2019.9036510.
- [14] M. Hanif, B. Harun, M. A. Islam, N. Mohammad, and K. T. Ahmmed, “Comparison of Sacrificial Anode and Impressed Current Cathodic Protection Methods using Electric Resistance of Mild Steel,” *5th International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering, IC4ME2 2019*, no. July, pp. 1–4, 2019, doi: 10.1109/IC4ME247184.2019.9036510.
- [15] NACE INTERNATIONAL, “CP 4 - Cathodic Protection Specialist Course Manual,” 2009.
- [16] N. S. Rp, *Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems.*, vol. 22, no. 4. 2002.
- [17] D. H. Kroon, D. Lindemuth, S. Sampson, and T. Vincenzo, “Corrosion protection of ductile iron pipe,” *Mater Perform*, vol. 44, no. 1, pp. 24–28, 2005.
- [18] C. Googan and G. Symington, “Ensuring the Integrity of Critical Pipe-to-Cathodic Protection System Connections,” *Corrosion. Conference & Exhibition*, no. 08006, 2008.
- [19] A. INTERNATIONAL, “ASTM G57-95 a. Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode.” 2012.
- [20] J. Schramuk and V. Rash, “Cathodic protection for a new ductile iron water transmission main,” *Mater Perform*, vol. 44, no. 10, pp. 20–24, 2005.
- [21] E. Standard, “EN 13636-Cathodic protection of buried metallic tanks and related piping,” pp. 1–41, 2003.
- [22] P. Guerrero, “Diseño de sistema de protección anticorrosiva mediante el uso de recubrimientos plásticos para un acueducto manufacturado en hierro dúctil,” Guayaquil, 2022.
- [23] CerAnode Technologies International, “Enhanced Mixed Metal Oxide Tubular Anodes CerAnode-Power-Rod TM (CPR TM) and CPR-String (CPR-S TM),” 2016.
- [24] Electrocables, “Catálogo de productos.” p. 228, 2021.
- [25] Ezekiel Enterprises, “Introduction to Electrical Design for Cathodic Protection Systems,” vol. 19, no. 3923, pp. 19–29, 2015.
- [26] ERICO, “Exothermic Welding Manual CADWELD,” 2013.
- [27] R. Boylestad, “Introducción al análisis de circuitos,” *Physics for the IB diploma*, vol. 3, pp. 68–99, 2015.

- [28] A. W. Peabody, *Control of pipeline corrosion.*, Second Edi. 2001.
- [29] NACE INTERNATIONAL, "CP 4 - Cathodic Protection Specialist Course Manual," 2009.
- [30] A. W. Peabody, R. L. Bianchetti, and A. W. Peabody, *Peabody's control of pipeline corrosion.* 2000.
- [31] Chemical and Materials Engenieer, "Materials," 2017.
- [32] D. D. E. L. Producto, "Rectificadores - Hoja técnica," pp. 1–4.

APÉNDICES

APÉNDICE B



APÉNDICE C

Standard CerAnode TYPICAL ANODE SIZES

Consult CerAnode for other size and amp rating options

Anode Type	Anode Length in. (cm)	Anode Dia. in. (cm)	Anode Weight lbs/kg	Amps Per Tube
------------	--------------------------	------------------------	------------------------	---------------

¹COKE - SOIL & FRESH WATER with 20yr design life

2.5C/FW20YR	20 (51)	3/4 (1.9)	2 (0.9)	2.5
4C/FW20YR	24 (61)	3/4 (1.9)	2 (0.9)	4
5C/FW20YR	40 (101)	3/4 (1.9)	3 (1.3)	5
8C/FW20YR	48 (122)	3/4 (1.9)	3 (1.3)	8
4C/FW20YR	20 (51)	1 (2.5)	2 (0.9)	4
5C/FW20YR	60 (152)	1 (2.5)	5 (2.3)	5
8C/FW20YR	90 (228)	1 (2.5)	6 (2.7)	8
8C/FW20YR	40 (101)	1 (2.5)	4 (1.8)	8
10C/FW20YR	120 (304)	1 (2.5)	8 (3.6)	10
13C/FW20YR	40 (101)	1 (2.5)	4 (1.8)	13
8C/FW20YR	60 (152)	1.25 (3.2)	8 (3.6)	8

