

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA EN LA INDUSTRIA  
PETROLERA**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
DISEÑO Y SIMULACIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA EN LA INDUSTRIA  
PETROLERA**

**AUTOR:  
JEFFERSON PATRICIO LOACHAMIN NASIMBA**

**DIRECTOR:  
ROGELIO ALFREDO ORIZONDO MARTÍNEZ**

**Quito, diciembre 2019**

Jefferson Patricio Loachamin Nasimba

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA EN LA  
INDUSTRIA PETROLERA**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador 2019  
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



**Jefferson Patricio Loachamin Nasimba** (Y'1993-M'08). Realizó sus estudios secundarios la Academia Aeronáutica Mayor Pedro Traversari, se graduó de Físico Matemático. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en diseño y simulación de protección catódica en la industria petrolera.  
[jloachamin@est.ups.edu.ec](mailto:jloachamin@est.ups.edu.ec)

Dirigido por:



**Rogelio Alfredo Orizondo Martínez** (Y'1972 - M'1). Nació en Caracas, Venezuela. Recibió su título en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Simón Bolívar en 1999 y el MSc. en la Universidad Simón Bolívar en 2006. Actualmente es docente en la Universidad Politécnica Salesiana. Sus áreas de investigación incluyen electrónica de potencia, especialmente FACTS, sistemas de puesta a tierra y protección catódica.

[rorizondo@ups.edu.ec](mailto:rorizondo@ups.edu.ec)

**Todos los derechos reservados:**

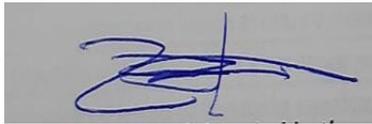
Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS  
©2019 Universidad Politécnica Salesiana  
QUITO-ECUADOR

### **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A**

Yo, Rogelio Alfredo Orizondo Martínez declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *DISEÑO Y SIMULACIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA EN LA INDUSTRIA PETROLERA* realizado por JEFFERSON PATRICIO LOACHAMIN NASIMBA, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, diciembre 2019



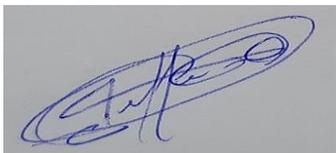
.....  
Rogelio Alfredo Orizondo Martínez

Cédula de identidad: 1757424195

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo, JEFFERSON PATRICIO LOACHAMIN NASIMBA, con documento de identificación N° 1722296157, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “DISEÑO Y SIMULACIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA EN LA INDUSTRIA PETROLERA ”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



.....

Nombre: Jefferson Patricio Loachamin Nasimba

Cédula: 1722296157

Fecha: Quito, diciembre 2019

## INDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. MARCO TEÓRICO .....	3
<b>2.1. CORROSIÓN.....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. CORROSIÓN TÍPICA EN LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO.....</b>	<b>4</b>
2.2.1. <i>CORROSIÓN DULCE POR CO<sub>2</sub></i> .....	4
2.2.2. <i>CORROSIÓN AGRIA H<sub>2</sub>S</i> .....	5
2.2.3. <i>CORROSIÓN POR OXÍGENO O<sub>2</sub></i> .....	5
<b>2.3. ESTRATEGIAS DE PROTECCIÓN ANTE LA CORROSIÓN .....</b>	<b>5</b>
2.3.1. <i>SELECCIÓN DEL MATERIAL</i> .....	5
2.3.2. <i>RECUBRIMIENTOS</i> .....	5
2.3.3. <i>INHIBIDORES</i> .....	5
2.3.4. <i>DISEÑO</i> .....	5
<b>2.4. SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA .....</b>	<b>5</b>
2.4.1. <i>POLARIZACIÓN CATÓDICA</i> .....	6
2.4.2. <i>ESTRUCTURA DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA</i> .....	6
<b>2.5. TIPOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA .....</b>	<b>6</b>
2.6. <i>PROTECCIÓN CATÓDICA GALVÁNICA</i> .....	6
2.7. <i>PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA (PCCI)</i> .....	7
<b>2.8. EQUIPOS PARA PROTECCIÓN CATÓDICA CON CORRIENTE IMPRESA.....</b>	<b>8</b>
2.8.1. <i>FUENTE DE ENERGÍA PARA CORRIENTE IMPRESA</i> .....	8
2.8.2. <i>TRANSFORMADORES/RECTIFICADORES ESTÁNDAR</i> .....	8
2.8.3. <i>RECTIFICADORES QUE USAN TIRISTORES DE SILICIO (SCR)</i> .....	8
2.8.4. <i>FUENTES DE ENERGÍA SOLAR</i> .....	8
2.8.5. <i>GENERADORES EÓLICOS</i> .....	8
<b>2.9. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PROTECCIÓN CATÓDICA .....</b>	<b>8</b>
2.9.1. <i>RESISTIVIDAD DEL SUELO</i> .....	8
2.9.2. <i>CONTENIDOS DE HIDRÓGENO Y OXÍGENO</i> .....	9
<b>2.10. PARÁMETROS DE DISEÑO.....</b>	<b>9</b>
2.10.1. <i>ÁREA A PROTEGER</i> .....	9
2.10.2. <i>DENSIDAD DE CORRIENTE</i> .....	9
2.10.3. <i>CORRIENTE TOTAL</i> .....	10
2.10.4. <i>PESO TOTAL DE ÁNODOS REQUERIDOS</i> .....	10
2.10.5. <i>NÚMERO Y ESPACIAMIENTO DE ÁNODOS REQUERIDOS</i> .....	10
2.10.6. <i>PESO POR CAMA ANÓDICA</i> .....	10
2.10.7. <i>CARACTERÍSTICAS DE ÁNODOS DE SACRIFICIO</i> .....	10
2.10.8. <i>FACTOR DE APANTALLAMIENTO</i> .....	11
2.10.14. <i>CORRIENTE DRENADA</i> .....	12
2.10.15. <i>TIEMPO DE VIDA</i> .....	13
2.10.16. <i>ECUACIONES DE LA CORRIENTE IMPRESA PARA LOS TANQUES</i> .....	13
3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	14
<b>3.1. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO .....</b>	<b>14</b>
<b>3.2. ESTRUCTURA DEL ALGORITMO: .....</b>	<b>14</b>
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	16
5. CONCLUSIONES.....	27
FUTUROS TRABAJOS .....	27

6. REFERENCIAS .....27

**6.1. ESTADO DEL ARTE ..... 30**

## INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Proceso de corrosión en un electrolito en agua.</i> .....	4
<i>Figura 2 Diagrama Evans de polarización catódica [22].</i> .....	6
<i>Figura 3. Esquema de protección catódica por ánodos de sacrificio.</i> .....	6
<i>Figura 4 Protección catódica por corriente impresa.</i> .....	7
<i>Figura 5 Planta petroquímica Total</i> .....	16
<i>Figura 6.tuberías enterradas</i> .....	17
<i>Figura 7 planta petroquímica completa con la ubicación de ánodos</i> .....	22
<i>Figura 8 Tuberías enterradas con ubicación de ánodos</i> .....	22
<i>Figura 9. Número de Ánodos mediante Método de Pesos por Tramo.</i> .....	23
<i>Figura 10 Requerimiento de corrientes con un máximo de ánodos</i> .....	23
<i>Figura 11. Número de Ánodos mediante Método de Corrientes, por Tramo.</i> .....	23
<i>Figura 12 Requerimiento de corriente con mínimo de ánodos.</i> .....	24
<i>Figura 13. Comparación de Número de Ánodos de Zinc respecto a sus pesos (1) 18lb (2) 30lb (3) 60lb. Eje de las ordenadas a la izq, indica el número de ánodos. Eje de las ordenadas a la der, indica el peso total de los ánodos en su cama.</i> .....	24
<i>Figura 14. Comparación de Número de Ánodos de Magnesio respecto a sus pesos (1) 17lb (2) 32lb (3) 60lb . Eje de las ordenadas a la izq, indica el número de ánodos. Eje de las ordenadas a la der, indica el peso total de los ánodos en su cama.</i> .....	25
<i>Figura 15 Requerimiento de corrientes magnesio.</i> .....	25
<i>Figura 16 Requerimiento de corrientes zinc.</i> .....	26
<i>Figura 17. Comparación de numero de ánodos de zinc y magnesio respecto a sus pesos similares. Eje de las ordenadas a la izq, indica el número de ánodos. Eje de las ordenadas a la der, indica el peso total de los ánodos en su cama.</i> .....	26
<i>Figura 18. Vida útil del Ánodo a diferentes Pesos Comerciales. En el eje de las x, el eje 1 es magnesio de 18 lb y zinc de 17 lb. El eje 2 corresponde a magnesio de 30 lb y zinc de 32 lb y en el eje 3 son 60 lb de magnesio y 60 lb de zinc.</i> .....	27
<i>Figura 19. Temática del problema.</i> .....	39
<i>Figura 20. formulación del problema.</i> .....	39
<i>Figura 21. Solución del Problema.</i> .....	39

## INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Potencial típico normalmente observado en suelos y aguas neutrales, medido con respecto al electrodo de referencia de cobre / sulfato de cobre.</i>	7
<i>Tabla 2 Clasificación de los Suelos según su Resistividad.</i>	9
<i>Tabla 3 Eficiencia del Revestimiento.</i>	9
<i>Tabla 4. Dimensiones de los Ánodos de Magnesio.</i>	11
<i>Tabla 5 Dimensiones de Ánodos de Zinc.</i>	11
<i>Tabla 6 Composición de Relleno Químico de Ánodos Galvánicos.</i>	11
<i>Tabla 7 Resistividad del Cable.</i>	12
<i>Tabla 8 Potenciales Recomendados para Protección Catódica.</i>	12
<i>Tabla 9 Eficiencia y Capacidad de diferentes Ánodos.</i>	13
<i>Tabla 10. Tabla de Variables.</i>	14
<i>Tabla 11 Coordenadas de Tuberías.</i>	16
<i>Tabla 12 Parámetros de Diseño.</i>	17
<i>Tabla 13 Resultados Mediante Pesos.</i>	18
<i>Tabla 14 Resistencias Resultantes.</i>	19
<i>Tabla 15 Resultados Aplicando Método de Corrientes.</i>	19
<i>Tabla 16 Convergencia de Diseño.</i>	20
<i>Tabla 17 Coordenadas de Tanques.</i>	20
<i>Tabla 18 Resultado del Número necesario de Cintas Anódicas.</i>	21
<i>Tabla 19 Resultados de Parámetros para Selección del Rectificador y Transformador.</i>	21
<i>Tabla 20. Tipo de Rectificador según Catalogo.</i>	21
<i>Tabla 21 Matriz del Estado del Arte.</i>	30

# DISEÑO Y SIMULACIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA EN LA INDUSTRIA PETROLERA

## Resumen

Este documento presenta un diseño de protección catódica que permite enfrentar los problemas que se generan por la corrosión en las estructuras metálicas enterradas. Se expone brevemente un marco conceptual de las bases teóricas de la corrosión, así como los tipos de protecciones existentes con un énfasis particular en la protección catódica por ánodos de sacrificio y por corriente impresa. Ha sido tradicional en la industria petrolera y petroquímica que la protección catódica galvánica sea implementada cuando se desea proteger pequeños tramos de tuberías metálicas enterradas; mientras que la protección catódica impresa sea implementada cuando se desea proteger estructuras metálicas más grandes, como los fondos externos de los tanques de almacenamiento. Se han establecido con claridad los algoritmos para el diseño mediante ambos métodos. Parte del diseño implica la extracción de la información de los tramos de tuberías metálicas enterradas, así como la información acerca de los fondos externos de los tanques metálicos enterrados mediante una interface de exportación de AutoCAD a Matlab. Se simulan gráficamente la ubicación idónea de los ánodos, sus tiempos de vida, considerando las normas NACE y H-201 de PDVSA, y se muestran las corrientes resultantes del diseño.

**Palabras Clave:** ánodos, cátodos, corrosión, diseño y análisis de algoritmo, polarización, potencial eléctrico, protección catódica

## Abstract

This paper presents a cathodic protection design that allows to face the problems that are generated by corrosion in buried metal structures. A conceptual framework of the theoretical bases of corrosion is briefly exposed, as well as the types of protections that exist with a particular emphasis on cathodic protection by sacrificial anodes and by printed current. It has been traditional in the petroleum and petrochemical industry that galvanic cathodic protection is implemented when it is desired to protect small sections of buried metal pipes; while printed cathodic protection is implemented when it is desired to protect larger metal structures, such as external funds from storage tanks. The algorithms for the design have been clearly established using both methods. Part of the design involves the extraction of information from buried metal pipe sections, as well as information about the external funds of buried metal tanks through an AutoCAD export interface to Matlab. The ideal location of the anodes, their life times are simulated graphically, considering the NACE and H-201 standards of PDVSA, and the currents resulting from the design are shown

**Keywords:** anodes, cathodes, corrosion, algorithm design and analysis polarization, electrical potential, cathodic protection

## 1. Introducción

Las instalaciones de la industria petrolera, tienen dentro de su complejidad, diferentes debilidades y amenazas, que, de no atenderse a tiempo le restan eficiencia y eficacia a la labor que desarrollan. Las estructuras de la industria necesitan de una constante supervisión y mantenimiento, pero es de primer orden todo lo relacionado con la prevención. En el caso de los ductos al estar enterrados, están expuestos a la acción corrosiva de los elementos, generando daños al patrimonio de la industria y en caso de deterioro de los mismos, pueden generarse derrames o escapes de hidrocarburos y/o gases con el consiguiente impacto económico y ambiental [1].

La aplicación de las técnicas para la prevención adecuada del problema de la corrosión, como es el caso de la protección catódica, coloca a la ingeniería eléctrica a la vanguardia en cuanto al resguardo de las instalaciones. El uso de normativas mundialmente aceptadas, en este caso, las normas NACE y H-201 de PDVSA, le confieren al diseño de la protección la confianza de la industria, con el fin de reducir los costos, los daños estructurales y los daños ambientales. El presente trabajo tiene por objeto diseñar y simular un sistema de protección catódica según las normas mencionadas, para garantizar la vida útil de las estructuras. En este sentido el investigador, basado en las normas citadas, y con la información disponible de una planta petroquímica, propone las bases y los criterios del diseño y procede a simular la protección catódica tanto de los ductos presentes en la instalación como de los fondos externos de los tanques. Para ello se emplean los modelos matemáticos del comportamiento de los ánodos en los algoritmos de solución, para los dos casos propuestos.

