



**UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**  
**SIMULACIÓN DE UN PROCESO PARA EL**  
**DISEÑO DE PROTECCIÓN CATÓDICA**  
**CON ÁNODOS DE SACRIFICIO**  
**UTILIZANDO MATLAB**

**Autores:** Landaeta H. Alfonso J.  
Segovia O. Francisco M

Urb. Yuma II, Calle N°3, Municipio San Diego  
Teléfono: (0241) 871420 (Master)- Fax (0241) 81239



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**SIMULACIÓN DE UN PROCESO PARA EL DISEÑO DE PROTECCIÓN  
CATÓDICA CON ÁNODOS DE SACRIFICIO UTILIZANDO MATLAB**  
Trabajo especial de grado presentado como requisito para optar al título de

**INGENIERO MECÁNICO**

**Autores:**

Landaeta H. Alfonso J.

CI 17.571.204

Segovia O. Francisco M

CI 21.018.282

**Tutor:**

Ing. Romanello Donato

C.I.: 4.131.877

San Diego, abril de 2018.



Universidad José Antonio Páez  
Facultad de Ingeniería

FI-M-077-2018-1

Valencia, 25 de Enero de 2018.

Ciudadanos:

**Alfonso Landaeta**

**C.I: 17.571.204**

**Francisco Segovia**

**C.I: 21.018.282**

Presente.-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 1-2018 de fecha 25/01/2018 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado "SIMULACIÓN DE UN PROCESO PARA EL DISEÑO DE PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS DE SACRIFICIO UTILIZANDO MATLAB." presentado por usted(es) como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Donato Romanello, C.I. 4.131.877 y la Ing. Alicia Yanez de Pizzella, C.I. 4.598.880 como Tutores Académicos que lo asesorarán en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,

**Prof. Zulay Salcedo**  
Decana de la Facultad de Ingeniería



c. c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1).

ZS/ir



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

San Diego, Marzo de 2018.

**ACEPTACIÓN DEL TUTOR**

Quien suscribe, Ingeniero Donato Romanello, portador de la cédula de identidad N° 4.131.877, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por los ciudadanos Alfonso Landaeta, portadora de la cedula de identidad N° 17.571.204 y Francisco Segovia, portador de la cedula de identidad N° 21.018.28 titulado **SIMULACIÓN DE UN PROCESO PARA EL DISEÑO DE PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS DE SACRIFICIO UTILIZANDO MATLAB**, presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los 23 días del mes de marzo del 2018.

Ing. Donato Romanello  
C.I.: 4.131.877

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad José Antonio Páez, por contribuir directamente en nuestra formación académica para llegar a este punto de inflexión como lo nuestro mi trabajo de grado.

Al el Ingeniero Donato Romanello, en su calidad de Tutor por su apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo de grado.

A la licenciada Dayana Escobar, por su colaboración y disposición para con nosotros.

Al Ingeniero Cesar Girón, por su invaluable aporte y conocimientos en el área de programación, que si en el este trabajo de grado no podría haberse completado.

**Alfonso Landaeta Y Francisco Segovia.**

## **DEDICATORIA**

Todo este logro se lo dedico a Dios, quien supo guiarme por el buen camino, por su protección y sobre todo por darme las fuerzas para seguir adelante, para no desmayar ante las adversidades y por darme la capacidad necesaria para poder lograr esta meta tan importante.

A mis padres, Maigualida Hostos y Juan Landaeta, por el gran sacrificio y esfuerzo, por creer en mí y en mis capacidades, por siempre inculcarme el valor del estudio, por ver más allá de lo que yo veía, pero sobre todo por todo el apoyo que me brindaron en este camino, que no fue fácil, pero con su apoyo se hizo llevadero.

A mi Hermano, Alvaro Landaeta, por su motivación y ser un digno ejemplo de ingeniosidad y de superación personal.

También va dedicado a mi novia, Andrea Del Buono, por haberme apoyado en el momento en que decidí cambiar el camino, pero no la meta, por dedicar su tiempo para estar conmigo en el desarrollo de mis labores universitarias, y sobre todo por creer en mí.

**Alfonso Landaeta.**

A mi Madre Cecilia Ochoa, por su apoyo incondicional sin importar el tiempo y las fallas que presentará en el camino.

A mi Padre Francisco Segovia, por siempre ser un ejemplo a seguir en mi carrera y enseñarme a buscar la excelencia.

A mi Tía Marisol Ochoa, quien es para mí una segunda madre y como tal ha sabido darme afecto y apoyo incondicional.

A mis hermanos Ricardo y Vanessa, que de una u otra forma también les pertenecen un pedazo de este logro.

A mi novia Kelly Delgado que me a apoyado desde el principio y quien con paciencia a sabido ver lo mejor de mí.

**Francisco Segovia.**

## ÍNDICE

	<b>Pag.</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>XIV</b>
<b>LISTADO DE TABLAS.....</b>	<b>XV</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
 <b>CAPÍTULO I</b>	
<b>EL PROBLEMA.....</b>	<b>3</b>
1.1 Planteamiento Del Problema.....	3
1.2 Formulación Del Problema.....	4
1.3 Objetivos De La Investigación.....	5
1.3.1 Objetivo General.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5
1.4 Justificación Del Problema.....	5
1.5 Limitaciones.....	5
1.6 Alcance.....	6
 <b>CAPÍTULO II</b>	
<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>7</b>
2.1 Antecedentes De La Investigación.....	7
2.2 Bases Teóricas.....	9
2.2.1 Formas Básicas De La Corrosión.....	10
2.2.2 Costos De La Corrosión.....	10
2.2.3 Bases De La Electroquímica.....	12
2.2.4 Ambiente Subterráneo.....	15
2.2.5 La Resistividad Eléctrica.....	16
2.2.6 La Conductividad.....	17
2.2.7 Formas De Corrosión.....	17
2.2.7.1 Corrosión Localizada.....	17
2.2.8 Mecanismo De La Corrosión Galvánica.....	19

2.2.8.1 El Ánodo.....	20
2.2.8.2 El Cátodo.....	20
2.2.8.3 La Ruta Metálica.....	20
2.2.8.4 El Electrolito.....	20
2.2.9 Velocidades De Corrosión Galvánica.....	21
2.2.10 Diferencia De Potencial.....	21
2.2.11 Control Del Ataque Galvánico.....	22
2.2.12 Métodos De Control De Corrosión.....	22
2.2.12.1 Protección Catódica.....	22
2.2.13 Software.....	32
2.2.13.1 Software De Aplicación.....	32
2.2.13.2 Características Del Software.....	32
2.2.13.3 Aplicaciones Del Software.....	32
2.2.13.4 Software De Ingeniería Y Científico.....	33
2.2.14 Proceso De Creación Del Software.....	33
2.2.15 Simulación.....	33
2.2.16 Simulación Por Computadora.....	34
2.2.17 Matlab.....	34

### **CAPÍTULO III**

<b>MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>36</b>
3.1 Tipo De Investigación.....	36
3.2 Diseño De La Investigación.....	36
3.3 Nivel De La Investigación.....	38
3.4 Confiabilidad, Población y Muestra.....	38
3.4.1 Confiabilidad.....	38
3.4.2 Población y muestra.....	38
3.5 Técnicas e instrumentos de Recolección.....	38
3.6 Fases Metodológicas.....	39