APÉNDICE D

CONDUCTOR					Peso Total Aprox (kg/km)	SEMIDURO		SUAVE	Capacidad de Corriente [A] *
CALIBRE (AWG o komil)	Sección Transversal (mm²)	No. Hilos	Clase de Trenzado	Diámetro del conductor (mm)		Carga de Rotura (kgf)	Resistencia C.C. a 20°C (ohm/km)	Resistencia C.C. a 20°C (ohm/km)	
FORMACIÓN SÓLIDO									
14	2.08	1	Solido	1.63	18.49	76	8.49	8.45	35
12	3.31	1	Solido	2.05	29.43	119	5.33	5.31	45
10	5.261	1	Solido	2.59	46.77	187	3.36	3.343	68
8	8.37	1	Solido	3.264	74.38	292	2.11	2.102	95
6	13.3	1	Solido	4.12	118.24	461	1.34	1.323	129
FORMACIÓN CABLEADO CONCÉNTRICO									
14	2.08	7	B	1.84	18.71	69	8.603	8.46	35
12	3.31	7	B	2.32	29.78	110	5.412	5.35	45
10	5.261	7	B	2.93	47.33	175	3.401	3.35	68
8	8.37	7	B	3.70	75.28	277	2.151	2.10	95
6	13.3	7	B	4.66	119.66	435	1.354	1.32	129
4	21.15	7	B	5.88	190.28	683	0.851	0.830	170
2	33.62	7	B	7.42	302.47	1070	0.536	0.522	230
1	42.4	7	A	8.33	381.46	1340	0.428	0.413	275
1/0	53.5	7	AA, A	9.36	481.23	1681	0.337	0.328	319
1/0	53.5	19	B	9.46	481.23	1722	0.337	0.328	319
2/0	67.4	7	AA, A	10.51	606.74	2105	0.267	0.261	371
2/0	67.4	19	B	10.63	606.74	2161	0.267	0.261	371
3/0	85.0	19	B	11.94	764.90	2715	0.212	0.207	427
4/0	107.2	19	B	13.40	964.44	3395	0.168	0.164	500

APÉNDICE E

Cantidad de tuberías a proteger

Las tuberías tienen una longitud estimada de 8.15[m] y el tramo que se pretende proteger es de 4 [km], en base a esto se determina la cantidad de tuberías que deben ser protegidas.

$$N_{tuberías} = \frac{4000}{8.15} \approx 491[\text{unidades}]$$

Cantidad de Cableado por geometría del sistema:

Los tramos se dividen en cuatro secciones con tres tipos de calibres, para la primera sección se tiene los tramos que generan continuidad entre las tuberías, el siguiente es la unión entre la estructura y el rectificador, la otra es la unión entre el rectificador y la caja anódica, por último, la unión de los ánodos a la caja anódica.

Tramo comprendido entre tuberías

La longitud entre las tuberías de cable establecida para poder tener un buen margen de manipulación es de 600 [mm] y al ser doble conexión por cada junta su valor se duplica, el cable utilizado es el de AWG 1/0 dado que su grosor lo hace más resistente para evitar daños en la unión. Esto se lo hace por cada junta que debe ser considerada por lo que:

$$L_{AWG\ 1/0} = 600 * 2 * 491 = 589.20[m]$$

Tramo comprendido de tuberías a rectificador y rectificador a caja anódica

El calibre definido para este tramo es el AWG 6 y en base a la geometría del tramo se tiene una longitud horizontal de 75[m] como se muestra en la figura 3.3, a esto se suma las distancias verticales que dan un total de 3.10 [m] y un adicional corto que una la caja anódica con el rectificador de 0.50 [m] según la figura 3.4 dando un total de:

$$L_{AWG\ 6} = 75 + 3.10 + 0.50 = 78.60 \approx 79[m]$$

Tramo comprendido entre la caja anódica y el lecho anódico

Para esto se debe considerar que existe una distribución centralizada como se observa en la figura 3.3, pero para facilidad de trabajo se realizará una sola zanja en forma de T por lo que se hacen adiconamientos en base a la separación entre los ánodos y al ser una distribución simétrica se estima solo de un segmento para duplicarlo.