El objetivo de la investigación es garantizar que las construcciones metálicas enterradas y los fondos de los tanques de almacenamiento queden protegidos. De no ser así, una vez expuestos al ambiente de

servicio sufrirán un deterioro irreversible con el paso del tiempo, debido a la interacción fisicoquímica con el medio ambiente que los rodea [2]. Este deterioro se debe a la corrosión, lo cual es un efecto relacionado con la ley universal de la entropía, según el cual todos los materiales regresan a su estado original, tal y como fueron hallados en la naturaleza. Esto representa un peligro potencial por la degradación de los materiales [3]. En la industria del petróleo y el gas, la corrosión de las tuberías y otros equipos es una de las principales causas de fallas que puede llevar a consecuencias desastrosas. Se pueden producir derrames, fuego o explosión de los productos que son transportados mediante tuberías como gasoductos u oleoductos.

Los costos relacionados con la corrosión son muy altos, por lo tanto, es necesario el uso de métodos adecuados, para la evaluación y predicción de la agresividad corrosiva, de manera que al realizar las mediciones se puedan prevenir accidentes, tomando medios de protección anticorrosiva apropiados [4].

Debido a todos estos factores potencialmente peligrosos que pueden presentarse, históricamente se experimentó con métodos de protección. Pero no sería hasta 1800 cuando Michael Faraday estableció la relación entre la reacción química de la corrosión y la corriente eléctrica. A partir de allí se encontraron los primeros métodos de la llamada protección catódica [5]. Para los años 1900, se determinó que existía corrientes circulantes distintas de los circuitos previstos a la cual se la conoció como corriente vagabunda, esta corriente es un factor importante en aumentar la agresión de la corrosión en estructuras enterradas. No fue sino hasta 1910 cuando en un congreso celebrado en los EE.UU. se reconoció la gravedad de la corrosión debido a la agresividad del suelo. El «National Bureau of Standards» mediante un estudio concluyó que la corrosión más severa era causada por corrientes

vagabundas [6]. Sin embargo, la corrosión igualmente ocurre bajo circunstancias que excluyen a la corriente vagabunda, por ejemplo, la debida a la agresividad del suelo [7].

La corrosión en general se puede detectar de forma visible por la presencia de óxidos en la superficie de la estructura metálica. Entre los métodos más usados para disminuir o incluso prevenir la agresividad del ataque que la corrosión ejerce sobre los metales se tiene: una selección correcta del material, el uso de recubrimientos e inhibidores de la corrosión y las protecciones catódica y anódica [7]. El principio de la protección catódica basa su eficacia en que, al estar dos metales en contacto, uno actúa como ánodo y el otro como cátodo, tal y como ocurre en el caso de una pila galvánica. El material anódico se va consumiendo o sacrificando, a favor del material catódico que permanece inalterado [8].

Otras formas de corrosión del metal están asociadas a la corrosión galvánica. Este es un proceso electroquímico asociado con el movimiento de electrones entre áreas que tienen diferentes potenciales eléctricos [10].

Los métodos generales para la prevención de la corrosión en tuberías soterradas consisten en interferir de alguna manera en el fenómeno de la corrosión y detener su desarrollo. Las formas más comunes de prevención del fenómeno de corrosión son [9]: a) mejoramiento de la resistencia a la corrosión del material metálico; b) protección catódica y c) aislamiento del metal del medio ambiente (protección pasiva).

En la actualidad, ya ubicadas las tuberías de los procesos químicos, las tuberías metálicas de los sistemas de drenajes y los tanques en las refinerías petroleras, se desarrollan y hasta se optimiza un sistema de protección anticorrosiva que incluya la protección catódica.

El alcance del presente artículo es la selección y adecuación de un sistema de protección catódica para las tuberías

metálicas enterradas y los fondos externos de los tanques, donde se describe el diseño completo, así como la selección de los materiales a emplear. Estos son ánodos, conductores eléctricos y rectificadores. Se presenta una simulación gráfica de los lugares de colocación idóneos de la protección catódica, para ambos métodos: el sistema de protección catódica por ánodos galvánicos para proteger los tramos de tuberías enterradas y el sistema de protección catódica por corriente impresa para proteger los fondos externos de los tanques de almacenamiento.

## **2. Marco teórico**

### **2.1. Corrosión.**

La corrosión es un proceso electroquímico que consiste en la oxidación de un material metálico.

Originalmente el metal en su forma bruta fue extraído, posteriormente fue sometido a un proceso metalúrgico y durante la construcción de la refinería, es utilizado como material metálico aleado en forma de tuberías y láminas soldadas para hacer parte de tanques de almacenamiento, así como otros equipos de procesamiento y de disposición propios de la industria petrolera y petroquímica.

Sin embargo, al instalar estos equipos, el metal aleado regresa de nuevo a un ambiente muy similar del cual fue extraído, y por tanto es sometido a las mismas condiciones que tenía cuando fue sacado antes de su procesamiento [11].

Esta exposición a condiciones similares induce un lento proceso de retorno a la situación en la que se encontraba el metal en su forma original, llamado estado bruto o natural, con la consecuente descomposición del metal de sus formas aleadas.

Los metales se encuentran en su gran mayoría combinados en formas oxidadas, es decir, combinados con el oxígeno que es un gas muy reactivo. Este proceso de retorno de formas aleadas a su forma original oxidada se lo conoce en la

industria con el término general de «corrosión».

El proceso general de oxidación de un metal como el hierro puede ser explicado desde la electroquímica. Por ello también se lo conoce en la literatura especializada con el término de corrosión galvánica. Este es un proceso electroquímico asociado con el movimiento de los electrones entre áreas del metal que tienen diferentes potenciales electroquímicos [6].

Durante el proceso metalúrgico, el metal aleado en combinación con otras sustancias, adquiere un potencial eléctrico diferente al que exhibía en su forma natural. Desde el punto de vista microscópico, el proceso metalúrgico no es exactamente uniforme, por lo que, al regresar a sus condiciones ambientales originales, estas diferencias provocan un panorama de regiones macroscópicas con diferentes potenciales eléctricos entre sí. Tales áreas comienzan a funcionar como pilas galvánicas y entre ellas fluyen los electrones [12].

Durante el proceso de la corrosión galvánica, los electrones del metal fluyen de las zonas con un potencial electroquímico mayor (llamado anódico en el marco lingüístico de las ciencias de los materiales) a las zonas del metal con un potencial electroquímico menor (o catódico). Así pues, se afirma que el metal se oxida. Los electrones fluyen a través del suelo o de los hidrocarburos mezclados con agua salobre. Así, el suelo o los hidrocarburos son los cables por donde circulan los electrones, dado que ello tiene una resistividad eléctrica inherente.

De nuevo, usando el lenguaje propio de la literatura de la corrosión, el medio que permite circular los electrones en el proceso de oxidación metálico se lo conoce como electrolito [13].

El metal sometido al proceso de corrosión (ánodo o llamado material anódico), un metal externo que opera como cátodo y un medio que actúa como electrolito son mostrados esquemáticamente en la figura

1. La combinación de metales junto a su electrolito conforma una pila galvánica.

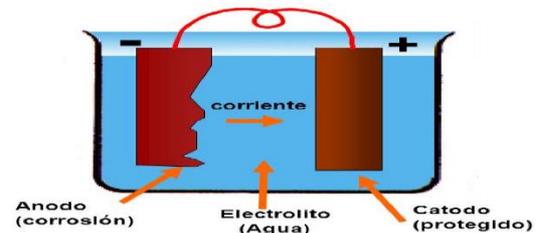


Figura 1. Proceso de corrosión en un electrolito en agua.

En realidad, este proceso es mucho más complejo de lo descrito hasta ahora. Hay factores como la calidad del metal, la composición del electrolito, su temperatura, la presión del líquido contenido, la presencia de gases solubles, la velocidad del líquido, la salinidad del agua, la presencia de un sistema de protección catódica y la presencia de microbios, que aceleran o retardan este proceso [14]. La corrosión también puede desarrollarse a la intemperie y puede ser causado por factores internos o externos como la estimulación hidráulica o la afectación de algún ácido [15].

## 2.2. Corrosión típica en la industria del petróleo

Existe varios tipos de corrosión en la industria petrolera. La corrosión macroscópica está asociada a fenómenos como la erosión metálica, las grietas metálicas, las picaduras, y las inducidas por flujo. Formas de la corrosión microscópica son la llamada corrosión intergranular y la corrosión bajo esfuerzo. Esta última se produce por el debilitamiento estructural en áreas del metal, el humedecimiento parcial o la remoción de algún recubrimiento parcial [16][9].

### 2.2.1. Corrosión dulce por CO<sub>2</sub>

La corrosión dulce normalmente sucede cuando el acero inoxidable es expuesto al contacto con dióxido de carbono en ambientes húmedos. [17]

### 2.2.2. Corrosión agria $H_2S$

La corrosión agria se origina principalmente por la falla que se produce en los materiales que presentan grados de esfuerzo inferiores a los de su elasticidad normal. Aunque el sulfuro de hidrogeno no es corrosivo cuando no existe humedad, mientras exista humedad, el gas tiende a volverse corrosivo. donde el sulfuro de hierro producido por esta reacción se adhiere a las superficies de acero en forma de polvo [18].

### 2.2.3. Corrosión por oxígeno $O_2$

La corrosión por oxígeno ocurre donde el material está más expuesto a la atmósfera o cuando parte del metal está en contacto con un suelo/agua más oxigenado que otras partes del metal. Ocurre en las instalaciones de alta mar, sistemas de inyección a gas y en pozos de poca profundidad [19].

## 2.3. Estrategias de Protección ante la corrosión

Para la protección de estos tipos de corrosión existen acciones comunes en la industria de la corrosión dirigidas a la prevención y la disminución de la agresividad al ataque sobre las tuberías enterradas y fondos de tanques de almacenamiento como son. Algunas de estas acciones de prevención son una selección de material correcta, el uso de recubrimientos, el uso de inhibidores y un diseño (adecuado) de un sistema de protección catódica [8] [9].

### 2.3.1. Selección del material

Para clasificar la resistencia frente a la corrosión de los distintos materiales y aleaciones, estos se dividen en 2 grupos. El primer grupo son los metales nobles con gran resistencia frente a la corrosión y el otro grupo de baja resistencia ante la corrosión son los conocidos como metales activos.

La aleación del metal tiene una fuerte relación con el ambiente al que este es expuesto. La relación entre la velocidad de corrosión, corrosividad del ambiente y la

resistencia a la corrosión del material aleado permite esclarecer de mejor manera la idea anteriormente presentada [6].

### 2.3.2. Recubrimientos

La función principal de los recubrimientos para la corrosión es aislar el metal del electrolito. Estos se dividen en dos grupos: metálicos y no metálicos. Los recubrimientos metálicos son los metales nobles de mayor resistencia mientras los recubrimientos no metálicos están hechos de sustancias cerámicas y poliméricas, como los carburos y el silicio [20].

### 2.3.3. Inhibidores

En algunos casos los inhibidores son incorporados en los recubrimientos utilizados para proteger distintos materiales. Si el recubrimiento falla, el inhibidor presente en el recubrimiento protege al material frente a la corrosión.

Los inhibidores de corrosión se pueden clasificar en 3 grandes grupos: inhibidores anódicos, catódicos y mixtos. La disociación del hierro y la acción catalizadora de los iones de cloruro producen el efecto de la disminución de la reacción anódica en la estructura. Este efecto es el responsable de incrementar la velocidad de separación del hierro y la corrosión.

### 2.3.4. Diseño

Aplicar los principios del diseño de forma correcta, puede disminuir o incluso eliminar los problemas relacionados a la corrosión y a la vez; reducir tiempos y costos asociados a la reparación y el mantenimiento por corrosión.

## 2.4. Sistema de Protección catódica

Dentro de los diferentes métodos de protección contra la corrosión, uno de los más eficaces e importantes es la protección catódica. Esta técnica consiste en obligar a la estructura que se quiere proteger a que funcione como un cátodo en una celda de corrosión. De esta manera se modifica los

factores electroquímicos. Un ánodo galvánico, también llamado ánodo de sacrificio, cuando se le conecta eléctricamente descargará una corriente que fluirá por el electrolito hasta la estructura a protegerse. En la industria catódica, los ánodos son fabricados con ciertas características de peso, dimensiones y forma geométrica [21].

Un sistema de protección catódica actúa con el principio de diferencia de potencial siendo la tierra o el suelo el conductor de corriente para cambiar las propiedades de los elementos a proteger.

#### 2.4.1. Polarización catódica

La polarización catódica es el principio fundamental ya que este efecto es el cambio o modificación de los valores de voltaje por la inserción de corriente externa y así pasar de un estado de oxidación a un estado de reducción entre ánodo y cátodo hasta llegar al estado de equilibrio como se muestra en el diagrama de Evans de la figura 2.

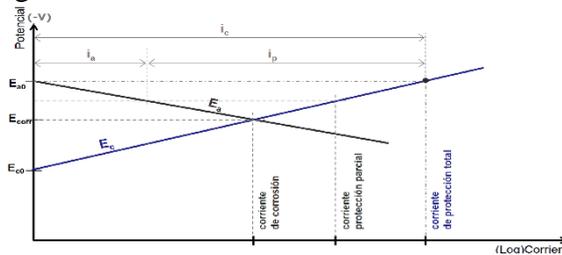


Figura 2 Diagrama Evans de polarización catódica [22].

#### 2.4.2. Estructura de un sistema de protección catódica

Un sistema de protección catódica está conformado por 4 componentes:

- **Conductores:** se utilizan conductores de cobre debido a ser un material resistente a la corrosión y de gran conductividad eléctrica.
- **Material de sacrificio:** también conocido como ánodo. Es conocido como ánodo de sacrificio debido a que este se disuelve. Al disolverse
- provee de electrones. Tiene un potencial mayor al material a proteger.

- **Fuentes de energía y transformadores:** Son imprescindibles al utilizar un sistema de protección catódica por corriente impresa.
- **Estructuras metálicas:** Se trata del equipo, usualmente tuberías y fondos externos de tanques de almacenamiento, que se buscan proteger.

Se tiene que tener en cuenta que los conectores deben ser de materiales de baja corrosividad, capacidad de corriente de paso y no ser magnético para un paso correcto de la corriente del ánodo al cátodo.

#### 2.5. Tipos de protección catódica

Existen dos tipos de protección catódica que son la galvánica (mediante el uso de ánodos de sacrificio) y la que emplea corriente impresa.

#### 2.6. Protección catódica galvánica

Este tipo de protección depende del potencial típico del ánodo, donde el ánodo será el metal de sacrificio como se muestra en la figura 3.