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

4.1 Estructura de la simulación.....	<b>40</b>
4.1.2 Diagrama de flujo.....	<b>40</b>
4.2 Manual para el usuario.....	<b>41</b>
4.2.1 Pestaña “Suelo”.....	<b>41</b>
4.2.2 Pestaña “Revestimiento”.....	<b>42</b>
4.2.3 Pestaña “Corrientes”.....	<b>43</b>
4.2.4 Pestaña “Estructura”.....	<b>44</b>
4.2.5 Pestaña “Ánodos”.....	<b>45</b>
4.2.6 Pestaña “Selección”.....	<b>46</b>
4.2.7 Ventana de resultados.....	<b>47</b>
4.3 Corrida de Validación.....	<b>48</b>
4.3.1 Pestaña de validación “Suelo”.....	<b>48</b>
4.3.2 Pestaña de validación “Revestimiento”.....	<b>49</b>
4.3.3 Pestaña de validación “Corrientes”.....	<b>50</b>
4.3.4 Pestaña de validación “Estructura”.....	<b>51</b>
4.3.5 Pestaña de validación “Ánodos”.....	<b>52</b>
4.3.6 Pestaña de validación “Selección”.....	<b>53</b>
4.3.7 Ventana de validación de resultados.....	<b>54</b>
4.4 Conclusiones.....	<b>55</b>
4.5 Recomendaciones.....	<b>57</b>
4.6 Referencias bibliográficas.....	<b>58</b>
Anexos.....	<b>60</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURAS</b>		<b>Pag.</b>
1	Características de reacciones anódicas y catódicas.....	13
2	Celda de corrosión.....	14
3	Configuración básica de un sistema de protección catódica por corriente impresa.....	26
4	Diagrama de flujo de la simulación.....	40
5	Pestaña de valores de agresividad del suelo.....	41
6	Pestaña de selección de revestimiento para la tubería.....	42
7	Pestaña de selección de densidad de corriente y valor estimado de corrientes parasitas.....	43
8	Pestaña de selección del tamaño nominal de la tubería, material a proteger y longitud a proteger.....	44
9	Pestaña de selección del relleno químico para los ánodos, material y peso de los ánodos.....	45
10	Pestaña de corroboración de datos introducidos.....	46
11	Ventana desplegable de resultados.....	47
12	Pestaña de valores de agresividad del suelo (Validación).....	48
13	Pestaña de selección de revestimiento para la tubería (Validación).....	49
14	Pestaña de selección de densidad de corriente y valor estimado de corrientes parasitas (Validación).....	50
15	Pestaña de selección del tamaño nominal de la tubería, material a proteger y longitud a proteger (Validación).....	51

16	Pestaña de selección del relleno químico para los ánodos, material y peso de los ánodos (Validación).....	52
17	Pestaña de corroboración de datos introducidos (Validación)....	53
18	Ventana desplegable de resultados (Validación).....	54

### **LISTADO DE TABLAS**

<b>TABLAS</b>		<b>Pag.</b>
1	Aplicaciones de material anódico.....	25
2	Requerimientos de corriente para aceros en varios medios.....	29
3	Resistencia según el tamaño del cable.....	30
4	Rellenos químicos para ánodos galvánicos.....	31



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

## **SIMULACIÓN DE UN PROCESO PARA EL DISEÑO DE PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS DE SACRIFICIO UTILIZANDO MATLAB**

### **Autores:**

Landaeta H. Alfonso J.

Segovia O. Francisco M.

### **Tutor:**

Ing. Romanello Donato

### **RESUMEN**

Actualmente la corrosión es uno de los principales factores de costos de mantenimiento y reparación en las industrias a nivel mundial, dado que este es un problema que se presenta en todo tipo de ambientes y materiales. Es por esta razón que el desarrollo de nuevas herramientas que ayude a avanzar con el diseño de los sistemas de protección catódica los cuales contrarrestan la aparición de la corrosión en los materiales es de gran ayuda e importancia, dado que generalmente los cálculos de dichos sistemas se tornan engorrosos y repetitivos al punto que generan pérdida de tiempo y de recursos. En consecuencia, en el presente trabajo nos daremos a la tarea de generar un instrumento el cual asista al diseñador, utilizando los recursos y tecnologías computacionales disponibles en la actualidad los cuales nos permiten simular infinidad de ambientes, con diferentes materiales, configuraciones o arreglos, y otra cantidad de variables con facilidad. Por esto se ha seleccionado el software Matlab que posee una biblioteca matemática amplia y una exhaustiva capacidad para trabajar con iteraciones y matrices para realizar una simulación de un proceso para el diseño de protección catódica con ánodos de sacrificio.

## INTRODUCCIÓN

La composición y la integridad física de un material sólido se alteran en un ambiente corrosivo. Si se trata de la corrosión química, un líquido corrosivo disuelve el material. En la corrosión electroquímica, se retiran átomos del metal del material sólido como resultado de un circuito eléctrico producido. Una diversidad de mecanismos de desgaste y de desgaste-corrosión modifica la forma de los materiales. De acuerdo con un estudio concluido en el año 2001, en estados unidos el combate a la corrosión cuesta aproximadamente el 6% del producto nacional bruto (GDP). Esta cantidad que incluye costos directos e indirectos, alcanzo la cifra de aproximadamente 550.000 millones de dólares en 1998.

La corrosión no solo debe ser vigilada, sino que también debe ser tomada en consideración en el diseño de cada uno de los diferentes componentes. El proceso de corrosión, que consiste en el deterioro de un material metálico debido a una reacción con productos químicos presentes en el entorno. Existen muchos tipos de corrosión. Algunos de los importantes que se comentaron son: la de ataque uniforme o general, la galvánica o de dos metales, por picaduras, por grietas, la intergranular, por esfuerzo, por erosión, el daño por cavitación por desgaste, la fuga selectiva o desalación y la fragilidad por hidrógeno. Es posible controlar o prevenir la corrosión mediante muchos métodos diferentes. Para evitarla, es necesario utilizar cuando sea factible materiales resistentes a la misma en un ambiente determinado. En muchos casos la corrosión puede evitarse mediante el uso de recubrimientos metálicos, inorgánicos u orgánicos. El diseño adecuado de equipo de ingeniería también puede ser muy importante en muchas situaciones.

En algunos casos especiales, es posible controlar la corrosión utilizando sistemas de protección catódica o anódica. Todos estos casos donde se necesitan diseñar sistemas para proteger los materiales de los efectos Destructivo de la corrosión se requieren realizar cálculos iterativos e intrincados que pueden llegar a tomar tiempo

y recursos, Con el fin de reducir al mínimo los cálculos de diseño se pueden implementar herramientas computacionales.

Las herramientas computacionales en cualquier proceso de diseño cubren un amplio espectro: desde programas para la simulación y modelamiento numérico de geometrías muy particulares hasta programas para la realización de alguna parte de los cálculos. En el diseño de sistemas de protección catódica dada la gran variedad de materiales, geometrías y criterios prácticos que se consideran, lo ideal es realizar un programa con una interfaz que abarque los diferentes criterios y a su vez integre las ecuaciones que conocemos por estudios previos.

# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA

### 1.1 Planteamiento Del Problema

La corrosión es un fenómeno que afecta a todos los materiales (metales, cerámicas, polímeros, etc.) y todos los ambientes (medios acuosos, atmósfera, alta temperatura, etc.) Lo que provoca la corrosión es un flujo eléctrico masivo generado por las diferencias químicas entre las piezas implicadas. La corrosión galvánica es la más común de todas y se establece cuando dos metales distintos entre sí actúan como ánodo uno de ellos y el otro como cátodo. Aquel que tenga el potencial de reducción más negativo procederá como una oxidación y viceversa aquel metal o especie química que exhiba un potencial de reducción más positivo procederá como una reducción.

Por consiguiente, un mejor comportamiento de los materiales, ante ambientes agresivos, dependerá de la adopción de métodos preventivos contra la corrosión. Se define como medida preventiva, cualquier actividad implementada durante la fase que conduce a la iniciación de la corrosión, que evite o retarde el inicio de la misma. Por esta razón, la implementación de alguna de estas medidas preventivas, debe ser objeto de un análisis de costo, en función del ciclo de vida de la estructura. Partiendo de lo anteriormente expuesto, podemos decir que la protección catódica (PC) suele ser utilizada para proteger los materiales de la corrosión galvánica, y esta se define como una técnica para controlar la corrosión galvánica de una superficie de metal convirtiéndola en el cátodo de una celda electroquímica, mediante la conexión del metal a proteger con otro metal más fácilmente corrosible al actuar como ánodo de dicha celda.

Así mismo para una (PC) eficaz, el potencial de la superficie de acero ha de estar polarizado más negativo hasta que la superficie tenga un potencial uniforme. En este momento, la fuerza impulsora para la reacción de corrosión se elimina. El ánodo

galvánico se sigue corroyendo, se consume el material del ánodo hasta que finalmente éste debe ser reemplazado. La polarización es causada por el flujo de electrones del ánodo en el cátodo. La fuerza impulsora para el flujo de PC actual es la diferencia de potencial electroquímico entre el ánodo y el cátodo. Además, se puede decir que, en la actualidad, el ánodo galvánico o ánodo de sacrificio se realiza en diversas formas con aleación de zinc, magnesio y aluminio.