Cantidad	Caja a lecho	Centro del lecho a posición del ánodo	Adicional por altura	Longitud de cable
2	10.0 [m]	2.5 [m]	4.0 [m]	29 [m]
2	10.0 [m]	7.5 [m]	4.0 [m]	39 [m]
2	10.0 [m]	12.5 [m]	4.0 [m]	49 [m]
2	10.0 [m]	17.5 [m]	4.0 [m]	59 [m]
2	10.0 [m]	22.5 [m]	4.0 [m]	69 [m]
Total de cable				265 [m]

Determinación de cálculos energéticos:

Dada la ecuación 1.7 se determina la corriente de protección

$$I_{req} = J_{PC} * N * (\pi \phi_{ext} L_{Tubería}) * (1 - E)$$

Los datos a reemplazar son los siguientes:

$$J_{PC} = 10 [mA/m^2]$$

$$N = 491$$

$$\phi_{ext} = 2082 [mm]$$

$$L_{Tubería} = 8150 [mm]$$

$$E = 0.90$$

Por tanto:

$$I_{req} = 10 \left[\frac{mA}{m^2} \right] * 491 * (\pi * 2.082 [m] * 8.150 [m]) * (1 - 0.90)$$

$$I_{req} = 26.17 [A]$$

En la estimación de la cantidad de ánodos se parte de la ecuación:

$$N_{ánodos} = \frac{I_{req}}{I_{ánodo} * \%Trabajo} [unid]$$

En donde se tiene que:

$$I_{req} = 26.17 [A]$$

$$I_{ánodo} = 5 [A]$$

$$\% de trabajo = 50\%$$

Por tanto:

$$N_{ánodos} = \frac{26.17}{5 * 0.50} \approx 10 [unidades]$$

Para la estimación de la resistencia del sistema R_{sist} se utiliza las ecuaciones 2.9, 2.10 y 2.11:

$$R_{sist} = \sum R_c + R_{LA} + R_E$$

En la contribución de la resistencia por parte del cable se tiene:

$$R_c = \frac{\rho_{cobre} L_{cable}}{A_c}$$

Al considerar que se tienen 3 tipos de cables de diferentes calibres se debe considerar la resistencia que aporta cada uno de ellos porque su sección transversal varía.

Los datos referenciales son los siguientes:

$$\rho_{cobre} = 2.10 [\mu\Omega \cdot mm]$$

$L_{AWG 1/0} = 589200 [mm]$, este valor se debe a 491 juntas de 600 [mm] de longitud duplicadas.

$$A_{c AWG 1/0} = 53.2 [mm^2]$$

$$L_{AWG 8} = 265000 [mm]$$

$$A_{c AWG 8} = 8.4 [mm^2]$$

$$L_{AWG 6} = 79000 [mm]$$

$$A_{c AWG 6} = 13.3 [mm^2]$$

Por tanto:

$$R_c = \sum R_{AWG} = \rho_{cobre} * \left(\frac{L_{AWG 1/0}}{A_{c AWG 1/0}} + \frac{L_{AWG 8}}{A_{c AWG 8}} + \frac{L_{AWG 6}}{A_{c AWG 6}} \right)$$

$$R_c = 2.10 [\mu\Omega \cdot mm] * \left(\frac{589200}{53.2} + \frac{265000}{8.4} + \frac{79000}{13.3} \right) \left[\frac{mm}{mm^2} \right] = 0.102 [\Omega]$$

En la contribución por resistencia por la geometría del lecho anódico:

$$R_{LA} = \frac{\rho_{suelo}}{2\pi N L_{ánodo}} \left[\ln \left(8 \frac{L_{ánodo}}{\phi_{ánodo}} \right) - 1 + \frac{2L_{ánodo}}{S} (\ln 0.656N) \right] [\Omega]$$

Los datos para esta ecuación son las siguientes:

$$\rho_{suelo} = 350 [\Omega \cdot cm]$$

$$N = 10 [\text{ánodos}]$$

$$L_{ánodo} = 162 [cm]$$

$$\phi_{ánodo} = 20.32 [cm]$$

$$S = 500 [cm]$$

Por tanto:

$$R_{LA} = \frac{350 [\Omega \cdot cm]}{2\pi * 10 * 162[cm]} \left[\ln \left(8 \frac{162}{20.32} \right) - 1 + \frac{2 * 162}{500} (\ln 0.656 * 10) \right]$$
$$R_{LA} = 0.15[\Omega]$$

En la contribución por parte de la superficie de la tubería en base a sus recubrimientos:

$$R_E = \sum R_{capas} = \frac{(\rho * e)|_{Tubería Fe-Ductil} + (\rho * e)|_{Zincado} + (\rho * e)|_{pintura}}{A_{S-Tubería}} [\Omega]$$