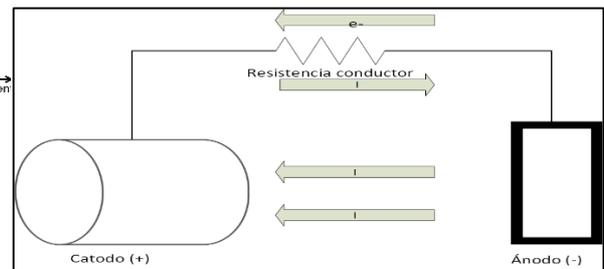


Figura 3. Esquema de protección catódica por ánodos de sacrificio.

Estos potenciales son medidos con respecto a un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 1. Potencial típico normalmente observado en suelos y aguas neutrales, medido con respecto al electrodo de referencia de cobre / sulfato de cobre.

Material	Potencial (Voltios)
Carbón, grafito, coque.	+0.3
Platino.	0 a -0.1
Escala de molino en acero.	-0.2
Hierro fundido con alto contenido de silicio.	-0.2
Cobre, latón, bronce.	-0.2
Acero suave en concreto.	-0.2
Plomo.	-0.5
Hierro fundido (sin grafito).	-0.5
Acero suave (oxidado).	-0.2 a -0.5
Acero suave (limpio y brillante).	-0.5 a -0.8
Aluminio comercial puro.	-0.8
Aleación de aluminio (% zinc).	-1.05
Zinc.	-1.1
Aleación de magnesio (6%Al,3%Zn,0.15%Mn).	-1.6
Magnesio comercial puro	-1.75

En la tabla anterior se muestran los potenciales de materiales seleccionados en la industria catódica. El material más idóneo para ser utilizado en el método galvánico es el aluminio, para la protección catódica en ambientes marinos. Se usa el magnesio y el zinc para protección catódica galvánica en suelos.

El ánodo galvánico debe estar tan lejos como sea práctico de la estructura a proteger para asegurar que la corriente del ánodo será distribuida a lo largo de la estructura. Cada ánodo se encarga de proteger una determinada longitud de la tubería [12].

En este tipo de protección catódica no se necesita una corriente suministrada por una fuente de potencia externa, ya que la corriente necesaria para la protección se logra uniendo eléctricamente la estructura a proteger con el ánodo galvánico. Sus características más importantes son: el potencial en circuito abierto, su contenido teórico de energía y su eficiencia [23].

Sus principales ventajas ante el método de corriente impresa son: no requiere de infraestructura eléctrica para la alimentación del equipo de rectificación, sus costos de mantenimientos e instalación son más bajos y existe poca interferencia con otras estructuras metálicas. Pero presenta el inconveniente de que tiene una corriente limitada, dada por el potencial del ánodo galvánico y por la resistividad del terreno. Si la resistencia del suelo es

suficientemente alta, no tendrá una buena protección [24].

## 2.7. Protección catódica por corriente impresa (PCCI)

El método de protección catódica por corriente impresa requiere de una fuente de corriente externa. Este tipo de método también simula a una celda electrolítica, es decir se asemeja a una batería. El material a proteger funcionará como el polo negativo de la fuente, por lo que será el cátodo de la celda electrolítica como se muestra en la Figura 4 Protección catódica por corriente impresa.

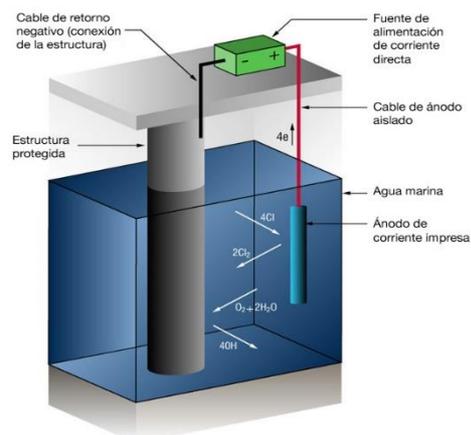


Figura 4 Protección catódica por corriente impresa.

El polo positivo de la fuente se conectará al material de sacrificio el cual se convertirá en el ánodo. Este tipo de protección también es utilizada en la industria petrolera junto con los recubrimientos en

tuberías, así como en tanques de almacenamiento [25].

## **2.8. Equipos para Protección Catódica con Corriente Impresa**

### *2.8.1. Fuente de energía para corriente impresa*

La fuente de energía necesaria para la PCCI tiene que ser una fuente de corriente continua, es decir un rectificador [26].

### *2.8.2. Transformadores/rectificadores estándar*

El conjunto transformador-rectificador (transformador acoplado a un rectificador) es el más utilizado para los sistemas de protección catódica. El transformador que se utiliza puede venir incorporado con cambiador de tomas (Tap) para regular la corriente AC de salida. Se puede utilizar transformadores trifásicos o monofásicos, asociados a un rectificador trifásico o monofásico. El circuito de rectificación trifásico es más eficiente que el monofásico, pero con mayores costos iniciales [27].

### *2.8.3. Rectificadores que usan tiristores de silicio (SCR)*

Los rectificadores SCR son incluidos en el proceso de rectificación para tener un mayor control de la tensión de rectificación. La diferencia con los rectificadores de diodos es el control en la corriente por los ángulos de disparo en controlador [28].

### *2.8.4. Fuentes de energía solar*

En ausencia de una infraestructura eléctrica, no se emplean transformadores acoplados a rectificadores, porque se carece de red eléctrica. Se emplean sistemas de alimentación en corriente continua.

Los sistemas fotovoltaicos están respaldados por un banco de baterías debido a que el uso continuo de energía para el sistema de protección catódica dejará de funcionar durante la noche o

cuando no se disponga de irradiación solar suficiente. Su sistema de respaldo es el banco de baterías, que permite la continuidad del funcionamiento durante la noche o durante los periodos donde no hay irradiación solar [29].

### *2.8.5. Generadores eólicos*

Los generadores eólicos constituyen otra fuente alternativa para la protección catódica en lugares donde exista la disponibilidad de suficiente energía eólica [30].

## **2.9. Factores que influyen en la protección catódica**

Antes de empezar por un diseño de protección catódica se tiene que tener en cuenta los factores que pueden influir sobre el como son:[31]

### *2.9.1. Resistividad del suelo*

La resistividad del suelo con la corrosión está relacionados inversamente proporcional por tal motivo es tener en cuenta los factores que pueden cambiar la resistividad del suelo tales son humedad, temperatura, salinidad y compactación del suelo [32]:

- Humedad. Este factor es muy influyente porque a mayor mayor humedad disminuye la resistividad y aumenta la corrosión.
- Temperatura. Al existir una mayor temperatura menor resistencia y mayor movimiento de electrones en el suelo donde al mismo tiempo reduce la polarización.
- Salinidad. Este parámetro afecta en la conducción eléctrica que se producirá en el suelo de ánodo hacia el cátodo es decir mayor salinidad existirá mayor conducción.
- Compactación del suelo. Este tipo de efecto varia directamente con la resistividad del suelo al ser menos compacto tendrá menos resistencia.

### 2.9.2. Contenidos de hidrógeno y oxígeno

Ambos efectos actúan en el aumento de inserción de corriente debido que en el caso del hidrógeno o ambientes ácidos y en los altos contenidos de oxígeno la polarización disminuye [33].

### 2.10. Parámetros de diseño

Para el diseño de la protección catódica se requiere información técnica detallada de las estructuras a proteger. Estos son datos fundamentales para la elaboración del diseño. utilizando el algoritmo de diseño para ánodos de sacrificio en las tuberías y el algoritmo por corriente impresa para los tanques.

Para el cálculo se hará un diseño bajo normas NACE y de la norma H-201 de PDVSA de los cuales se utiliza las siguientes ecuaciones que se detallan a continuación: [34][35]

#### 2.10.1. Área a proteger

El área a proteger se obtiene a partir de la estructura a calcular y de su forma geométrica. Las ecuaciones son las siguientes:

Para tuberías:

$$Area_{tuberias} = \pi * D * 0.0254 * L \quad (1)$$

Tabla 2 Clasificación de los Suelos según su Resistividad

Clasificación	Resistividad ( $\Omega - cm$ )
Baja resistividad	0-2000
Media resistividad	2001-10000
Alta resistividad	10000-30000
Muy alta resistividad	30000- $\infty$

Para realizar las correcciones con el objeto de obtener la densidad de corriente real, se tiene que conocer el factor de deterioro

Tabla 3 Eficiencia del Revestimiento

Años de servicio de la instalación	Factor del Deterioro del revestimiento ( $\delta$ )
0	1.01
1	1.16
2	1.32
3	1.51
4	1.73
5	1.98
6	2.27
7	2.6
8	2.97

Para tanques:

$$Area_{tanques} = \frac{\pi * d^2}{4} \quad (2)$$

Donde:

$Area_{tuberias}$ : área a proteger de tuberías (metros),

$Area_{tanques}$ : área a proteger de tanques (metros),

D: Diámetro de la tubería (pulgadas),

L: Longitud de la tubería (metros),

d: Diámetro del tanque (metros).

#### 2.10.2. Densidad de corriente

La densidad de corriente varía de acuerdo a varios factores como son la temperatura resistividad y la humedad.

Para los ánodos de sacrificio se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$DC' = 73.73 - 13.5Ln(\rho) \quad (3)$$

Donde:

$DC'$ : densidad de corriente relativa ( $A/cm^2$ ),

$\rho$ : Resistividad del terreno ( $\Omega - cm$ ).

Esta densidad de corriente relativa es directamente proporcional a la resistividad del terreno ( $\rho$ ) que está dada por la siguiente tabla:

según la norma H-201 y está dado por la siguiente tabla:

9	3.4
10	3.89
11	4.45
12	5.09
13	5.82
14	6.66
15	7.63
16	8.73
17	9.99
18	11.43
19	13.07
20	14.96

Una vez conocido el tiempo de deterioro del revestimiento se calcula la densidad de corriente real mediante la siguiente ecuación.

$$DC_{desnuda} = DC' * (1 - \delta) \quad (4)$$

$$DC_{revestida} = DC' * (\delta) \quad (5)$$

$$DC_{tanques} = 13.351 * \log\left(\frac{10^{5.523}}{\rho}\right) \quad (6)$$

Donde:

$DC_{desnuda}$ : densidad de corriente real de área sin revestir (A/cm<sup>2</sup>),

$DC_{revestida}$ : densidad de corriente real de área revestida (A/cm<sup>2</sup>),

$DC_{tanques}$ : densidad de corriente real de tanques (A/cm<sup>2</sup>),

$\delta$ : factor del deterioro del revestimiento.

### 2.10.3. Corriente total

La determinación de la corriente total necesaria para la protección de la estructura tanto por corriente impresa como por ánodos de sacrificio es la siguiente:

$$I_{total} = DC_{revestida} * Area_{tuberias} * \delta + \dots + DC_{desnuda} * Area_{tuberias} * (1 - \delta) \quad (7)$$

Donde:

$I_{total}$ : corriente total (mA).

### 2.10.4. Peso total de ánodos requeridos

El peso total está relacionado con los años y la corriente total de la estructura a proteger el cual está modelado por la siguiente ecuación:

$$W_{requerido} = \frac{8.76 * I_{total} * Y}{\eta * Ct * Fu} \quad (8)$$

Donde:

$W_{requerido}$ : peso total de ánodos requeridos (kg),

Y=número de años,

$\eta$ =eficiencia del ánodo,

Ct=capacidad teórica del ánodo (A-h/kg),

Fu=factor de utilización.

### 2.10.5. Número y espaciamento de ánodos requeridos

La cantidad y espaciamento de los ánodos requeridos se modelan con las siguientes ecuaciones (HA 201):

Número de ánodos:

$$N = \frac{W_{requerido}}{W_{comercial}} \quad (9)$$

Espaciamento:

$$S = \frac{L}{N} \quad (10)$$

Donde:

N: número de ánodos mediante método de pesos,

$W_{comercial}$ : peso comercial unitario de ánodo (kg),

S: espaciamento entre ánodo por el método de pesos.

### 2.10.6. Peso por cama anódica

El peso individual por cama anódica va a variar de acuerdo al número de ánodos que irán por cama anódica y está dada por la siguiente ecuación:

$$w = W_{comercial} * x \quad (11)$$

Donde:

w: peso por cama anódica (kg),

x: número de ánodos por cama.

### 2.10.7. Características de ánodos de sacrificio

Las características de los ánodos de sacrificio tanto de magnesio como los de zinc están dados por el peso y sus dimensiones o características geométricas como se muestra en las siguientes tablas:

Tabla 4. Dimensiones de los Ánodos de Magnesio

Peso (lb)	dA (pie)	LA (pie)	dB (pie)	LB (pie)
9	0.282	1.168	0.667	2.168
12	0.374	1	0.667	2
17	0.374	1.416	0.667	2.416
32	0.470	1.71	0.750	2.71
50	0.658	1.333	0.918	2.333
60	0.423	5	0.709	6

Tabla 5 Dimensiones de Ánodos de Zinc

Peso (lb)	dA (pie)	LA (pie)	dB (pie)	LB (pie)
15	0.132	2.5	0.667	3.5
18	0.132	3	0.667	4
24	0.132	4	0.667	5
30	0.132	5	0.667	6
60	0.188	5	0.667	6
150	0.374	3	0.667	4

Donde:

LA: longitud del ánodo,

dA: diámetro del ánodo,

LB: longitud del saco completo del ánodo,

dB: diámetro del saco completo del ánodo.

Uno de los factores para la resistividad de los ánodos es el relleno químico que se utiliza en el proceso y está dado por la siguiente tabla:

Tabla 6 Composición de Relleno Químico de Ánodos Galvánicos

Composición	Resistividad (Ω-cm)
Yeso hidratado 25%, bentonita 75%	300
Yeso hidratado 50%, bentonita 50%	300
Yeso moldeado 50%, bentonita 50%	300
Yeso hidratado 75%, bentonita 20%, sulfato de sodio 5%	50

### 2.10.8. Factor de apantallamiento

Este coeficiente es importante debido a que el apantallamiento sucede cuando se encuentran otras tuberías que interceptan a la tubería a ser protegida. La ecuación para el factor de apantallamiento lineal es:

$$CF = 1 + \frac{\log \left( \cot \left( \frac{\cot^{-1} \left( \frac{LB}{x * S} \right)}{2} \right) \right)}{\log \left( 8 * \frac{LB}{dB} \right) - 1} \quad (12)$$

Donde:

CF: factor de apantallamiento,

LB: es la longitud del saco completo del ánodo,

dB: diámetro del saco completo del ánodo.

### 2.10.9. Resistencia del conductor

Para el cálculo de la resistencia del conductor a utilizar se aplica la ecuación:

$$Rc = Re * \left( L1 + (x - 1) * \frac{S}{2} \right) \quad (13)$$

Donde:

Rc: resistividad del conductor (Ω),

L1: espacio entre la tubería y el ánodo, normalmente de 2.5 metros,

Re: resistividad del cable (Ω-m).