Con el fin de optimizar los procesos de diseño, existes diferentes herramientas computacionales mediante las cuales es posible realizar cálculos reiterativos lo cual permite la reducción del tiempo y la mejora de los costos. En este mismo orden de ideas podemos mencionar una de estas herramientas computacionales, como lo es Matlab la cual es una herramienta matemática que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M) y entre sus funciones presenta la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

## **1.2 Formulación Del Problema**

Para el desarrollo de un correcto y adecuado sistema de protección catódica, se necesita conocer de manera certera aspectos fundamentales asociados a la corrosión como lo son: velocidad de corrosión, variación del peso, disminución de espesor, estos dos últimos aspectos pueden tardar muchos años en evidenciarse, lo cual se traduce en un consumo de recursos y tiempo que pueden ser mermados con la utilización de sistemas computacionales que sean capaces de realizar cálculos iterativos aprovechando las nuevas tecnologías y de esta forma disminuir los tiempo de cálculos de manera sustancial.

## **1.3 Objetivos de la investigación**

### **1.3.1 Objetivo general**

Simular en Matlab un diseño de protección catódica mediante la utilización de ánodos de sacrificio.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Desarrollar una simulación para el diseño de protección catódica.
2. Modelar la data preexistente de forma que este en concordancia con los datos de entrada de la simulación a realizar en el trabajo de grado.
3. Comparar y verificar la semejanza de los resultados obtenidos mediante el uso de la simulación y los resultados obtenidos en pruebas de campo.
4. Analizar la factibilidad y confiabilidad de la simulación.

## **1.4 Justificación Del Problema**

La realización de este proyecto tendrá como finalidad ayudar a reducir costos, mejorar los tiempos de diseño y optimizar el desarrollo de sistemas de protección catódica para los materiales, lo cual sería un gran aporte en esta área fundamental de la ingeniería por su vinculación con la seguridad a nivel personal e industrial.

Este trabajo también podrá ser el inicio de un conjunto proyectos y de sistemas computarizados que ayuden a mejorar el diseño de sistemas de protección y prevención de la corrosión para otras condiciones ambientales o de distintos materiales, para de esta forma crear un sistema computarizado capaz de abarcar diferentes tipos de estructuras, condiciones y materiales de construcción que son utilizados a diario en la ingeniería de materiales.

## **1.5 Limitaciones**

1. Disponibilidad de los laboratorios de computación de la Universidad José Antonio Páez.
2. Capacidad de cómputo de los equipos disponibles en los laboratorios de la Universidad José Antonio Páez.

## **1.6 Alcance**

1. El presente estudio desarrollará una simulación cual será capaz de calcular de manera rápida y precisa los cálculos necesarios para el desarrollo de sistemas protección catódica.

2. La investigación abarcará únicamente el estudio de protección catódica para estructuras metálicas de acero, con ánodos de sacrificio de zinc, magnesio y aluminio, en ambientes subterráneos no marinos, bajamente corrosivos, medianamente corrosivos y altamente corrosivos.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

El propósito de este capítulo es establecer los aspectos teóricos que sustentan la presente investigación. El primer apartado comprende el análisis de algunas investigaciones realizadas en torno al objeto de estudio y el segundo apartado presenta las bases teóricas y la definición de términos básicos.

#### **2.1 Antecedentes De La Investigación**

Según, Ventura Pablo (2015), en su trabajo de grado titulado, **“Estudio de los cambios producidos en la corrosión por picadura en el casco de acero de un barco con la temperatura del mar utilizando el programa oxipis\_12”** donde realizo una análisis del cambio resultante en la composición de la solución en el interior de una picadura en función de la temperatura, para un navío haciendo uso del programa OXIPIS\_12, Un programa de simulación de procesos de oxidación permitiendo obtener una solución numérica, mediante el método de redes. Expresa que: “Para la simulación de procesos se introduce en el ordenador el conjunto de ecuaciones matemáticas, que serán resueltas mediante procedimientos de análisis numérico, y se obtiene toda la información solicitada por el usuario para cada tipo de análisis. Los resultados obtenidos son los datos correspondientes a las medidas típicas de laboratorio, lo que proporciona una gran ventaja, puesto que, se obtienen datos de una manera más veloz y económica casi con la misma precisión que en el laboratorio. También pueden modificarse las condiciones iniciales de contorno y las características térmicas del medio.”

De este trabajo podemos concluir que los datos obtenidos mediante la realización de una simulación se obtienen de una manera mucho más rápida y casi con la misma precisión que en laboratorio lo cual también ayuda a reducir costos y de igual forma proporciona la ventaja de poder modificar rápidamente las variables iniciales para realizar diferentes estudios. A sí mismo, Ferreiro Mikel (2011),

mediante su trabajo de grado titulado, **“Simulación del proceso productivo de INASA FOIL S.A”**. Establecen que: “En los países altamente desarrollados la simulación es una herramienta principal en los procesos de toma de decisiones, en la dirección de empresas y en la planificación de la producción. Además, la simulación es cada vez más “amigable” para el usuario, que no tiene que ser un especialista en computación.

A tenor de la evolución de los últimos años, las aplicaciones de la simulación parecen no tener límites”.

De este trabajo se obtuvo los pasos fundamentalmente requeridos para la realización de un análisis de datos mediante el uso de una simulación, los cuales son; Formulación del problema, Recopilación de datos y análisis, Desarrollo del modelo, Verificación y validación del modelo, Experimentación y análisis de las salidas y Implantación de los resultados de la simulación.

Por otra parte, Ornés Fernando (2012), en su informe de pasantía titulado, **“Diseño del sistema de protección catódica para el gasoducto ARECUNA-WESTLEJOS”** en el cual se diseñó un sistema de protección catódica por corriente impresa, responsable de aumentar la vida útil del gasoducto en cuestión, utilizado criterios de diseño de acuerdo a PDVSA, PEMEX y N.A.C.E. Calculó el área total de tubería a proteger, corriente de protección y la caída de potencial de la misma. De igual forma se calculó el número de ánodos a instalar en cada sección y los cables a utilizar.

Este antecedente aporta una metodología apropiada del estudio de los parámetros y cálculos necesarios para el desarrollo de protecciones catódicas según las normativas nacionales e internacionales, vigentes.

De igual forma, Rosas Marlyn (2012), A través de su informe de pasantía titulado, **“Selección y diseño de sistema de protección catódica para tuberías enterradas en el centro operacional Bare. El Tigre, edo. Anzoátegui”** donde se describen las bases y los criterios de diseño utilizados para realizar la ingeniería básica

de un sistema de protección catódica (SPC) a instalar a la línea de flujo principal de entrada de crudo al Centro Operacional Bare, de salida de diluyente hacia el campo de producción y de inyección de aguas de proceso, de diámetros 36, 16 y 8 pulgadas respectivamente, ubicadas en el corredor principal de tuberías al norte, oeste y sur del Centro Operacional Bare (COB) de PDVSA-PETROPIAR, ubicado en la Faja Petrolífera del Orinoco, Bloque Ayacucho, Campo Huyaparí, del Municipio Francisco de Miranda del Edo. Anzoátegui. Una vez obtenidos todos los parámetros, se procedió a construir una matriz de selección técnico-económica para seleccionar el método más adecuado para la protección catódica por corriente impresa y se obtuvo que el método que obtuvo mayor puntuación fue el método de protección catódica por corriente impresa utilizando ánodos poliméricos continuos.

Por medio de este trabajo se pudieron obtener los parámetros necesarios para selección y la realización de un óptimo diseño de protección catódica como lo son: resistividad del suelo, potencial eléctrico de las tuberías, densidad de corriente de protección, vida útil del sistema de protección, tipo de revestimiento de las tuberías, condiciones de operación, condiciones en las que se encontraba el suelo, los perfiles de las líneas y los perfiles topográficos.

## **2.2 Bases Teóricas**

La corrosión se define como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. De manera más general, puede entenderse como la tendencia general que tienen los materiales a buscar su forma de mayor estabilidad o de menor energía interna. Siempre que la corrosión esté originada por una reacción electroquímica (oxidación), la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, de la salinidad del fluido en contacto con el metal y de las propiedades de los metales en cuestión. Otros materiales no metálicos también sufren corrosión mediante otros mecanismos. El proceso de corrosión es natural y espontáneo.