Los datos para la ecuación son los siguientes:

$$\rho_{Tubería Fe-Ductil} = 5.0 * 10^{-7} [\Omega \cdot m]$$

$$e_{Tubería Fe-Ductil} = 0.0213 [m]$$

$$\rho_{Zincado} = 5.9 * 10^{-8} [\Omega \cdot m]$$

$$e_{Zincado} = 7.5 * 10^{-5} [m]$$

$$\rho_{pintura} = 3.0 * 10^7 [\Omega \cdot m]$$

$$e_{pintura} = 10^{-3} [m]$$

$$A_{S-Tubería} = 26173.97 [m^2]$$

Por tanto:

$$R_E = \frac{5.0 * 10^{-7} * 0.0213 + 5.9 * 10^{-8} * 7.5 * 10^{-5} + 3.0 * 10^7 * 10^{-3}}{26173.97[m^2]} [\Omega \cdot m * m]$$
$$R_E = 1.146 [\Omega]$$

Por lo que la resistencia del sistema sería la siguiente:

$$R_{sist} = 0.102 + 0.150 + 1.146 = 1.398[\Omega] \approx 1.4[\Omega]$$

El voltaje requerido se determina en función de la ley de ohm mostrada en la ecuación 1.13 que define lo siguiente:

$$V_{req} = I_{req} * R_{sist} = 26.17 * 1.4[V] = 36.62[V]$$

Cantidad de juntas de soldadura aluminotérmica

Para determinar la cantidad de juntas se debe identificar cuantas uniones entre tuberías son las que se pretendían unir. Se definió que son 491 juntas por lo que para cada una existen dos cables de AWG 1/0, de los cuales poseen dos paquetes de soldadura aluminotérmica cada uno. Adicional se tiene una que unifica la estructura con el rectificador, por tanto:

$$N_{uniones soldadas} = 491 * 2 * 2 + 1 = 1965 [soldaduras exotérmicas]$$

APÉNDICE F

ANEXO DE RECONOCIMIENTO DE RESPONSABILIDADES ÉTICAS Y PROFESIONALES

El problema parte de la necesidad de aportarle durabilidad a un proyecto que pretende abastecer de servicios básicos a un sector de la ciudad de Guayaquil. El tener un entorno con características agresivas obliga a proteger a la obra para mantener un periodo de vida útil acorde a su aplicación y el costo de su desarrollo. Los puntos de interés parten de establecer la integridad del proyecto para evitar afectaciones económicas, esto debido a la inversión de la obra y costos por mantenimiento, y sociales, que se resumen en perjudicar la calidad de vida de las personas por daños de la infraestructura influyendo en sus actividades cotidianas. Se pretende eliminar reparaciones prematuras dentro del tiempo de vida útil pronosticado para evitar situaciones similares a las que suceden con otros acueductos de la ciudad que constantemente están en proceso de reparación por fallas y fugas. De esta forma la obra quedará protegida ante la agresividad del terreno y minimizar los motivos por el cual la obra podría colapsar en futuro próximo. Los problemas parten que en la aplicación del diseño existe la manipulación del entorno para crear estaciones de control lo que implica extracción de terreno y zonas verdes en los puntos establecidos para la instalación de los equipos, por tanto, debe ser considerado esto al momento de ejecutar alguna acción por parte de las empresas dado que afecta al entorno natural.

Existen consideraciones que no está ligadas a criterios técnicos y económicos del sistema de protección sino a las afectaciones generadas al entorno por la ejecución del diseño. La decisión y responsabilidad de tomar acción contra los daños a terceros por desplazamiento de terreno, deforestación en las zonas de instalación, entre otras afectaciones pertenecen a la empresa la cual aceptará o no ejecutar el sistema de protección y medidas correctivas posterior a la aplicación del sistema de protección.

Las zonas donde se plantean colocar los componentes del sistema de protección son rurales y aledañas, donde no existe complicaciones por terrenos con propietarios, pero si compromete la vegetación de la zona. Como el área superficial a remover es relativamente baja, se puede reponer reforestando en zonas donde se encuentren despobladas de vegetación en las cercanías del sector afectado. Esto impactará de manera positiva a corto plazo dado que se repondrá lo que en un inicio se encontraba en menor medida en las zonas que han sido removidas en sectores estratégicos y a su

vez permitirá establecer una zona de mejor control para el sistema de protección. A largo plazo la vegetación se repondrá y son zonas donde se construirán zonas residenciales lo que ayudará a tener un entorno más eco-amigable. No existe mayor impacto negativo económico y social en base a la implementación del proyecto dado que es una zona pequeña donde será aplicada, solo se debe llegar a un acuerdo con los dirigentes de la subestación el Chorrillo para delimitar su área de aplicación. En caso de que las posibles soluciones presenten el mismo impacto en todos los aspectos no técnicos, se deberá presentar alternativas de acción a ejecutar para contrarrestar los impactos negativos de la solución elegida.