La resistividad del cable viene dada por la aleación del cobre y su calibre, lo cual ya viene determinada por la siguiente tabla:

Tabla 7 Resistividad del Cable

Tamaño del Cable	Resistividad (Ω-m)
Nº 6 AWG	0.0161
Nº 8 AWG	0.0257
Nº 10 AWG	0.0409
Nº 12 AWG	0.0650
Nº 14 AWG	0.1031

2.10.10. Resistencia ánodo-suelo

Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$R_{AS} = 1.2(R_{RT} + R_{AR}) \quad (14) \text{ (Sunde):}$$

$R_{AS}$  = resistencia ánodo - suelo (Ω),

1.2 = factor que considera un 20% de aumento en la resistencia asociado con la disminución del área del ánodo durante el tiempo de vida,

$R_{AR}$  = resistencia ánodo - relleno o resistencia interna del ánodo (Ω),

$R_{RT}$  = resistencia relleno - tierra (Ω).

2.10.11. Resistencia interna

La resistencia interna del ánodo tiene la siguiente ecuación:

$$R_{AR(sc)} = R_A - R_B \quad (15)$$

Donde:

$R_{AR(sc)}$  = resistencia ánodo - relleno sin corregir (Ω),

$R_A$  = resistencia columna - ánodo (Ω),

$R_B$  = resistencia columna completa (ánodo más relleno) (Ω).

Para el cálculo de la resistencia ánodo - relleno corregida se utiliza el factor de apantallamiento que está dado por la siguiente expresión:

$$R_{AR} = \frac{R_{AR(sc)} * CF}{x} \quad (16)$$

2.10.12. Resistencia relleno-tierra

Para el cálculo de la resistencia relleno - tierra se aplica la siguiente ecuación

$$R_{RT} = \frac{\rho \ln\left(\frac{8LB}{dB}\right) - 1 + \frac{2LB}{S} \ln(0.656 * x)}{2 * \pi * LB * 30.48 * x} \quad (17)$$

2.10.13. Resistencia de ánodos verticales

Para calcular la resistencia vertical se usará la ecuación de H. Dwight para un ánodo en posición vertical:

$$R_V = \frac{\rho * \left(\ln\left(8 * \frac{LA}{dA}\right) - 1\right)}{(2 * \pi * LA * 30.48)} \quad (18)$$

2.10.14. Corriente drenada

El cálculo de la corriente drenada está dado por la siguiente expresión:

$$I_D = \frac{|E_A| - |E_M| - 0.1}{R_{AS} + R_c} \quad (19)$$

Donde:

$I_D$ : corriente drenada (mA),

$E_A$ : potencial metal anódico (V),

$E_M$ : potencial de la estructura (V).

El potencial recomendado para estructuras está dado por la siguiente tabla:

Tabla 8 Potenciales Recomendados para Protección Catódica

Metal a Proteger	Potencial (V)
Hierro y acero en ambiente aeróbico	-0.85
Hierro y acero en ambiente anaeróbico	
Plomo	-0.95
Estaño	
Níquel	-0.6
Aleación base de cobre	-0.7
Aluminio limite positivo	-0.8

Aluminio limite negativo	-0.5 a -0.65
Cobre	-0.95
	-1.2
	-0.2

2.10.15. *Tiempo de vida*  
La fórmula es la siguiente:

$$T = \frac{W_{comercial} * C_p * FU}{8760 * I_D} \quad (20)$$

Donde:

T: tiempo de vida (años),

Tabla 9 Eficiencia y Capacidad de diferentes Ánodos.

Material	Capacidad teórica (A-h/kg)	Eficiencia (%)	Capacidad práctica (A-h/kg)
Magnesio	2200	50	1100
Zinc	820	90-95	740-780
aluminio	2980	85-95	2540-2830

2.10.16. *Ecuaciones de la corriente impresa para los tanques*

Para el caso de los tanques de almacenamiento se utilizan cintas anódicas dispuestas de forma concéntrica entre sí (disposición concéntrica) y de forma paralela entre sí (disposición paralela) [13]. Para el cálculo de la mínima longitud de cinta anódica necesaria para proteger el fondo externo del tanque se utiliza la siguiente ecuación:

$$L_{minima} = \frac{I_{DC} * Area_{tanques}}{CR} \quad (21)$$

Donde:

$L_{minima}$ : longitud a proteger (m),  
CR: corriente de salida.

2.10.17. *Disposición concéntrica*

Para el cálculo del número de cintas anódicas se aplica la siguiente ecuación:

$$n_{circular} = \frac{L_{minima} * 4}{\pi * d} \quad (22)$$

Para el cálculo del espaciamiento entre círculo se calcula con la ecuación:

$$S_c = \frac{d}{n_{circular}} \quad (23)$$

$C_p$ : capacidad práctica del material (A-h/kg),  
FU: factor de utilización, normalmente 0.85.

La capacidad teórica y la capacidad práctica del material anódico está dado por la siguiente tabla:

Para el cálculo de la longitud total de cinta anódica se aplica la siguiente expresión:

$$L_c = 2 * d * \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{i - \frac{1}{2}}{n_{circular}} - \left(\frac{i - \frac{1}{2}}{n_{circular}}\right)^2} \quad (24)$$

2.10.18. *Disposición paralela*

Para el cálculo de las cintas anódicas necesarias en un diseño en paralelo se utiliza la siguiente ecuación:

$$n_{paralelo} = \frac{L_{minima} * 2}{\pi * d} \quad (25)$$

Para el cálculo del espaciamiento entre cintas se aplica la ecuación:

$$S_p = \frac{d}{2 * n_{paralelo}} \quad (26)$$

Para el cálculo de la longitud total de cinta anódica a utilizarse en el diseño en paralelo se aplica la siguiente expresión:

$$L_p = \pi * d * \sum_{i=1}^n \frac{i - \frac{1}{2}}{n_{paralelo}} \quad (27)$$

Las siguientes ecuaciones son para la selección del transformador rectificador:

Resistencia:

$$R_c = \frac{\rho * h}{L_{\text{minima}} * (S_c - wc)} * \ln\left(\frac{S_c}{wc}\right) \quad (28)$$

Corriente:

$$I_{\text{tanque}} = DC_{\text{tanques}} * A_{\text{circular}} \quad (29)$$

Voltaje:

$$V_{\text{tanque}} = R_c * I_{\text{tanque}} \quad (30)$$

Capacidad del transformador:

$$C_{\text{transformador}} = I_{\text{tanque}} * \frac{V_{\text{tanque}}}{E * F * 1000} \quad (31)$$

Donde:

$n_{\text{circular}}$ : número de cintas circulares anódicas,

$S_c$ : espaciamiento entre cada cinta circular anódica (m),

$n_{\text{paralela}}$ : número de cintas paralelas anódicas,

$S_p$ : espaciamiento entre cada cinta paralela anódica (m),

$L_c$ : longitud total de cinta anódica circular (m),

$L_p$ : longitud total de cinta anódica paralela (m),

$R_c$ : resistencia para selección de rectificador ( $\Omega$ ),

$wc$ : ancho cinta anódica (m),

$I_{\text{tanque}}$ : corriente total necesaria (A),

$V_{\text{tanque}}$ : voltaje total necesario (V),

$C_{\text{transformador}}$ : capacidad de potencia del transformador (MW),

E: eficiencia del transformador,

F: factor de potencia del transformador.

### 3. Formulación del problema

Una vez conociendo los modelos matemáticos que actúan por las normas NACE y HA-201 PDVSA se plantea una

planta petroquímica con 22 tuberías enterradas y 5 fondos de tanques. La simulación plantea la obtención de las coordenadas desde un plano de arquitectónico con el software AutoCAD o de extensión dxf, así el programa comercial mediante la utilización de los algoritmos planteados obtendrá los resultados tanto gráficamente como numéricamente.

#### 3.1. Descripción del algoritmo

El diseño de sistemas de protección catódica es un proceso iterativo cuando se utilizan las normas NACE y HA-201.

Para la programación de los algoritmos se utiliza el programa MATLAB por las siguientes razones:

- Existe compatibilidad con aplicaciones numéricas.
- Existe compatibilidad de exportación e importación de datos en diferentes plataformas.
- Posibilidad para elaborar interfaces simples y bases de datos.
- Facilidad de manejo.
- Gran variedad de funciones.
- Posibilidad de acoplar gráficos sencillos con las aplicaciones.

#### 3.2. Estructura del algoritmo:

El algoritmo realizado para obtener un diseño adecuado del sistema de protección catódica puede dividirse de acuerdo con el diseño: por ánodos de sacrificio y ánodos por corriente impresa.

Las variables empleadas en el diseño de protección catódica se advierten en la siguiente tabla:

Tabla 10. Tabla de Variables

Nombre	Significado
$X_i$	Coordenada inicial x
$X_f$	Coordenada final x
$Y_i$	Coordenada inicial y
$Y_f$	Coordenada final y
L	Longitud tubería
$\rho$	Resistividad del suelo
Y	Años de diseño
x	Ánodos por cama anódica
FU	Factor de utilización

L1	Longitud de separación de ánodo a la estructura
Re	Resistividad del cable
RA	Resistencia columna-ánodo
RB	Resistencia columna completa
EA	Potencial metal anódico
Em	Potencial estructura
D <sub>tubería</sub>	Diámetro tubería
W	Peso del ánodo
Tipo	Tipo de ánodo
DC'	Densidad de corriente sin corregir
DC <sub>d</sub>	Densidad de corriente estructura desnuda
DC <sub>r</sub>	Densidad de corriente revestida
δ	Tiempo de deterioro
η	Eficiencia del ánodo
Ct	Corriente teórica
Cp	Corriente practica
X	Coordenada x del tanque
Y	Coordenada y del tanque
r	Radio del tanque
CR	Corriente de salida
h	Profundidad
ρ1	Resistividad centro del tanque
D <sub>tanque</sub>	Diámetro de tanque
w	Tamaño de cinta anódica
E	Eficiencia del rectificador
F	Factor de potencia del transformador

Para el diseño del sistema de protección catódica se utilizan dos algoritmos. Los datos se adquieren de un archivo en el programa comercial AutoCAD, extensión dwg, donde las tuberías a proteger tienen que estar en una misma capa y se guardan en formato dxf para poder realizar la lectura de los datos del plano.

#### Algoritmo 1: Ánodos de Sacrificio

**Paso 1:** Lectura de coordenadas archivo dxf.

$$\begin{aligned}
 Xi &= [Xi_1 \quad Xi_2 \quad Xi_3 \quad \dots \quad Xi_n] \\
 Xf &= [Xf_1 \quad Xf_2 \quad Xf_3 \quad \dots \quad Xf_n] \\
 Yi &= [Yi_1 \quad Yi_2 \quad Yi_3 \quad \dots \quad Yi_n] \\
 Yf &= [Yf_1 \quad Yf_2 \quad Yf_3 \quad \dots \quad Yf_n]
 \end{aligned}$$

**Paso 2:** Cálculo de Longitudes.

if  $Xi = Xf$

$$L = |Yf| - |Yi|$$

else if  $Yi = Yf$

$$L = |Xf| - |Xi|$$

else

$$L = \sqrt{(|Yf| - |Yi|)^2 + (|Xf| - |Xi|)^2}$$

end

**Paso 3:** Ingreso de Datos de Diseño.

$$\rho = 1000; Y = 15; x = 3; FU = 0.85;$$

$$L1 = 2.5; Re = 0.0409; RA = 1500$$

$$RB = 300; EA = 1.75; Em = 0.85$$

$$D_{tubería} = 14''; W = 32;$$

tipo = 'magnesio'

**Paso 4:** Cálculo del Área.

$$A = \pi * D_{tubería} * 0.0254 * L$$

**Paso 5:** Cálculo de densidad de corriente.

$$DC' = 73.73 - 13.5 \ln(\rho)$$

$$DC_d = DC' * (1 - \delta)$$

$$DC_r = DC' * (\delta)$$

**Paso 6:** Cálculo de corriente necesaria.

$$I_{total} = DC_r * A * \delta + DC_d * A * (1 - \delta)$$

**Paso 7:** Cálculo de peso requerido.

$$W_{requerido} = \frac{8.76 * I_{total} * Y}{\eta * Ct * Fu}$$

**Paso 8:** Cálculo de numero de ánodos y espacio entre ánodo por pesos.

$$\begin{aligned}
 N &= \frac{W_{requerido}}{W_{comercial}} \\
 S &= \frac{L}{N}
 \end{aligned}$$

**Paso 9:** Peso por cama anódica.

$$w = W_{comercial} * x$$

**Paso 10:** Resistencia vertical y del conductor.

$$R_v = \frac{\rho * \left( \ln \left( 8 * \frac{LA}{dA} \right) - 1 \right)}{(2 * \pi * LA * 30.48)}$$

$$R_c = Re * \left( L1 + (x - 1) * \frac{S}{2} \right)$$

**Paso 11:** Factor de apantallamiento.

$$CF = 1 + \frac{\log \left( \cot \left( \frac{\cot^{-1} \left( \frac{LB}{x * S} \right)}{2} \right) \right)}{\log \left( 8 * \frac{LB}{dB} \right) - 1}$$

**paso 12:** Corriente drenada.

$$I_D = \frac{|E_A| - |E_M| - 0.1}{R_{AS} + R_c}$$

**Paso 13:** Tiempo de vida.

$$T = \frac{W_{comercial} * C_p * FU}{8760 * I_D}$$

**Paso 14:** Cálculo de número y espacio de ánodos por corriente.

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{I_{total}}{I_D} \\
 X &= \frac{L}{M}
 \end{aligned}$$

**Paso 15:** Convergencia.

$$\begin{aligned}
 LP &= M * X \\
 LS &= LP - L \\
 AS &= pi * D * 0.0254 * LS \\
 IS &= DC * AS
 \end{aligned}$$

**Algoritmo 2: Corriente Impresa**

**Paso 1:** Lectura coordenadas archivo dxf.

$$\begin{aligned}
 X &= [X_1 \ X_2 \ X_3 \ \dots \ X_n] \\
 Y &= [Y_1 \ Y_2 \ Y_3 \ \dots \ Y_n] \\
 r &= [r_1 \ r_2 \ r_3 \ \dots \ r_n]
 \end{aligned}$$

**Paso 2:** Ingreso de datos de diseño.

$$CR=0.016; h=1 ; \rho = 100$$

**Paso 5:** Cálculo de densidad de corriente.

$$I_{DC} = 13.351 * \log\left(\frac{10^{5.523}}{\rho}\right)$$

**Paso 3:** Cálculo del área del tanque.

$$A_{circular} = \pi * \frac{(2 * r)^2}{4}$$

**Paso 4:** Corriente necesaria.

$$I_{tanque} = I_{DC} * A_{circular}$$

**Paso 5:** Longitud a proteger.

$$L_{tanque} = \frac{I_{tanque}}{CR}$$

**Paso 6:** Cálculo de corriente necesaria.

$$I_t = \pi * \frac{(2 * r)^2}{4} * I_{DC}$$

**Paso 7:** Cálculo de número y espacio de cintas circulares

$$n_{circular} = \frac{L_{tanque} * 4}{\pi * D_{tanque}}$$

$$S_c = \frac{D_{tanque}}{n_{circular}}$$

**Paso 8:** Cálculo de la longitud total de cinta anódica circular.

$$L_c = 2D_{tanque} \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{i-1}{n_{circular}} - \left(\frac{i-1}{n_{circular}}\right)^2}$$

**Paso 9:** Cálculo de número y espacio de cintas paralelas.

$$n_{paralelo} = \frac{L_{tanque} * 2}{\pi * 2 * r}$$

$$L_p = \pi * 2 * r * \sum_{i=1}^n \frac{i-1}{n_{paralelo}}$$

**Paso 10:** Cálculo de la resistencia del conductor.

$$R_c = \frac{\rho * h}{L_{tanque} * (S_c - w)} * \ln\left(\frac{S_c}{w}\right)$$

**Paso 11:** Cálculo del voltaje necesario.

$$V_{tanque} = R_c * I_{tanque}$$

**Paso 12:** Capacidad del transformador.

$$C_{transformador} = I_{tanque} * \frac{V_{tanque}}{E * F * 1000}$$

..