La corrosión es una reacción química (oxido-reducción) en la que intervienen tres factores: la pieza manufacturada, el ambiente y el agua, o por medio de una reacción electroquímica. Los factores más conocidos son las alteraciones químicas de los metales a causa del aire, como la herrumbre del hierro y el acero o la formación de pátina verde en el cobre y sus aleaciones (bronce, latón). Sin embargo, la corrosión es un fenómeno mucho más amplio que afecta a todos los materiales (metales, cerámicas, polímeros, etc.) y todos los ambientes (medios acuosos, atmósfera, alta temperatura, etc.)

Podemos agregar la corrosión es un problema industrial importante, pues puede causar accidentes (ruptura de una pieza) y, además, representa un costo importante, ya que se calcula que cada poco segundo se disuelven cinco toneladas de acero en el mundo, procedentes de unos cuantos nanómetros o picómetros, invisibles en cada pieza pero que, multiplicados por la cantidad de acero que existe en el mundo, constituyen una cantidad importante.

### **2.2.1 Formas Básicas de la Corrosión**

Existen muchas formas de la corrosión. Algunas son encontradas con frecuencia en la vida diaria y en nuestro trabajo. Otras requieren combinaciones específicas de materiales y medios ambientes que pueden ser raramente encontrados. Obtener un entendimiento de los mecanismos de esas formas de la corrosión y de cómo esos mecanismos resultan en formas de corrosión específicas es un importante primer paso en el control de la corrosión. Lo que podemos entender, más fácilmente lo podemos controlar

Todas las formas de la corrosión, con la excepción de algunas formas de corrosión en alta temperatura, ocurren mediante la acción de celdas electroquímicas y estas celdas pueden actuar de muchas formas.

### **2.2.2 Costos de la Corrosión**

En los Estados Unidos, las pérdidas directas debidas a la corrosión son de más de \$276 billones de dólares anuales o el 3.1% del Producto Interno Bruto (PIB).

Estas pérdidas incluyen productos domésticos tales como automóviles, calentadores de agua, plomería, y de superficies expuestas tales como canales en techos y cañerías de salida de agua. También incluye el costo de la corrosión en la industria, y pérdidas debidas al deterioro de infraestructura pública incluyendo puentes, edificios, sistemas de abastecimiento y desecho de agua y de otras empresas de servicio público.

El costo de la corrosión no puede ser eliminado completamente. Aún si la tecnología de control de corrosión pudiera eliminarla totalmente, habría que considerar el costo de las medidas de control en el análisis de reducción de los costos de corrosión.

Si la corrosión no es propiamente considerada en el diseño inicial de un sistema, esto puede causar frecuentes paros no programados y la necesidad de mantenimiento excesivo, reparaciones y reemplazo de piezas dañadas para mantener el sistema en operación. El costo de estos factores comúnmente excede el costo de evitar la corrosión durante la etapa de diseño, mediante la selección de un material más resistente, cambios en las condiciones de operación del sistema, o la aplicación de otras medidas de control que serán descritas después en este curso.

Cuando el daño por corrosión ocurre y mantenimientos y reparaciones son requeridas, es usualmente necesario parar la producción. Estas interrupciones resultan en pérdida o reducción de ingresos a la planta, resultando en un gran impacto económico. Adicionalmente, puede haber altos costos en el paro y arranque de una planta industrial.

De igual manera hay que tomar en cuenta que La corrosión puede y desafortunadamente ha causado graves accidentes, resultando en lesiones a personas y pérdida de vidas. Los costos de accidentes relacionados con la corrosión tienen consecuencias económicas directas para cubrir esas pérdidas, y otros costos indirectos e implicaciones sociales.

### 2.1.3 Bases De La Electroquímica

La corrosión ocurre mediante relaciones electroquímicas las cuales a su vez ocurren mediante el intercambio de electrones, en electrolitos, los cuales son líquidos que pueden conducir una corriente eléctrica.

#### -Reacciones electroquímicas

- i) Ocurren en electrolitos, los cuales son líquidos que pueden conducir una corriente eléctrica.
- ii) Ocurren mediante intercambio de electrones.
- iii) Los electrones fluyen a través de metal desde uno de esos sitios a otro.
- iv) El intercambio de electrones en reacciones electroquímicas ocurre en sitios separados.

#### -La Corrosión Como Un Proceso Electroquímico

Con la excepción de algunas reacciones de corrosión en alta temperatura, todas las reacciones de corrosión son reacciones electroquímicas ocurriendo en un electrolito.

En el ánodo, la oxidación ocurre y átomos del metal son removidos de la estructura metálica, siendo incorporados en el electrolito en forma de iones. Note que una reacción con oxígeno no es requerida para que la oxidación ocurra. En la terminología usada en corrosión, la oxidación es simplemente la formación de iones positivos mediante la pérdida de electrones. Las reacciones que ocurren en el cátodo pueden involucrar muchos compuestos, pero la reducción de hidrógeno (ver figura 1)

( $H^+ + e^- \rightarrow H_2$ ) y la reducción del agua ( $2H_2O + O_2 + 4e^- \rightarrow 4(OH^-)$ ) son reacciones catódicas muy comunes, como se observa en la figura 1.

<b>Reacciones Anódicas</b>	<b>Reacciones Catódicas</b>
Pérdida de electrones	Ganancia de electrones
Aumento en carga positiva	Aumento en carga negativa
Reducción de carga negativa	Reducción de carga positiva
Oxidación	Reducción
Los electrones permanecen en el metal	El metal es la fuente de electrones

**Figura 1. Características de reacciones anódicas y catódicas**  
**Curso De Corrosión Básica, Manual Del Estudiante.**

Las características de las reacciones anódicas y catódicas son esencialmente las mismas que para las reacciones de oxidación/reducción.

#### **-La Corrosión Requiere un Circuito Completo**

Cuando una reacción anódica ocurre, los electrones permanecen en el metal y, a menos que sean consumidos en reacciones en el cátodo, tenderán a detener la reacción de corrosión. La reacción en el ánodo que resulta en la pérdida de metal solo puede proceder tan rápido como los electrones son consumidos en el cátodo. La velocidad de cualquier reacción química es disminuida por formación o crecimiento de una barrera de productos de corrosión. En este caso, los productos de la reacción de oxidación son electrones que permanecen en el metal e iones metálicos que entran en la solución. Generalmente este tipo de reacción es descrito por:



La acumulación de iones metálicos en el electrolito o bien de electrones en el metal tenderá a reducir la velocidad de reacción. En muchas reacciones de corrosión, los iones metálicos son consumidos por reacción con otras moléculas o compuestos en el electrolito. Estas reacciones reducen el contenido de iones metálicos disueltos y permiten que la oxidación electroquímica proceda o continúe rápidamente. Los iones

metálicos producidos por oxidación en el ánodo se combinan con otras sustancias en el electrolito para formar productos de corrosión.

Los metales son generalmente buenos conductores de electricidad. A diferencia de un electrolito, lo cuales conducen electricidad mediante el flujo de iones, los metales conducen electricidad mediante el flujo de electrones. Los electrones fluyen en el metal de áreas con más carga negativa (exceso de electrones) hacia áreas con más carga positiva (pocos electrones).

En una celda de corrosión, los electrones fluyen a través del metal desde sitios donde las reacciones anódicas están ocurriendo hacia sitios donde ellos permiten que las reacciones catódicas ocurran, como se observa en la figura 2.

Los componentes y características requeridos de una celda electroquímica son:

El electrolito provee los reactantes para la reacción catódica y permite el flujo de iones.

Un punto muy importante es que, si cualquiera de esos procesos puede ser disminuido o detenido, la reacción de corrosión es reducida o eliminada.

### **-Las Series Galvánicas**

Las series galvánicas son una lista de metales con sus potenciales en orden en un medio ambiente específico. Una serie galvánica es similar, pero muy diferente, a la serie de potencial electromotriz, como veremos después en esta sección. La serie galvánica puede ser diferente para diferentes medios ambientes.

#### **2.2.4 Ambiente Subterráneo**

La corrosividad de ambientes subterráneos es de un rango muy amplio. El medio ambiente subterráneo será descrito en términos de las características del suelo. Un factor importante en la corrosividad del suelo es que el medio puede variar mucho sobre grandes distancias y cortas distancias. Los ambientes subterráneos pueden variar con el tiempo. La mayoría de estructuras son enterradas en suelo muy irregular y el control, o falta de control del relleno puede tener un gran efecto en la corrosividad del ambiente subterráneo.