#### 4. Análisis de resultados

Se presentó una planta petroquímica donde se extrajo todas las coordenadas para la simulación como se muestra en la figura a continuación.

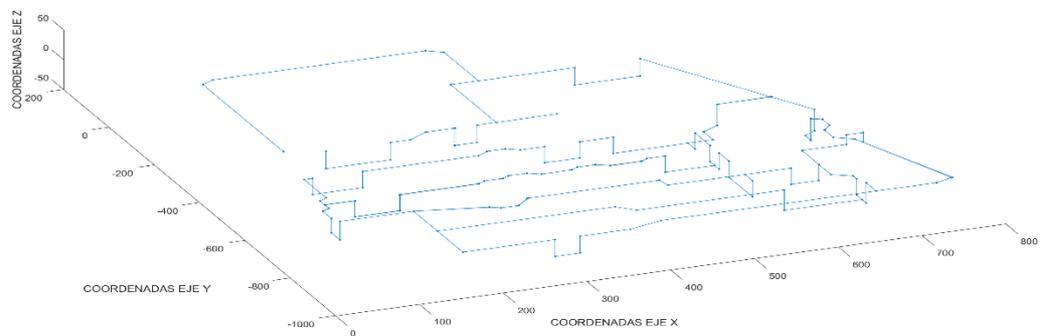


Figura 5 Planta petroquímica Total

Esta planta tiene en total de 22 tuberías distingue las tuberías enterradas por enterradas, con sus longitudes y diámetros diferenciación de capa del archivo dxf respectivos. Se obtienen las coordenadas como se muestra en la siguiente tabla: de las tuberías de las cuales el algoritmo

Tabla 11 Coordenadas de Tuberías

Tramo	Xi	Yi	Xf	Yf
1	514	-155	592	-155
2	343	-356	316	-356
3	233	-381	156	-381
4	699	-488	714	-473
5	699	-488	699	-513

6	312	-926	282	-926
7	84	-709	84	-671
8	503	-595	562	-595
9	562	-658	562	-762
10	617	-729	650	-729
11	671	-843	578	-843
12	671	-861	671	-818
13	562	-509	562	-477
14	433	-477	391	-477
15	174	-477	114	-477
16	614	-414	592	-436
17	562	-575	562	-615
18	592	-477	473	-477
19	130	-606	183	-606
20	130	-605	184	-605
21	592	-477	592	-435
22	614	-414	592	-435

Mediante estos datos, el programa muestra estas coordenadas como se muestra en la en un plano de 2 dimensiones gráficamente figura a continuación.

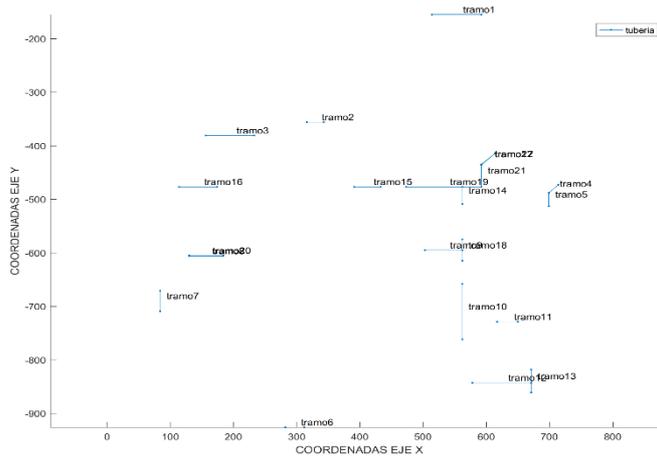


Figura 6.tuberías enterradas

Los datos que adiciona el usuario se calcula el algoritmo y se muestran en la introducen en el archivo xls, considerando siguiente tabla: que las longitudes de cada tramo los

Tabla 12 Parámetros de Diseño

Longitud (metros)	Diámetro (pulgadas)	tipo	Peso (libras)
78	14	magnesio	17
27	8	magnesio	17
77	8	magnesio	17
21	10	magnesio	17
25	10	magnesio	17
30	8	magnesio	17
38	10	magnesio	17
59	10	magnesio	17

104	14	magnesio	17
33	14	magnesio	17
93	10	magnesio	17
43	8	magnesio	17
32	8	magnesio	17
42	14	magnesio	17
60	6	magnesio	17
31	14	magnesio	17
40	14	magnesio	17
119	15	magnesio	17
53	6	magnesio	17
54	14	magnesio	17
42	14	magnesio	17
30	15	magnesio	17

Con estos datos del diseño se obtienen los resultados. Se obtiene una densidad de corriente de 18.03 (mA) y un peso por cama anódica de 112.43 (kg) para de magnesio. Estos datos no cambian para ningún tramo debido a que se calcula para una misma resistividad de terreno y un mismo número de ánodos por cama anódica.

Tabla 13 Resultados Mediante Pesos

Corriente Total (mA)	Peso Anódico (kg)	Número de Ánodos	Espaciamiento (m)
-1461,52	410,79	54	1,44
-289,09	81,26	11	2,45
-824,45	231,73	31	2,48
-281,06	79	11	1,91
-334,6	94,05	13	1,92
-321,21	90,28	12	2,5
-508,59	142,95	19	2
-789,65	221,95	29	2,03
-1948,7	547,72	72	1,44
-618,34	173,8	23	1,43
-1244,7	349,85	46	2,02
-460,41	129,41	17	2,53
-342,63	96,3	13	2,46
-786,97	221,19	29	1,45
-481,82	135,43	18	3,33
-580,86	163,26	22	1,41
-749,5	210,66	28	1,43
-2389,03	671,48	88	1,35
-425,61	119,63	16	3,31
-1011,82	284,39	37	1,46
-786,97	221,19	29	1,45
-602,28	169,28	22	1,36

También se obtiene las resistividades por cada ánodo y conductor total, donde la

resistividad de cada ánodo no tendrá ninguna variación debido a que todos los ánodos son del mismo material y peso.

Tabla 14 Resistencias Resultantes

Resistencia Total Conductor (ohm)	Resistencia de Ánodos Verticales (ohm)
0,16	10,67
0,2	10,67
0,2	10,67
0,18	10,67
0,18	10,67
0,2	10,67
0,18	10,67
0,19	10,67
0,16	10,67
0,16	10,67
0,19	10,67
0,21	10,67
0,2	10,67
0,16	10,67
0,24	10,67
0,16	10,67
0,16	10,67
0,16	10,67
0,24	10,67
0,16	10,67
0,16	10,67
0,16	10,67
0,24	10,67
0,16	10,67
0,16	10,67
0,16	10,67

Mediante el cálculo de corrientes se obtiene la corriente drenada, el número de ánodos, el tiempo útil y el espacio entre ánodos como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 15 Resultados Aplicando Método de Corrientes

Corriente drenada (mA)	Tiempo (años)	Número	Espaciamiento (m)
73,87	11,14	20	3,9
73,59	11,18	4	6,75
73,58	11,19	11	7
73,74	11,16	4	5,25
73,74	11,16	5	5
73,58	11,19	4	7,5
73,72	11,16	7	5,43
73,71	11,17	11	5,36
73,87	11,14	26	4
73,88	11,14	8	4,13
73,71	11,17	17	5,47
73,57	11,19	6	7,17
73,59	11,18	5	6,4

73,87	11,14	11	3,82
73,35	11,22	7	8,57
73,88	11,14	8	3,88
73,88	11,14	10	4
73,9	11,14	32	3,72
73,35	11,22	6	8,83
73,87	11,14	14	3,86
73,87	11,14	11	3,82
73,9	11,14	8	3,75

Al utilizar el método de corrientes para el se calcula el coeficiente de apantallamiento número y espaciamento de ánodos se como se muestra en la tabla a continuación: emplean los parámetros de convergencia y

Tabla 16 Convergencia de Diseño

Longitud protegida (m)	Longitud sobrante (m)	Área sobrante (m)	Corriente sobrante (mA)	Coeficiente de apantallamiento (%)
78	0	0	0	1,5
27	0	0	0	1,3
77	0	0	0	1,3
21	0	0	0	1,39
25	0	0	0	1,38
30	0	0	0	1,3
38	0	0	0	1,37
59	0	0	0	1,36
104	0	0	0	1,5
33	0	0	0	1,5
93	0	0	0	1,37
43	0	0	0	1,29
32	0	0	0	1,3
42	0	0	0	1,5
60	0	0	0	1,22
31	0	0	0	1,51
40	0	0	0	1,51
119	0	0	0	1,53
53	0	0	0	1,23
54	0	0	0	1,5
42	0	0	0	1,5
30	0	0	0	1,53

Para el diseño del sistema de protección coordenadas dadas como se muestra en la catódica de los tanques, existen 5 tanques tabla a continuación: con sus diámetros conocidos y sus

Tabla 17 Coordenadas de Tanques

X centro	Y centro	Radio (m)	Longitud del ánodo (m)
236	-302	35	4891
203	-205	27	2911
257	-83	68	18462
272	-209	16	1023

Mediante el algoritmo de corriente impresa respectivos como se muestra en la tabla a se obtiene el número de cintas anódicas continuación:  
 concéntricas o el número de cintas  
 anódicas paralelas con sus espaciamentos

Tabla 18 Resultado del Número necesario de Cintas Anódicas

Tiras en paralelo	Espaciamiento en paralelo (m)	Tiras Concéntricas	Espaciamiento Concéntrico (m)
45	0,78	89	0,79
35	0,77	69	0,78
87	0,78	173	0,79
21	0,76	41	0,78
21	0,76	41	0,78

Los datos necesarios para conocer qué tipo transformador se muestran con los de rectificador y cuál será la potencia del resultados de la siguiente tabla:

Tabla 19 Resultados de Parámetros para Selección del Rectificador y Transformador.

Resistividad (ohm)	Corriente total (A)	Voltaje (V)	Capacidad del Trafo (kVA)
0,13	78,25	9,87	1,21
0,21	46,57	9,91	0,72
0,03	295,38	9,87	4,56
0,61	16,35	9,92	0,25
0,61	16,35	9,92	0,25

Mediante los datos obtenidos se determina el tipo de rectificador como se muestra en la tabla:

Tabla 20. Tipo de Rectificador según Catalogo

Tanque	Voltaje (V)	Corriente (A)	Tipo de enfriamiento.	Conexión
#1	10	80	aceite-aire	1Φ-3Φ
#2	10	50	aceite-aire	1Φ-3Φ
#3	10	250	aceite	1Φ-3Φ
#4	10	20	aceite-aire	1Φ-3Φ
#5	10	20	aceite-aire	1Φ-3Φ

El resultado de todos los datos obtenidos se graficará en el lugar como se muestra en la figura con todas las tuberías de la planta.

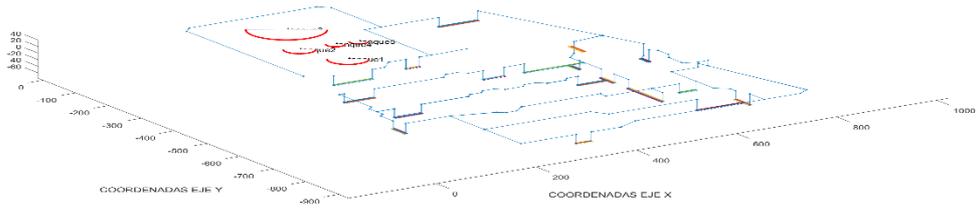


Figura 7 planta petroquímica completa con la ubicación de ánodos

Y para más detalle se obtendrá en una planta de 2 dimensión como se muestra en la figura.

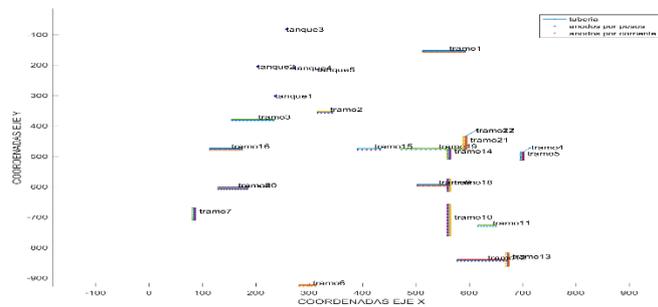


Figura 8 Tuberías enterradas con ubicación de ánodos

Para un mejor detalle se tiene en cuenta el número de ánodos que se necesitan con diferentes materiales y pesos similares, como se muestra en la figura 9:

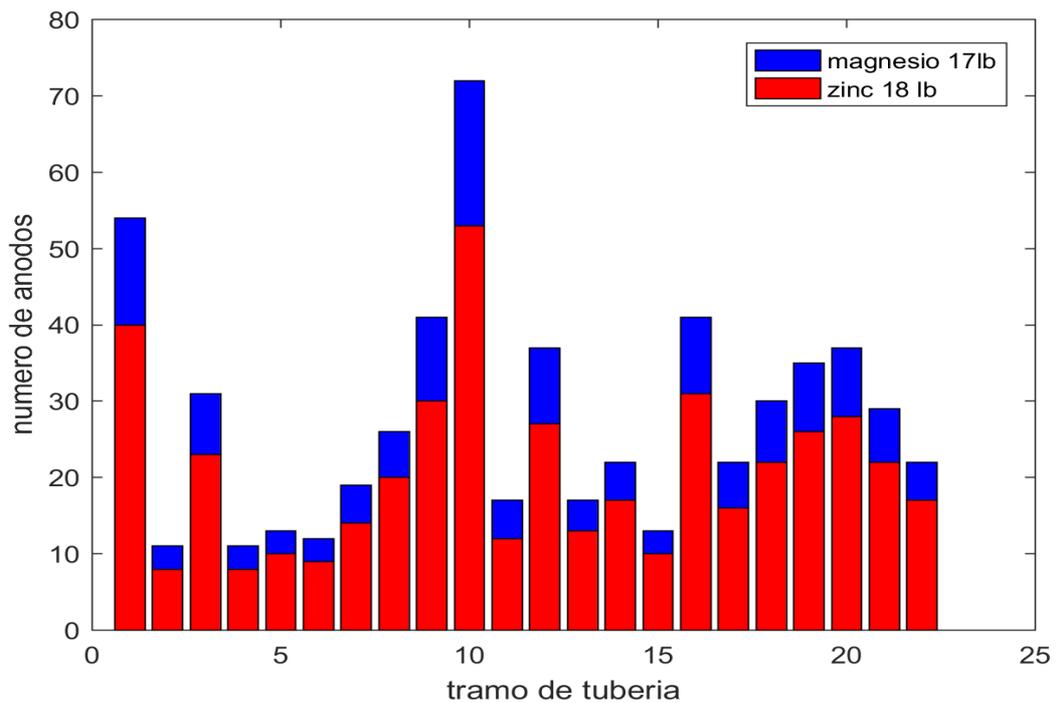


Figura 9. Número de Ánodos mediante Método de Pesos por Tramo.

En la figura de corrientes se observa que se cumple la corriente mínima.

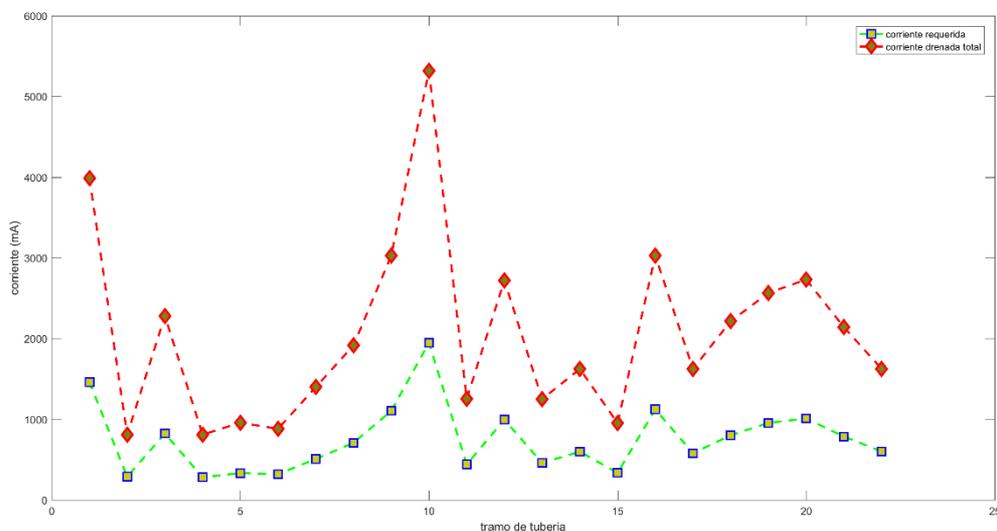


Figura 10 Requerimiento de corrientes con un máximo de ánodos

Una vez aplicado el método de cálculo por tipos de materiales como se muestra en la figura 11, se reduce a un mínimo entre los diferentes

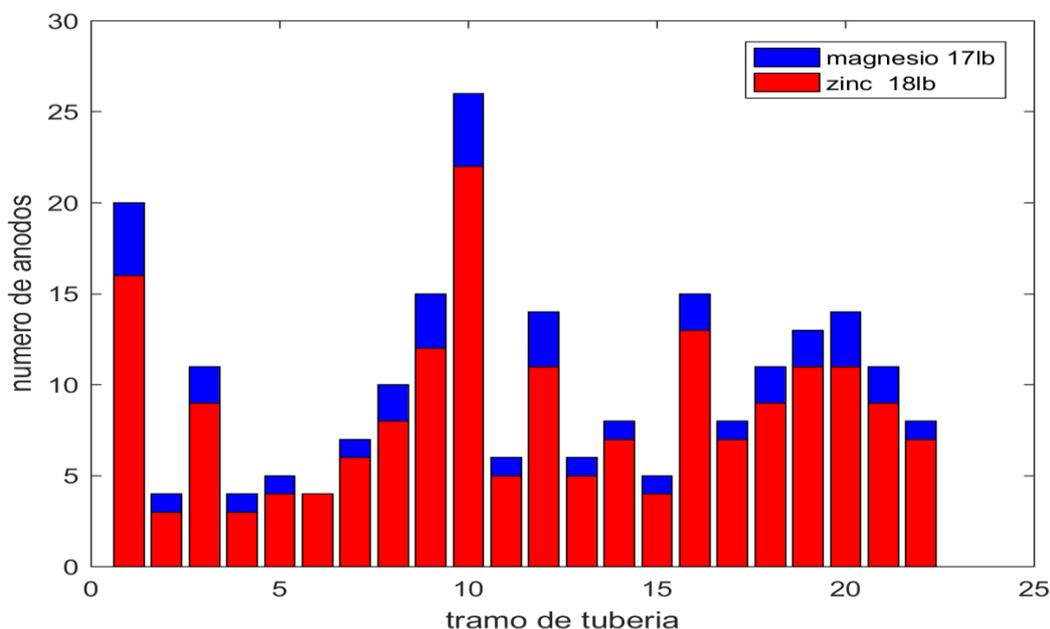


Figura 11. Número de Ánodos mediante Método de Corrientes, por Tramo.

Por este método se puede observar que el requerimiento de corriente se cumple con la mínima de corriente requerida.

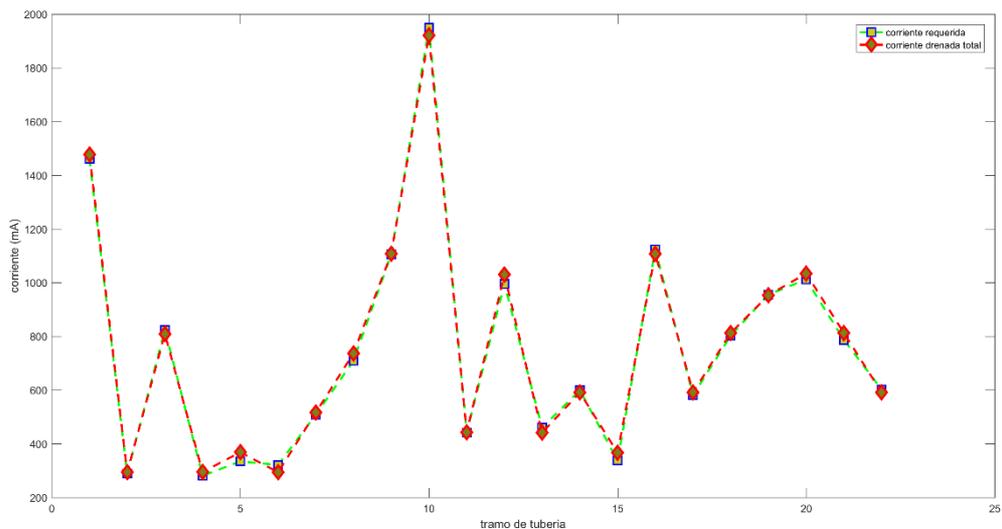


Figura 12 Requerimiento de corriente con mínimo de ánodos.

Como se puede observar, la diferencia del número de ánodos no es muy grande al realizarlo por el método de corrientes. La diferencia de estos es el tiempo de vida útil en ambos diseños. Se tomó en cuenta un diseño a 15 años. Por ejemplo, para el diseño del tramo 8 de la planta, se diseña para todos los materiales anódicos y todos sus pesos: los ánodos de magnesio y zinc; 3 pesos para el

magnesio: 17 lb, 30 lb, 60lb y 3 pesos para el zinc: 18 lb, 32 lb, 60 lb. Esto es para poder comparar el tiempo de vida útil en cada diseño. Primero se toma un mismo material a diferentes pesos donde se puede observar que a mayor peso, menor número de ánodos tanto para el zinc (ver figura 13) como para el magnesio (ver figura 14).

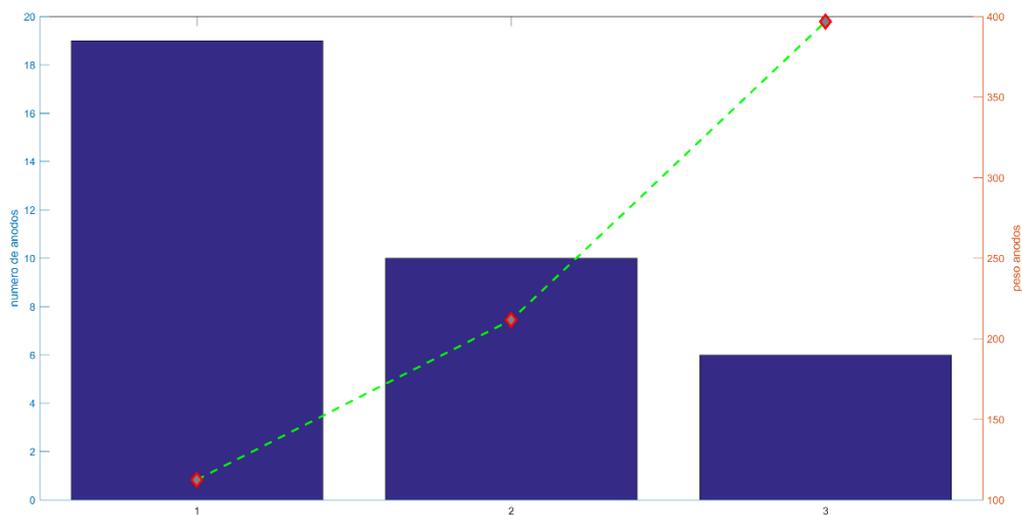


Figura 13. Comparación de Número de Ánodos de Zinc respecto a sus pesos (1) 18lb (2) 30lb (3) 60lb. Eje de las ordenadas a la izq, indica el número de ánodos. Eje de las ordenadas a la der, indica el peso total de los ánodos en su cama.

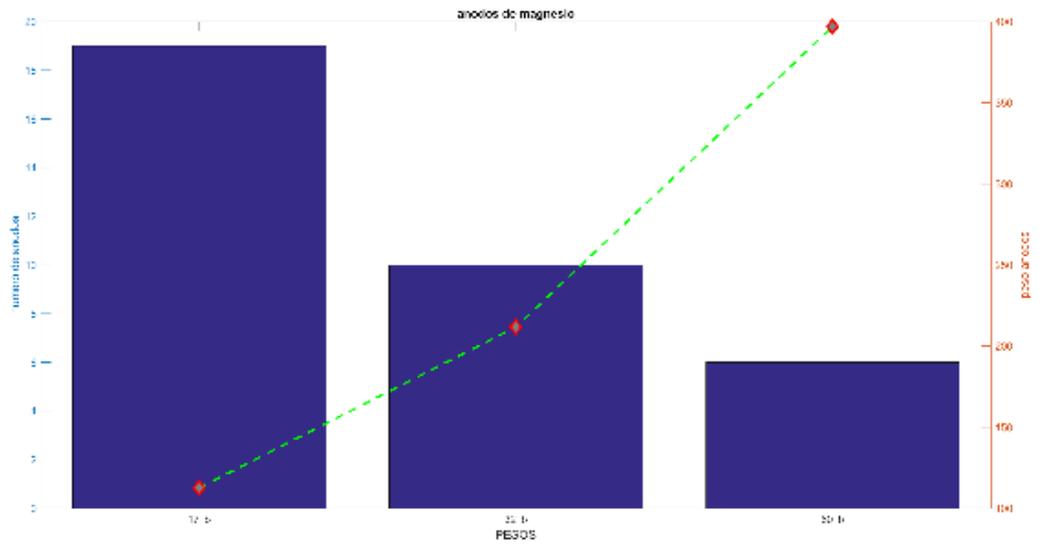


Figura 14. Comparación de Número de Ánodos de Magnesio respecto a sus pesos (1) 17lb (2) 32lb (3) 60lb . Eje de las ordenadas a la izq, indica el número de ánodos. Eje de las ordenadas a la der, indica el peso total de los ánodos en su cama.

También se puede notar que el drenaje de cumple para el magnesio (figura 15) como corrientes para diferentes pesos también para el zinc (figura 16).

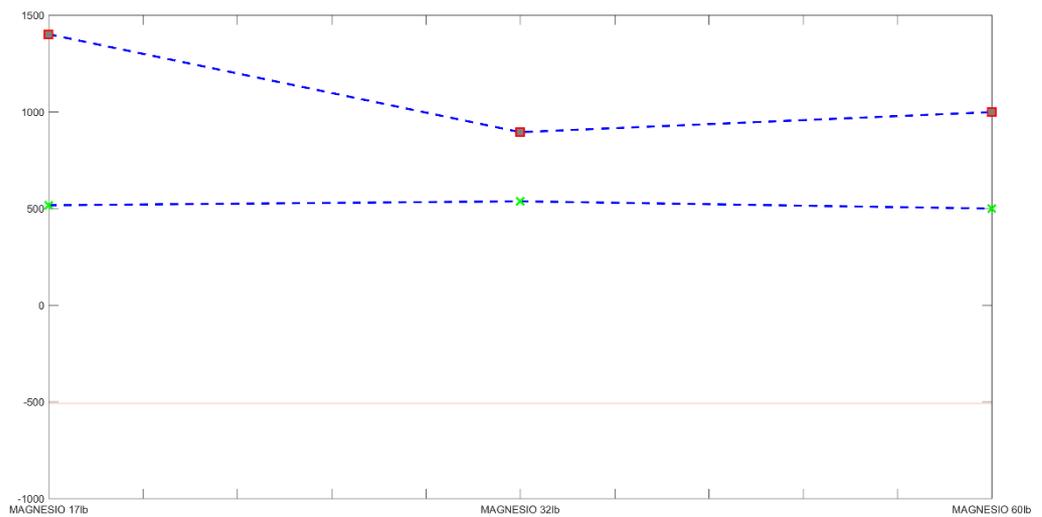


Figura 15 Requerimiento de corrientes magnesio

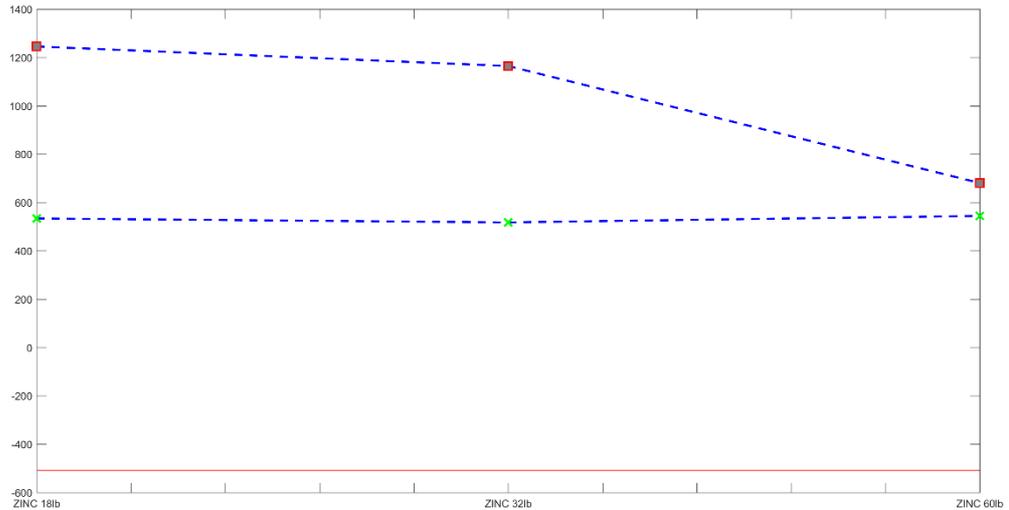


Figura 16 Requerimiento de corrientes zinc

En este punto se tiene en cuenta que los equilibrio al llegar ambos al peso de 60 lb ánodos de magnesio y zinc llegan a un como se muestra en la figura 15.