### **-Características Físicas del Suelo**

Las características físicas del suelo que afectan la corrosión son primariamente relacionadas con el tamaño de grano y su distribución, así como la retención de humedad y aereación. En un suelo que contiene una distribución no uniforme de tamaños de partícula, o rocas grandes, celdas de corrosión debidas a ambientes diferentes pueden ser creadas. Suelos que de otra forma tendrían características benignas pueden volverse muy corrosivos.

### **-Características Químicas del Suelo**

Los suelos tienen una gran variedad de importantes características químicas. Estas incluyen el pH (acidez o alcalinidad) y la presencia de sales solubles en agua. El pH tiene un gran efecto en la corrosión de muchos materiales; sin embargo, el efecto no es uniforme. Una alcalinidad moderada (alto pH, 8-10) no es agresiva para el acero, pero puede ser muy agresiva para el aluminio.

Las sales, en presencia de humedad, tienen dos efectos. Uno de ellos es proveer iones corrosivos que pueden entrar directamente en las reacciones de corrosión o afectar la formación de películas protectoras en la superficie de una estructura enterrada. El segundo efecto es incrementar la conductividad eléctrica del suelo. Los cloruros y sulfatos son particularmente perjudiciales mediante sus interacciones químicas directas. Cualquier sal disuelta incrementará la conductividad eléctrica del suelo.

### **-Contenido de Humedad**

El contenido de humedad de los sólidos puede variar de 1% a 2% (o menos en ambientes áridos) a condiciones de saturación en pantanos o Ciénegas, o lugares por debajo del agua. La humedad tiene tres efectos primarios: primero, provee el electrolito necesario para corrosión. Segundo, afecta la conductividad del suelo. Finalmente, tiene un efecto en el suelo. En lugares áridos, el ambiente del suelo puede ser esencialmente el atmosférico dado que no hay humedad suficiente para mojar la estructura enterrada. Sin embargo, en la mayoría de suelos, hay suficiente humedad en la superficie de la estructura la mayor parte del tiempo.

#### **2.2.5 Resistividad Eléctrica**

La resistividad eléctrica generalmente se correlaciona con la agresividad de suelos. La resistividad eléctrica es diferente a la resistencia eléctrica: la resistividad es una propiedad del material, mientras que la resistencia depende de la resistividad eléctrica del material junto con su longitud y área de sección transversal del material que transporta la corriente.

La resistividad eléctrica es también una medida indirecta de otras dos importantes características del suelo, el contenido de humedad y los niveles de sales disueltas. A menor resistividad, mayor conductividad.

### **-La Resistividad**

Es comúnmente medida en ohm-cm) y es representada por la letra griega

### **2.2.6 La Conductividad**

Es el recíproco de la resistividad y es usualmente representada por la letra griega

—

La resistividad del suelo es afectada por otros factores, tales como la compactación y el tipo de suelo. La resistividad del suelo, así como el contenido de humedad, pueden variar considerablemente con el tiempo. La variación de estaciones en la resistividad del suelo debe ser tomada en cuenta en el diseño de estructuras enterradas.

Una resistividad de suelos baja permite altas corrientes de corrosión, lo cual asistirá velocidades de corrosión altas. La resistividad del suelo es también un factor importante a ser considerado en la aplicación de protección catódica para controlar la corrosión subterránea. La protección catódica será cubierta más tarde en este curso.

### **2.2.7 Formas de corrosión**

Existen una gran cantidad de formas en la cual se manifiesta la corrosión, entre ellas podemos mencionar la corrosión localizada, la corrosión filiforme y la corrosión galvánica.

#### **2.2.7.1 Corrosión Localizada**

Ocurre en sitios discretos sobre la superficie de un material. Mientras que la actividad de corrosión en esos sitios puede comenzar y detenerse con cambios en el

ambiente y nuevos sitios pueden empezar a corroerse, la corrosión se concentra en esos sitios. Las áreas alrededor de los sitios donde ocurre la corrosión localizada se corroen en menor alcance, o pueden ser esencialmente no atacadas.

### **-Corrosión Filiforme**

La corrosión filiforme es una forma especial de una celda de corrosión por oxígeno ocurriendo por debajo de un recubrimiento orgánico o metálico sobre un material. El ataque resulta en una fina red de “hilos” aleatorios de productos de corrosión desarrollados por abajo del recubrimiento. Este tipo de ataque puede darse por debajo de recubrimientos en un ambiente de alta humedad (> 60% HR) en artículos tales como latas recubiertas, muebles de oficina, cámaras, estructuras de aviones, interiores y exteriores de autos y una cantidad de otros productos comunes.

### **- Mecanismo de la corrosión filiforme**

El mecanismo de la corrosión filiforme es similar al de corrosión por hendiduras en que es impulsado por la diferencia de potencial entre el frente de avance de ataque y el área detrás del frente de ataque. En la corrosión filiforme, la cabeza del filamento de avance (aprox. 0.1 mm de ancho) es anódica, con un bajo pH y falta de oxígeno, comparado con el área catódica inmediatamente atrás de la cabeza, donde hay oxígeno disponible por medio de una película semipermeable. La corrosión procede como el cátodo sigue atrás la cabeza anódica. El agua u oxígeno en el área catódica convierten los productos anódicos en los óxidos usuales del metal.

La causa de la corrosión filiforme parece ser asociada con algo de contaminación superficial por partículas sólidas depositadas por la atmósfera o residuos sobre el metal después de procesado. Estas superficies expuestas a atmósferas húmedas sufrirán corrosión filiforme. La corrosión filiforme normalmente no resulta en una significativa corrosión de la superficie metálica. Puede retrasar la adhesión de una película de pintura, resultando en un eventual ataque del metal.

## **-Corrosión Galvánica**

La corrosión galvánica es una forma de corrosión que ocurre debido a las diferencias de potencial entre metales. La corrosión galvánica ocurre mediante la acción de una celda electroquímica.

Esta se define como corrosión acelerada por las diferencias de potencial entre diferentes metales cuando están en contacto eléctrico y expuestos en un electrolito. Este tipo de corrosión también puede ocurrir entre un metal y un no metal eléctricamente conductor, tal como el grafito. El carbón en plásticos y elastómeros puede ser también electroquímicamente activo y puede causar corrosión galvánica. Productos de corrosión tales como la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y sulfuros pueden ser electroquímicamente activos y son catódicos respecto a la mayoría de los metales. Los iones de un metal más noble pueden ser reducidos sobre la superficie de un metal más activo (ej.: cobre sobre aluminio). El depósito metálico resultante provee sitios catódicos para corrosión galvánica adicional del metal más activo.

El contacto eléctrico entre materiales disímiles puede ser por contacto directo, o mediante una ruta conductora externa. En corrosión galvánica, la velocidad de ataque de un metal o aleación es usualmente acelerada, mientras la velocidad de corrosión del otro material usualmente decrece. La corrosión galvánica puede ser reconocida por un incremento en la corrosión del material anódico, o un decremento de corrosión del material catódico.

La corrosión galvánica es con frecuencia pronunciada donde materiales disímiles están inmediatamente adyacentes uno de otro en filos agudos o esquinas.

### **2.2.8 Mecanismo de la corrosión galvánica**

El mecanismo de la corrosión galvánica es la clásica celda electroquímica. Como se discutió previamente, una celda electroquímica requiere la presencia de cuatro factores:

#### **2.2.8.1 El Ánodo**

Es el lugar donde el metal se pierde y se producen los electrones.

#### **2.2.8.2 El Cátodo**

Lugar donde los electrones producidos en el ánodo se consumen.

#### **2.2.8.3 La Ruta Metálica**

La cual conduce electrones desde los sitios anódicos hacia los sitios catódicos.

#### **2.2.8.4 El Electrolito**

El cual provee los reactantes para las reacciones catódicas y permite el flujo de iones. Para que la corrosión galvánica ocurra, todos estos componentes deben estar presentes y activos. En la corrosión galvánica, los electrones fluyen mediante una ruta metálica desde sitios donde las reacciones anódicas están ocurriendo a sitios donde ellos permiten que las reacciones catódicas ocurran. La corriente eléctrica fluye por medio del electrolito para balancear el flujo de electrones en la ruta metálica.

La corrosión galvánica es impulsada por las diferencias de potencial entre metales o no metales eléctricamente conductivos cuando están expuestos en un electrolito. Los no metales incluyen materiales eléctricamente conductivos tales como el grafito. En algunos casos, el miembro catódico de un par galvánico puede ser un depósito formado por deposición de iones metálicos de la solución sobre la superficie metálica anódica.

La corrosión galvánica afecta al cátodo en el par galvánico de diferentes maneras. En general, la corrosión que normalmente podría ocurrir si el cátodo fuera expuesto al medio por sí mismo decrecerá al ser acoplado a un metal más activo. Sin embargo, en algunos casos, el cátodo puede ser afectado de manera adversa. La fragilización por hidrógeno, una forma de corrosión que será discutida después en esta sección, puede resultar. En adición, los productos de corrosión alcalinos de la reacción catódica formados en una celda galvánica pueden afectar de manera adversa algunos materiales tales como el aluminio. Los metales que son químicamente vulnerables en

ambientes ácidos y alcalinos, y que se conocen como metales anfotéricos, pueden ser afectados en el cátodo en una celda de corrosión galvánica. Estos ataques son llamados efectos anfotéricos.

### **2.2.9 Velocidades de Corrosión Galvánica**

La cantidad de corrosión acelerada resultante de un par galvánico es afectada por los siguientes factores:

El comportamiento de polarización de los materiales acoplados.

### **2.2.10 Diferencia de Potencial**

La diferencia de potencial entre materiales causa un flujo de corriente cuando materiales disímiles son acoplados en un electrolito adecuado. La dirección del flujo de corriente depende cual metal es más activo. El metal más activo se vuelve el ánodo, mientras que el metal menos activo se vuelve el cátodo. La magnitud de la fuerza impulsora para el ataque galvánico en este par es la diferencia de potencial entre esos electrodos.

Para determinar los efectos entre materiales específicos en un ambiente específico, es necesario conocer la serie galvánica para estos materiales en el medio ambiente de interés. Este tipo de series galvánicas empíricamente desarrolladas puede ser útil para predecir relaciones galvánicas de metales y aleaciones de acuerdo a sus potenciales, medidos en un electrolito específico. Esto nos permite determinar cuál metal o aleación en un par galvánico es más activo en un medio ambiente de interés. La diferencia de potencial medida entre dos metales o aleaciones en esta serie galvánica puede dar una predicción de la probable magnitud de los efectos corrosivos.

### **2.2.11 Control del Ataque Galvánico**

La corrosión galvánica puede ser controlada de diferentes formas, siendo una de ellas la protección catódica.

### **2.2.12 Métodos De Control De Corrosión**

El control de corrosión en la etapa de diseño no solo debe pasar – debe ser planeado. En un proyecto importante, tanto tiempo deberá ser requerido para los aspectos de corrosión en el diseño como para otras consideraciones. Si la tecnología de la aplicación es establecida, deberá haber una cuidadosa selección de una solución conocida, con una meticulosa atención hacia aquellos detalles que son nuevos. Si una nueva tecnología de corrosión debe ser desarrollada, una etapa de pruebas será necesaria de tal forma que selecciones razonables puedan ser hechas.

El diseño incluye la consideración de muchos factores, tales como:

Selección de materiales

Parámetros de proceso

Parámetros de construcción

Geometrías para drenajes

Metales disímiles

Hendiduras

Tolerancias de corrosión

Tiempo de vida de operación

Requerimientos de mantenimiento e inspección.

#### **2.2.12.1 Protección Catódica**

La protección catódica es una técnica electroquímica usada para el control de la corrosión. La protección catódica tiene un amplio uso en una variedad de medio ambientes, incluyendo inmersión en líquidos y en suelos. La protección anódica tiene una limitada, pero importante aplicación en ambientes químicos.

Metales tales como el magnesio y el zinc, pueden ser introducidos en el montaje galvánico. Los miembros más activos se corroerán, dando protección catódica a los otros metales aun cuando estos estén eléctricamente acoplados. Sistemas de corriente impresa dan el mismo efecto. Este método de protección puede efectivamente controlar la corrosión de los metales, aun cuando los metales no estén cubiertos por películas protectoras. Entonces, los efectos de la velocidad en la corrosión pueden ser controlados mediante la protección catódica. La corriente eléctrica requerida para protección catódica en flujos de alta velocidad es usualmente mucho mayor que la corriente requerida en condiciones de baja velocidad.

### **-Principios**

La protección catódica reduce o elimina la corrosión haciendo del metal de interés el cátodo mediante una corriente impresa o la fijación de un ánodo galvánico (usualmente magnesio, aluminio, o zinc).

El cátodo en una celda electroquímica es el electrodo donde la reducción (y no la corrosión) ocurre. Antes que la protección catódica sea aplicada, las estructuras con corrosión tendrán áreas catódicas y anódicas (aquellas áreas donde la corrosión está ocurriendo). Si todas las áreas anódicas pueden ser convertidas en áreas catódicas, toda la estructura se convertirá en un cátodo y la corrosión será reducida.

### **-Como Trabaja la Protección Catódica**

La corrosión ocurre donde una corriente (positiva) descarga del metal al electrolito en un ánodo. El objetivo de la protección catódica es forzar a la superficie entera a actuar como un cátodo, con corriente entrando al medio ambiente y limitando que la corrosión ocurra. La aplicación de corriente directa a una estructura metálica con que está sufriendo corrosión, puede causar que la estructura se vuelva completamente catódica. Para empezar, la corriente directa es asociada con el proceso de corrosión de una estructura metálica enterrada

La corriente directa fluye de las áreas anódicas en el suelo, y a través del mismo hacia las áreas catódicas, y regresa por la tubería en sí para completar el circuito. Para

un voltaje impulsor dado, (el potencial galvánico entre el ánodo y el cátodo), la cantidad de corriente fluyendo es limitada por factores tales como la resistividad del medio (expresada normalmente como ohm-cm) y el grado de polarización en las áreas anódicas y catódicas. La corrosión ocurre donde una corriente descarga del metal al electrolito (suelo) en las áreas anódicas. Donde la corriente fluye desde el medio hacia la tubería (áreas catódicas) no hay corrosión. Al aplicar protección catódica a una estructura, el objetivo es forzar a la superficie total expuesta al medio ambiente a volverse catódica al ambiente. Cuando esta condición se cumple, la corrosión se mitiga.

#### **-Sistemas de Protección Catódica Por Ánodos de Sacrificio**

En el sistema de ánodos galvánicos, piezas de un metal activo, tal como zinc o magnesio, son puestas en contacto con el medio corrosivo y son conectadas eléctricamente a la estructura a ser protegida. Los ánodos galvánicos se corroen preferencialmente, dando protección a la estructura. Un ánodo galvánico (de sacrificio) puede ser descrito como un metal que tendrá una diferencia de voltaje con respecto a la estructura que se corroe y descargará corriente (positiva) que fluirá a través del medio ambiente a la estructura.

#### **-Los Requerimientos De Un Metal Para Ser Un Material Práctico Para Ánodo Incluyen:**

ncial

#### **-Materiales Que Son Comúnmente Usados Como Ánodos Galvánicos:**

El potencial entre el ánodo y la estructura corroíble, debe ser lo suficientemente grande para superar las celdas ánodo-cátodo de la estructura con corrosión. El material del ánodo debe tener suficiente energía eléctrica que permita una vida larga razonable empleando una cantidad práctica de material de ánodo. Los ánodos deben tener buena eficiencia, lo cual quiere decir que un alto porcentaje del contenido de energía eléctrica del ánodo debe ser disponible para una salida de corriente de protección catódica útil. El balance de la energía que es consumida en la corrosión del ánodo en sí mismo debe ser muy pequeño. Los materiales de ánodo son vaciados en numerosos pesos y formas para cumplir con los requerimientos de diseño de la protección catódica.