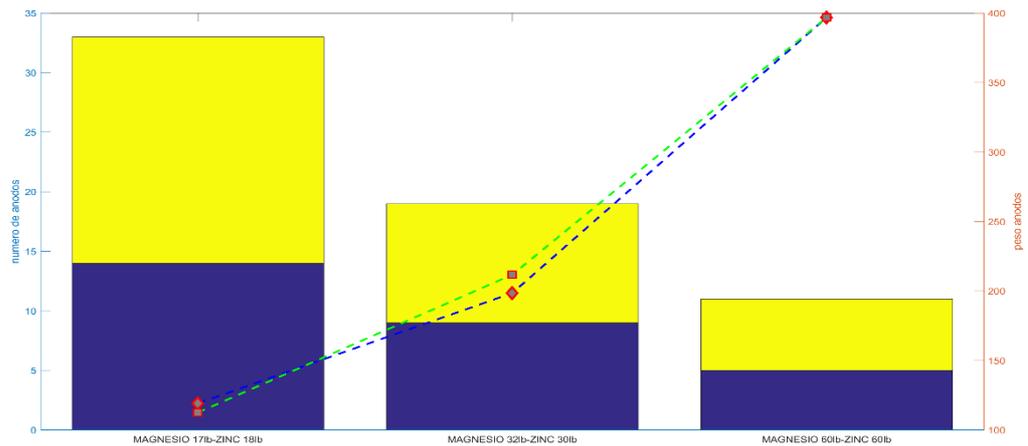


Figura 17. Comparación de número de ánodos de zinc y magnesio respecto a sus pesos similares. Eje de las ordenadas a la izq, indica el número de ánodos. Eje de las ordenadas a la der, indica el peso total de los ánodos en su cama.

Para un diseño se tiene que tener en cuenta que en la práctica no es recomendable instalar ánodos muy pesados por el problema de transporte y de su sembrado.

Como se muestra en la figura 18 se nota que los ánodos de magnesio tienen una mayor eficacia que los ánodos de zinc por lo tanto se deberá incluir un diseño de ánodos de magnesio para el sistema de protección de la planta.

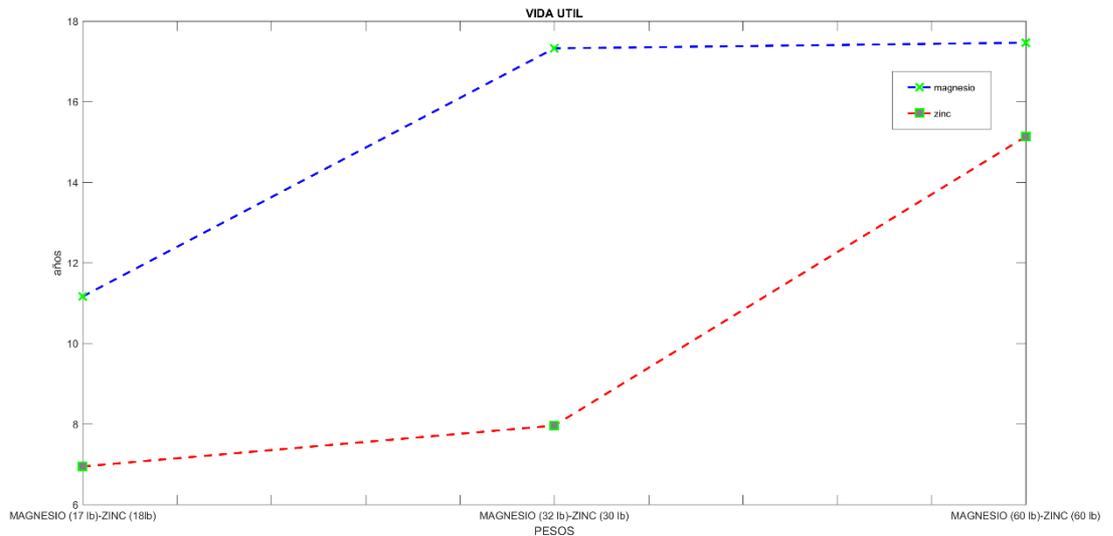


Figura 18. Vida útil del Ánodo a diferentes Pesos Comerciales. En el eje de las x, el eje 1 es magnesio de 18 lb y zinc de 17 lb. El eje 2 corresponde a magnesio de 30 lb y zinc de 32 lb y en el eje 3 son 60 lb de magnesio y 60 lb de zinc.

## 5. Conclusiones

Mediante la simulación del sistema de protección catódica se pudo obtener las corrientes mínimas necesarias con su respectivo espaciamiento entre ellos para así dar un mínimo de ánodos de sacrificio, como un máximo de ánodos para un correcto sistema de protección catódica realizado a partir de las bases y criterios de diseño de las normas NACE y HA-201.

Mediante las ecuaciones aplicadas en los algoritmos se obtuvo resultados de corrientes como resistividades de la simulación de los cuales se puede obtener los materiales estructurales para la instalación de tal manera de pasar del estado teórico al práctico.

La simulación mediante la exportación de datos facilita la utilización de los algoritmos planteados debido a la obtención de coordenadas desde un plano arquitectónico para el diseño correcto de un sistema de protección catódica aplicando y cumpliendo los criterios de las normas NACE y HA-201.

## Futuros trabajos

Para la continuación de la investigación en el área de ingeniería eléctrica se propone:  
 Diseño de un sistema de protección catódica incluyendo interferencias AC/dc ya sea por fuentes o descargas eléctricas en sistemas de puesta tierra.  
 Diseño de un sistema de protección catódica mediante la utilización de métodos numéricos.

## 6. Referencias

- [1] E. M. S. Diaz, "Optimización y simulación de procesos de corrosión," *Vector plus miscelánea Cient.*, no. 21, pp. 27–34, 2003.
- [2] R. Raichev, L. Veleva, and B. Valdez, "Corrosión de metales y degradación de materiales," *Editor. UABC*, pp. 155–170, 2009.
- [3] M. A. Zavareh, A. A. D. M. Sarhan, R. Karimzadeh, R. Singh, and K. Singh, "Analysis of corrosion protection behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> oxide ceramic coating on carbon steel pipes for petroleum industry," *Ceram. Int.*,

- vol. 44, no. 6, pp. 5967–5975, 2018.
- [4] R. Medina, “La corrosión y protección catódica como método de control en oleoductos, gasoductos, tanques de almacenamiento y tuberías en general 3rd. ed,” *México Ltd*, pp. 23–53, 2007.
- [5] B. M. Nausha Asrar, M. S. Oystein Birketveit, and J. Joshua E, “Corrosion-The Longest war,” *Oilf. Schumberger*, vol. 2, 2016.
- [6] J. del R. Torres Hernández, E. D. A. Meraz, and L. Veleva, “Evaluación de un sistema de protección catódica de un gasoducto enterrado,” *Rev. Latinoam. Metal. y Mater.*, vol. 37, no. 1, pp. 19–26, 2017.
- [7] E. Vera, J. Villarreal, and J. H. Panqueva, “Procesos de corrosión debidos a corrientes alternas inducidas (60 Hz),” *Rev. Metal.*, vol. 32, no. 5, pp. 287–292, 1996.
- [8] L. Borrero and K. E. Andre, “Evaluación de titanio anodizado para su uso en sistemas de protección catódica por corriente impresa,” 2017.
- [9] V. Del Aguila and C. Albert, “Corrosión galvánica de la amalgama en la interacción con aleaciones de acero-cromo y con cromo-cobalto, in vitro,” 2017.
- [10] O. Gil and V. Antonio, “Avances en la medida de la protección catódica de estructuras metálicas enterradas mediante métodos de desconexión ciclica,” 2017.
- [11] T. Jiménez, J. Martín, Z. Masías, and C. Anderson, “protección catódica con corriente impresa de un acero astm a-36, enterrado en suelo franco arenoso húmedo,” 2016.
- [12] N. Perez, “Electrochemical Corrosion,” in *Electrochemistry and Corrosion Science*, Springer, 2016, pp. 1–23.
- [13] A. Demoz and W. I. Friesen, “Simplified calculations of impressed current anode bed resistance underneath tank bottoms,” *Corrosion*, vol. 64, no. 2, pp. 138–142, 2008.
- [14] A. L. E. Gutiérrez, A. L. L. León, M. C. C. Gaytán, and Z. C. Rojas, “Velocidad de corrosión en el sistema acero-concreto: enfoque al método de curado,” *Cult. Científica y Tecnológica*, no. 52, 2016.
- [15] R.-C. Zeng, Z.-Z. Yin, X.-B. Chen, and D.-K. Xu, “Corrosion Types of Magnesium Alloys,” in *Magnesium Alloys-Selected Issue*, IntechOpen, 2018.
- [16] J. M. Echarri, C. A. Gervasi, P. D. Bilmes, C. L. Llorente, P. F. Bonvicini Menéndez, and Á. J. Martínez, “Efecto de la segregación de molibdeno sobre la resistencia a la corrosión localizada de soldaduras de aceros AL6XN®,” in *XXII Conferencia del Acero IAS (Rosario, 23 al 25 de octubre de 2018)*, 2018.
- [17] S. A. Barros Vega, S. Calderón, and M. Thiriél, “Elaboración de una matriz de toma de decisión para el plan de análisis y control de corrosión en la línea de descarga de pozo en facilidades de producción del campo A,” Fundación Universidad de América, 2019.
- [18] I. P. Bernal Rojas, “Evaluación técnica financiera de la resistencia del fosfatado en caliente como material de recubrimiento en las conexiones de los estabilizadores tubulares de la tubería de perforación,” Fundación Universidad de América, 2018.
- [19] R. Xiao, G. Xiao, B. Huang, J. Feng, and Q. Wang, “Corrosion failure cause analysis and evaluation of corrosion inhibitors of Ma Huining oil pipeline,” *Eng.*

- Fail. Anal.*, vol. 68, pp. 113–121, 2016.
- [20] D. A. R. Caro, E. V. López, and H. M. M. Barajas, “Diseño e implementación de un sistema de adquisición y monitoreo de datos (shm) para un rectificador de protección catódica usado en ductos.,” *Respuestas*, vol. 21, no. 1, pp. 45–55, 2016.
- [21] M. Y. Tan, Y. Huo, and others, “Cathodic Protection Affected by Anodic Transients: Critical Duration and Amplitude,” in *CORROSION 2018*, 2018.
- [22] C. A. Giudice and A. M. Pereyra, “Protección catódica con ánodos galvánicos,” *Univ. Tecnológica Nac. La Plata*, 2002.
- [23] D. Whitmore, “Galvanic cathodic protection of corroded reinforced concrete structures,” in *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 199, p. 5006.
- [24] B. N. Popov and J.-W. Lee, “Cathodic protection of pipelines,” in *Handbook of Environmental Degradation of Materials (Third Edition)*, Elsevier, 2018, pp. 509–532.
- [25] B. Bazan, W. Jahaira, F. Vilchez, and J. M. Alejandra, “influencia de la densidad de corriente y dosis de hipoclorito de sodio sobre la resistencia a la corrosión del acero inoxidable aisi 304 protegido catódicamente con corriente impresa, expuesto en agua de mar natural contaminada con hipoclorito,” 2019.
- [26] R. Aksu, R. O. Uguz, M. Erdogan, H. Meco, and I. Karakaya, “Investigation, Modeling and Design of a Cathodic Protection System for Hull Structures in Marine Environment,” *ECS Trans.*, vol. 72, no. 17, pp. 163–170, 2016.
- [27] T. Moscol Sandoval, “Mejoras para la protección anticorrosiva en la zona splash de los pilotes en el muelle del Terminal Bayóvar,” 2017.
- [28] F. Candia Garcia, J. Contreras, C. Robles, J. L. Arizpe Islas, and M. de Gante García, “Convertidor semi controlado CA-CD,” *Sci. Technol. Educ. Res.*, vol. 6, no. 1, pp. 334–342, 2018.
- [29] R. C. Villacís Soria, “Prototipo de dopaje por magnetron, con tecnología de pulverización catódica, para la creación de celdas solares fotovoltaicas,” Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas, 2018.
- [30] T. Maroñas Dosil, “Proyección de la energía eólica en España. Estudio de viabilidad tecnico-económico de un parque eólico offshore en la costa Gallega,” 2016.
- [31] C. A. Espinoza Huaman\`i, “Protección catódica por corriente impresa para control de corrosión externa de tanques sumideros enterrados usados en la producción de petróleo Pavayacu-Loreto,” 2014.
- [32] M. Hannig, “Calculation of the assembled grounding resistance from complex grounding systems by using analytical considerations only,” *ICHVE 2018 - 2018 IEEE Int. Conf. High Volt. Eng. Appl.*, no. 3, pp. 1–4, 2019.
- [33] NACE International, “Protección catódica nivel 1 manual de enseñanza,” 2010, p. 3:7;3:31;3:32.
- [34] NACE International, “CP 3–TÉCNICO SUPERIOR EN PROTECCIÓN CATÓDICA MANUAL DEL CURSO,” 2007.
- [35] PDVSA, “HA-201 CRITERIOS DE DISEÑO PARA SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA,” 2005.