<b>APLICACIONES DE MATERIAL ANÓDICO</b>		
Material del ánodo	Resistividad del medio ohm-cm	Descripción del medio
Magnesio	800 -3000	Suelos agresivos
Zinc	20 -1000	Mar y Pantanos
Aluminio	20 -400	Mar, Pantanos y lecho marino

**Tabla 1. Aplicaciones de material anódico.**

### **-Sistemas de Protección Catódica Por Corriente Impresa**

En un sistema de protección por corriente impresa, una fuente de poder externa de corriente directa es conectada (o impresa) entre la estructura a ser protegida y la cama de ánodos. Con un sistema de corriente impresa, los ánodos en la cama de ánodos en el suelo no dependen como una fuente de energía eléctrica. En vez de eso, una fuente de poder externa de corriente directa es conectada (o impresa) entre la estructura a ser protegida y la cama de ánodos, como se observa en la figura 3.

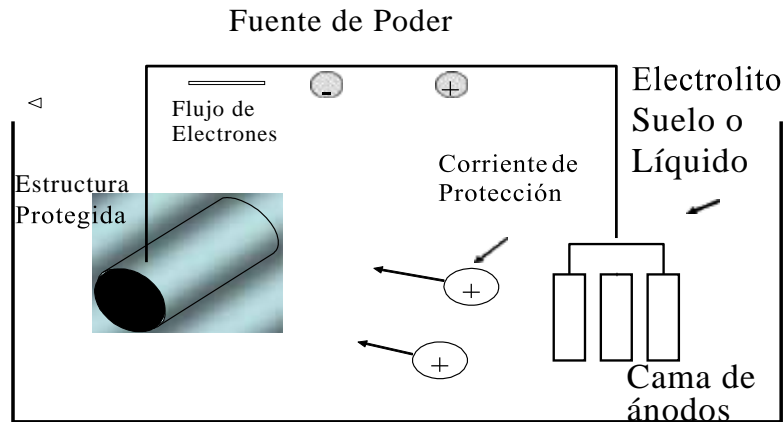


Figura 3. La configuración básica de un sistema de protección catódica por corriente impresa.

Curso De Corrosión Básica, Manual Del Estudiante.

La terminal positiva de la fuente de poder debe ser siempre conectada a la cama de ánodos, la cual es entonces forzada a descargar tanta corriente de protección como sea deseada. Si por error la terminal positiva es conectada a la estructura a ser protegida, esta se convertirá en el ánodo en vez del cátodo, y se corroerá activamente.

### -Sistemas de Ánodos por Corriente Impresa

Las camas de ánodos son forzadas a descargar corriente y se corroerán. En la mayoría de los casos, es deseable usar materiales de ánodo que son consumidos a velocidades relativamente bajas. Las camas de ánodos deben ser diseñadas para descargar grandes cantidades de corriente y aún tener una expectativa de vida larga. Varios materiales son usados para ánodos por corriente impresa. Mientras que chatarra de hierro, rieles, varilla y otros materiales similares de hierro o acero pueden ser usados, estos materiales se consumen a una velocidad de alrededor de 20 libras por amperio- año (1 amperio fluyendo por 1 año).

Esto quiere decir que, para una instalación, una cantidad relativamente grande de material es necesaria para lograr la vida de operación deseada, lo cual puede ser justificado solo cuando es disponible como desechos o chatarra de bajo costo.

## **-Diseño**

El diseño de un sistema de protección catódica efectivo es una tarea compleja que requiere experiencia, conocimiento, y juicio. En este curso brevemente mencionaremos algunos de los factores los cuales deben ser tomados en consideración en el desarrollo de un sistema de protección catódica, incluyendo:

ondas)

## **-Requerimientos Regulatorios**

En algunos sistemas, la protección catódica puede ser requerida por ley, en particular cuando la corrosión puede poner en riesgo la seguridad pública o el medio ambiente. Tanques metálicos de almacenamiento bajo suelo y tuberías que manejan materiales peligrosos son ejemplos de sistemas donde la protección catódica puede ser requerida por ley.

## **-Economía**

Comparado con el costo de la estructura a proteger, el costo de la protección catódica es bajo. Los costos incluyen el costo inicial de diseño e instalación, el costo

de energía en sistemas de corriente impresa, y el costo de inspección y mantenimiento del sistema.

### **-Metal a ser Protegido**

La naturaleza del metal a ser protegido es un factor en los sistemas de protección catódica. El acero es el metal protegido más común, pero otros pueden ser protegidos también. Los materiales anfotéricos, tales como el zinc, aluminio y plomo, pueden ser protegidos bajo algunas circunstancias, pero estos materiales deben ser protegidos muy cuidadosamente para evitar efectos adversos.

### **-Requerimientos de Vida**

Debido al consumo de los ánodos, los sistemas de protección catódica tienen una vida finita. Los sistemas de corriente impresa usualmente tienen una vida más larga debido a la baja velocidad de consumo de los ánodos. Cuando los ánodos se consumen, pueden ser reemplazados y la protección efectiva de la estructura puede continuar.

### **-Requerimientos de Corriente Total**

La cantidad de corriente total requerida debe ser determinada durante el diseño del sistema. En general, los sistemas galvánicos son usados cuando las corrientes totales requeridas son bajas y los sistemas de corriente impresa se usan cuando la corriente requerida es grande.

### **-Variaciones del Medio Ambiente**

La resistividad eléctrica del medio es un importante factor en el diseño de sistemas de protección catódica. La resistividad es un factor primario en la cantidad de corriente requerida y en el diseño de camas de ánodos para sistemas galvánicos y de corriente impresa. Aproximadamente, la corriente requerida (solo para ilustración, no para diseño) para acero en varios medios es dada en la Tabla 2.

<b>Medio Ambiente</b>	<b>Densidad de corriente Requerida (Ma/m<sup>2</sup>)</b>
<b>Acero desnudo en agua de mar fluyendo</b>	<b>100-160</b>
<b>Acero desnudo en agua de mar quieta</b>	<b>55-85</b>
<b>Acero desnudo en tierra</b>	<b>10-30</b>
<b>Acero muy bien Recubierto en tierra o agua</b>	<b>0.003 o menos</b>

**Tabla 2. Requerimientos de Corriente para acero en varios medios.**  
Curso De Corrosión Básica, Manual Del Estudiante.

### **-Protección Eléctrica**

Cuando la estructura a ser protegida está en un medio con otras estructuras metálicas, estas pueden efectivamente ser un escudo para la estructura a proteger con la corriente de protección catódica. El diseño de protección catódica en medios congestionados con otras estructuras metálicas con frecuencia requiere la colocación de ánodos entre las estructuras para asegurar una apropiada distribución de la corriente.

### **-Efectos de corrientes parásitas**

La corriente de sistemas eléctricos cercanos, tal como tranvías, puede interferir con el flujo de corriente en un sistema de protección catódica. En estos casos, el sistema de protección debe ser diseñado y ajustado para compensar esas corrientes. Todos los sistemas de protección catódica en una localidad dada, deben ser ajustados para minimizar la interacción y posible daño a otras estructuras metálicas enterradas que no están protegidas católicamente.

### **-Temperatura**

La temperatura del medio puede afectar también los sistemas de protección catódica cambiando la resistividad eléctrica del medio ambiente, o cambiando la corriente requerida de protección.

### **-Alambre y Cables**

En sistemas galvánicos el alambre conductor que conecta los ánodos con la estructura no es crítico. Si hay daño en el aislamiento de estos conductores, el ánodo protegerá catódicamente el metal expuesto. En sistemas de corriente impresa, el alambre conductor que conecta a la estructura con la fuente de poder está protegido también por un aislamiento. Sin embargo, el alambre conductor que conecta la terminal positiva de la fuente de poder a la cama de ánodos y los cables de interconexión de los ánodos pueden ser corroídos severamente en cualquier punto de ruptura del aislamiento de esos conductores. En los ánodos, el cable de plomo de estos sistemas es crítico. Alambres conductores especialmente aislados deben ser usados y colocados cuidadosamente para evitar fallas del sistema.

<b>TAMAÑO DE CABLE</b>	<b>RESISTENCIA (ohm/pie)</b>
N° 6 AWG	$4.10 \times 10^{-4}$
N° 8 AWG	$6.54 \times 10^{-4}$
N° 10 AWG	$1.04 \times 10^{-3}$
N° 12 AWG	$1.65 \times 10^{-3}$
N° 14 AWG	$2.62 \times 10^{-3}$

**Tabla 3. Resistencia según el tamaño del cable.**

### **-Relleno de Ánodos**

El relleno es un material colocado alrededor de los ánodos en ambos, sistemas galvánicos y de corriente impresa. En sistemas galvánicos, estos materiales proveen un medio para máxima eficiencia, y el ambiente de baja resistencia alrededor de los

ánodos asegura una salida de corriente adecuada. El relleno apropiado para cada sistema debe ser usado, y este debe ser colocado adecuadamente para asegurar el máximo funcionamiento del ánodo.