## 6.1. ESTADO DEL ARTE

Tabla 21 Matriz del Estado del Arte

DISEÑO Y SIMULACION DE PROTECCION CATODICA PARA LA INDUSTRIA PETROLERA																					
DATOS			TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA			
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	teoría de corrosión	protección catódica	ánodos de sacrificio	corriente impresa	corrosión de tuberías	corrosión fondos de tanques	minimización de costos	aumento de vida útil	material de estructura	resistividad terreno	factores ambientales	tipo de corrosión	algoritmo ánodos de sacrificio	algoritmo corriente impresa	programación lineal	diseño optimo	mínimo numero de ánodos	mínimo peso de ánodos	selección correcta de método de protección
1	2018	Analysis of corrosion protection behavior of Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiO <sub>2</sub> oxide ceramic coating on carbon steel pipes for petroleum industry	1	1	1		1		1	1	1	1			1		1	1	1	1	
2	2016	International measures of prevention, application and economics of corrosion technologies study (impact)	1	1		1		1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1
3	2016	Corrosion-The Longest war	1	1	1	1	1	1	1			1	1	1						1	

**DISEÑO Y SIMULACION DE PROTECCION CATODICA PARA LA INDUSTRIA PETROLERA**

DATOS		TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	teoría de corrosión	protección catódica	ánodos de sacrificio	corriente impresa	corrosión de tuberías	corrosión fondos de tanques	minimización de costos	aumento de vida útil	material de estructura	resistividad terreno	factores ambientales	tipo de corrosión	algoritmo ánodos de sacrificio	algoritmo corriente impresa	programación lineal	diseño óptimo	mínimo número de ánodos	mínimo peso de ánodos	selección correcta de método de protección
4	2016	protección catódica con corriente impresa de un acero ASTM a-36, enterrado en suelo franco arenoso húmedo	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1		1			1	1	1	
5	2017	Evaluación de un sistema de protección catódica de un gasoducto enterrado	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1
6	2016	Velocidad de corrosión en el sistema acero-concreto: enfoque al método de curado		1	1		1		1		1	1		1				1	1		1
7	2018	Corrosion Types of Magnesium Alloys	1	1		1	1				1	1			1			1	1	1	
8	2017	Evaluación de titanio anodizado para su uso en sistemas de protección catódica por corriente impresa	1	1		1			1	1	1	1				1	1	1	1	1	

**DISEÑO Y SIMULACION DE PROTECCION CATODICA PARA LA INDUSTRIA PETROLERA**

DATOS		TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	teoría de corrosión	protección catódica	ánodos de sacrificio	corriente impresa	corrosión de tuberías	corrosión fondos de tanques	minimización de costos	aumento de vida útil	material de estructura	resistividad terreno	factores ambientales	tipo de corrosión	algoritmo ánodos de sacrificio	algoritmo corriente impresa	programación lineal	diseño óptimo	mínimo número de ánodos	mínimo peso de ánodos	selección correcta de método de protección
9	2018	Efecto de la segregación de molibdeno sobre la resistencia a la corrosión localizada de soldaduras de aceros AL6XN	1	1	1				1	1	1		1					1			1
10	2017	Corrosión galvánica de la amalgama en la interacción con aleaciones de acero-cromo y con cromo-cobalto, in vitro	1	1	1		1				1	1	1		1			1	1	1	1
11	2019	Stress Corrosion Cracking. Between the Corrosion Defect and the Long Crack: the Phase of the Initiation of the Cracks	1	1		1	1	1	1	1	1			1	1					1	1
12	2018	Corrosión por picado en soldaduras de AISA (AL6XN)	1	1	1	1	1	1	1		1			1		1		1	1	1	1
13	2018	Corrosión marina en estructuras offshore	1	1		1		1	1	1	1		1			1		1	1	1	

**DISEÑO Y SIMULACION DE PROTECCION CATODICA PARA LA INDUSTRIA PETROLERA**

DATOS		TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	teoría de corrosión	protección catódica	ánodos de sacrificio	corriente impresa	corrosión de tuberías	corrosión fondos de tanques	minimización de costos	aumento de vida útil	material de estructura	resistividad terreno	factores ambientales	tipo de corrosión	algoritmo ánodos de sacrificio	algoritmo corriente impresa	programación lineal	diseño óptimo	mínimo número de ánodos	mínimo peso de ánodos	selección correcta de método de protección
14	2017	MECANISMOS DE DEGRADACIÓN POR CORROSIÓN		1	1	1	1		1		1	1		1				1	1		1
15	2018	Decoupling the role of stress and corrosion in the intergranular cracking of noble-metal alloys	1	1		1	1				1	1			1			1	1	1	
16	2019	Susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno de aceros de alta resistencia: comportamiento en ambientes marinos y modelización de patrones de agrietamiento	1	1		1			1	1	1	1				1	1	1	1	1	1
17	2018	Corrosion and protection of the metallic structures in the petroleum industry due to corrosion and the techniques for protection	1	1	1	1				1	1	1		1				1	1	1	1

**DISEÑO Y SIMULACION DE PROTECCION CATODICA PARA LA INDUSTRIA PETROLERA**

ITEM	DATOS		TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA			
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	teoría de corrosión	protección catódica	ánodos de sacrificio	corriente impresa	corrosión de tuberías	corrosión fondos de tanques	minimización de costos	aumento de vida útil	material de estructura	resistividad terreno	factores ambientales	tipo de corrosión	algoritmo ánodos de sacrificio	algoritmo corriente impresa	programación lineal	diseño óptimo	mínimo número de ánodos	mínimo peso de ánodos	selección correcta de método de protección
18	2019	Elaboración de una matriz de toma de decisión para el plan de análisis y control de corrosión en la línea de descarga de pozo en facilidades de producción del campo A	1	1	1	1	1			1	1	1		1			1	1	1	1	
19	2018	Evaluación técnico financiera de la resistencia del fosfatado en caliente como material de recubrimiento en las conexiones de los estabilizadores tubulares de la tubería de perforación	1	1		1	1	1	1	1	1		1	1							
20	2016	Corrosion failure cause analysis and evaluation of corrosion inhibitors of Ma Huining oil pipeline	1	1	1		1	1	1		1		1		1		1	1	1	1	
21	2017	EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA DE UN GASODUCTO ENTERRADO	1	1		1	1	1	1	1		1			1		1	1	1		

**DISEÑO Y SIMULACION DE PROTECCION CATODICA PARA LA INDUSTRIA PETROLERA**

DATOS		TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	teoría de corrosión	protección catódica	ánodos de sacrificio	corriente impresa	corrosión de tuberías	corrosión fondos de tanques	minimización de costos	aumento de vida útil	material de estructura	resistividad terreno	factores ambientales	tipo de corrosión	algoritmo ánodos de sacrificio	algoritmo corriente impresa	programación lineal	diseño óptimo	mínimo número de ánodos	mínimo peso de ánodos	selección correcta de método de protección
22	2016	Diseño e implementación de un sistema de adquisición y monitoreo de datos (shm) para un rectificador de protección catódica usado en ductos		1	1	1	1	1			1	1		1				1	1		1
23	2018	Cathodic Protection Affected by Anodic Transients: Critical Duration and Amplitude	1	1	1		1				1	1			1			1	1	1	
24	2016	Electrochemical Corrosion	1	1		1	1		1	1	1				1	1	1	1	1	1	
25	2018	Galvanic cathodic protection of corroded reinforced concrete structures	1	1		1			1	1	1		1					1		1	1
26	2018	Cathodic protection of pipelines	1	1	1		1				1	1	1		1			1	1	1	1

**DISEÑO Y SIMULACION DE PROTECCION CATODICA PARA LA INDUSTRIA PETROLERA**

DATOS		TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	teoría de corrosión	protección catódica	ánodos de sacrificio	corriente impresa	corrosión de tuberías	corrosión fondos de tanques	minimización de costos	aumento de vida útil	material de estructura	resistividad terreno	factores ambientales	tipo de corrosión	algoritmo ánodos de sacrificio	algoritmo corriente impresa	programación lineal	diseño óptimo	mínimo número de ánodos	mínimo peso de ánodos	selección correcta de método de protección
27	2019	influencia de la densidad de corriente y dosis de hipoclorito de sodio sobre la resistencia a la corrosión del acero inoxidable aisi 304 protegido catódicamente con corriente impresa, expuesto en agua de mar natural contaminada con hipoclorito	1	1	1	1	1	1	1	1	1			1				1			1
28	2016	Investigation, Modeling and Design of a Cathodic Protection System for Hull Structures in Marine Environment	1	1	1		1	1	1					1		1		1	1	1	1
29	2017	Mejoras para la protección anticorrosiva en la zona splash de los pilotes en el muelle del Terminal Bayóvar	1	1		1		1	1	1			1			1		1	1	1	
30	2018	Convertidor semi controlado CA-CD	1	1	1	1		1	1	1	1		1			1	1	1	1	1	

**DISEÑO Y SIMULACION DE PROTECCION CATODICA PARA LA INDUSTRIA PETROLERA**

DATOS		TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	teoría de corrosión	protección catódica	ánodos de sacrificio	corriente impresa	corrosión de tuberías	corrosión fondos de tanques	minimización de costos	aumento de vida útil	material de estructura	resistividad terreno	factores ambientales	tipo de corrosión	algoritmo ánodos de sacrificio	algoritmo corriente impresa	programación lineal	diseño óptimo	mínimo número de ánodos	mínimo peso de ánodos	selección correcta de método de protección
31	2018	Prototipo de dopaje por magnetrón, con tecnología de pulverización catódica, para la creación de celdas solares fotovoltaicas		1	1	1	1	1		1	1		1		1	1	1	1	1		1
32	2016	Proyección de la energía eólica en España. Estudio de viabilidad técnico-económico de un parque eólico offshore en la costa Gallega	1	1	1	1	1			1	1				1	1	1	1	1	1	1
33	2007	CP 3-TÉCNICO SUPERIOR EN PROTECCIÓN CATÓDICA MANUAL DEL CURSO	1	1		1			1	1	1					1	1	1	1	1	
34	2005	HA-201 CRITERIOS DE DISEÑO PARA SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA	1	1	1	1			1	1	1		1		1	1	1	1			1

**DISEÑO Y SIMULACION DE PROTECCION CATODICA PARA LA INDUSTRIA PETROLERA**

DATOS		TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA					
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO		teoría de corrosión	protección catódica	ánodos de sacrificio	corriente impresa	corrosión de tuberías	corrosión fondos de tanques	minimización de costos	aumento de vida útil	material de estructura	resistividad terreno	factores ambientales	tipo de corrosión	algoritmo ánodos de sacrificio	algoritmo corriente impresa	programación lineal	diseño óptimo	mínimo número de ánodos	mínimo peso de ánodos	selección correcta de método de protección
35	2008	Simplified calculations of impressed current anode bed resistance underneath tank bottoms		1	1	1	1	1				1	1	1		1	1	1	1	1	1	1

31    35    21    27    22    14    19    23    31    31    13    18    13    18    11    32    28    27    21

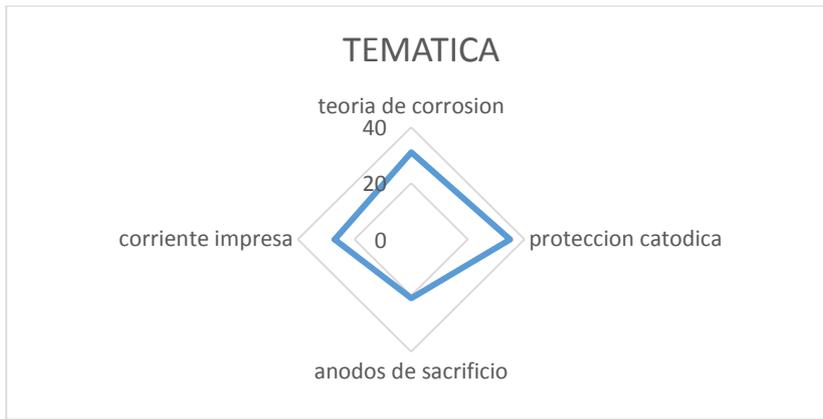


Figura 19. Temática del problema

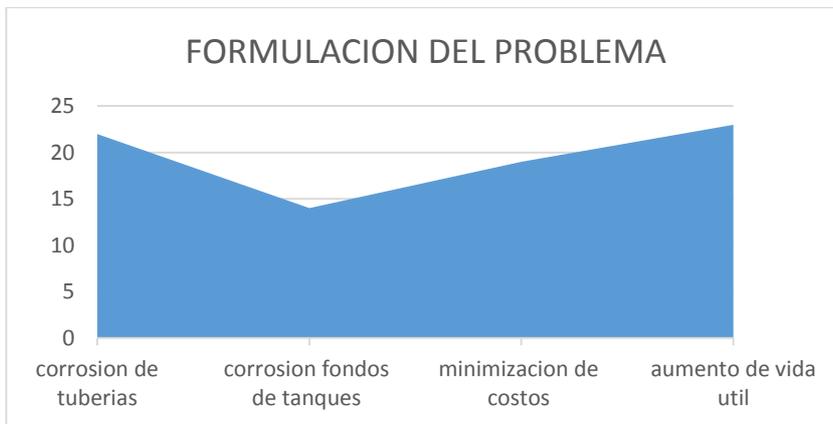


Figura 20. formulación del problema

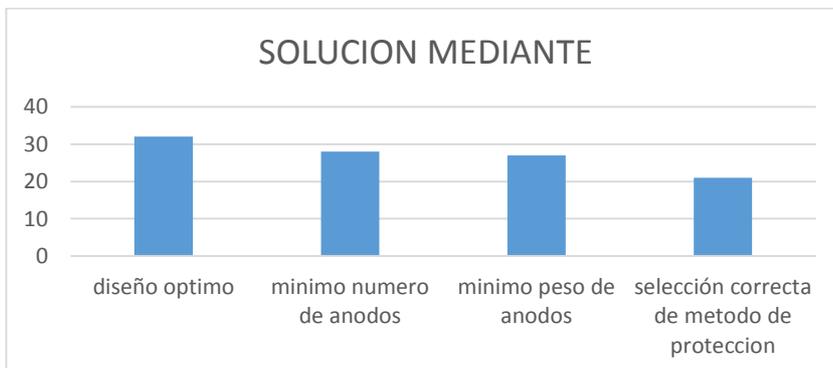


Figura 21. Solución del Problema