<b>TIPO</b>	<b>YESO %</b>	<b>BENTONITA %</b>	<b>SULFATO DE SODIO %</b>	<b>RESISTIVIDAD ( ohm – cm )</b>
A	25 <sup>1</sup>	75	0	300
B	50 <sup>1</sup>	50	0	300
C	50 <sup>2</sup>	50	0	300
D	75 <sup>1</sup>	20	5	50

**Tabla 4. Rellenos químicos para ánodos galvánicos.**

#### **-Mantenimiento**

Los sistemas de protección catódica requieren de una inspección y mantenimiento periódicos.

En sistemas galvánicos, los dos problemas más comunes son el consumo de ánodos y el daño a los cables de conexión por excavaciones o por movimientos de tierra. La inspección de la protección galvánica usualmente consiste en mediciones periódicas de los potenciales estructura-electrolito para asegurar una adecuada protección, y la medición de la corriente drenada de los ánodos galvánicos. Estas mediciones son comúnmente realizadas en estaciones de prueba permanentes, como parte integral del sistema. La inspección de sistemas de ánodos galvánicos es efectuada en una base anual o semi-anual, pero la frecuencia variará dependiendo del sistema, el material contenido en el sistema, y los requerimientos regulatorios.

### **2.2.13 Software**

Software es un término informático que hace referencia a un programa o conjunto de programas de cómputo que incluye datos, procedimientos y pautas que permiten realizar distintas tareas en un sistema informático. Comúnmente se utiliza este término para referirse de una forma muy genérica a los programas de un dispositivo informático.

#### **2.2.13.1 Software de aplicación**

Un software de aplicación son los programas diseñados para facilitar algunas tareas específicas como procesadores de texto, de imagen, navegadores de Internet, etc., para cualquier medio informático ya sea en computadores, tabletas o celulares. El software de computadora se ha convertido en el alma mater. Es la máquina que conduce a la toma de decisiones comerciales. Sirve de base para la investigación científica moderna y de resolución de problemas de ingeniería. Es el factor clave que diferencia los productos y servicios modernos. Está inmerso en sistemas de todo tipo: de transportes, médicos, de telecomunicaciones, militares, procesos industriales, entretenimientos, productos de oficina.

El software es casi ineludible en un mundo moderno. A medida que nos adentremos en el siglo XXI, será el que nos conduzca a nuevos avances en todo, desde la educación elemental a la ingeniería genética.

#### **2.2.13.2 Características del software**

Para poder comprender lo que es el software (y consecuentemente la ingeniería del software), es importante examinar las características del software que lo diferencian de otras cosas que los hombres pueden construir.

#### **2.2.13.3 Aplicaciones del software**

El software puede aplicarse en cualquier situación en la que se haya definido previamente un conjunto específico de pasos procedimentales (es decir, un algoritmo) (excepciones notables a esta regla son el software de los sistemas expertos y de redes neuronales). El contenido y el determinismo de la información son factores

importantes a considerar para determinar la naturaleza de una aplicación de software. El contenido se refiere al significado y a la forma de la información de entrada y salida. Por ejemplo, muchas aplicaciones bancarias usan unos datos de entrada muy estructurados (una base de datos) y producen «informes» con determinados formatos. El software que controla una máquina automática (por ejemplo: un control numérico) acepta elementos de datos discretos con una estructura limitada y produce órdenes concretas para la máquina en rápida sucesión.

El determinismo de la información se refiere a la predictibilidad del orden y del tiempo de llegada de los datos. Un programa de análisis de ingeniería acepta datos que están en un orden predefinido, ejecuta el algoritmo(s) de análisis sin interrupción y produce los datos resultantes en un informe o formato gráfico. Se dice que tales aplicaciones son determinadas.

#### **2.2.13.4 Software de ingeniería y científico.**

El software de ingeniería y científico está caracterizado por los algoritmos de «manejo de números». Las aplicaciones van desde la astronomía a la vulcanología, desde el análisis de la presión de los automotores a la dinámica orbital de las lanzaderas espaciales y desde la biología molecular a la fabricación automática. Sin embargo, las nuevas aplicaciones del área de ingeniería/ciencia se han alejado de los algoritmos convencionales numéricos. El diseño asistido por computadora (del inglés CAD), la simulación de sistemas y otras aplicaciones interactivas, han comenzado a coger características del software de tiempo real e incluso del software de sistemas.

#### **2.2.14 Proceso de creación del software**

Se define como “Proceso” al conjunto ordenado de pasos a seguir para llegar a la solución de un problema u obtención de un producto, en este caso particular, para lograr un producto software que resuelva un problema específico.

#### **2.2.15 Simulación**

La Simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones

matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos períodos.

Una definición más formal, formulada es que la simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias –dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos para el funcionamiento del sistema.

#### **2.2.16 Simulación por computadora**

Una simulación por computadora, un modelo de simulación por computador o un modelo informatizado es un programa informático o una red de ordenadores cuyo fin es crear una simulación de un modelo abstracto de un determinado sistema. Las simulaciones por computadora se han convertido en una parte relevante y útil de los modelos matemáticos de muchos sistemas naturales de ciencias como la física, geofísica, astrofísica, química y la biología; así como de sistemas humanos de economía, psicología y ciencias sociales. Además, se emplea en el diseño de nueva tecnología para llegar a comprender mejor su funcionamiento.

#### **2.2.17 Matlab**

Matlab (abreviatura de MATrix LABoratory, “laboratorio de matrices”) es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux. Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario – GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades

de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets).

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

En este capítulo se describe y analiza detalladamente el procedimiento a seguir para el desarrollo y cumplimiento de los objetivos planteados en esta investigación, donde se incluyen las técnicas de observación y recolección de datos, determinando el “cómo” se realizará el estudio, desde la elaboración de la simulación en MatLab para el desarrollo de sistemas de protección catódica, hasta la evaluación y comparación de los resultados obtenidos.

#### **3.1 Tipo De Investigación**

Según Santa Paella y Feliberto Martins (2012) “La investigación experimental es aquella según la cual el investigador manipula una variable experimental no comprobada, bajo condiciones estrictamente controladas. Su objetivo es describir de qué modo y porque causa se produce o puede producirse un fenómeno. Busca predecir el futuro, elaborar pronósticos que una vez confirmados, se convierten en leyes y generalizaciones tendentes a incrementar el cúmulo de conocimientos pedagógicos y el mejoramiento de la acción educativa” y “La investigación documental se concreta exclusivamente en la recopilación de información en diversas fuentes. Indaga sobre un tema en documentos-escritos u orales- uno de, los ejemplos más típicos de esta investigación son las obras de historia”.

En este sentido se comprende, que es una investigación documental y experimental por ser el estudio de un problema con el propósito de ampliar y profundizar el conocimiento de su naturaleza, con apoyo, principalmente, en trabajos previos, información y datos proporcionados por medios impresos, audiovisuales y electrónicos.

#### **3.2 Diseño De La Investigación**

Según Santa Paella y Feliberto Martins (2012) El diseño de investigación se refiere a la estrategia que adopta el investigador para responder al problema, dificultad

o inconveniente planteado en el estudio. En atención al diseño, la Investigación se clasifica en: documental y experimental”.

En el caso que nos ocupa, la investigación planteada, cuyo objetivo central está referido a la creación e implementación de un software como herramienta para simular. Se realizará un diseño experimental. Este diseño experimental de igual forma será transversal en la medida que se compararan datos obtenidos en condiciones naturales de los sistemas a estudiar con datos obtenidos mediante simulaciones realizadas en ordenador, soportados por información técnica y empírica. Las condiciones y variables son manipuladas por el experimentador bajo condiciones controladas.

A fin de poner a prueba el software diseñado se efectuaron los siguientes pasos:

1. Identificar las variables dependientes e independientes que intervienen en el diseño de protección catódica con ánodo de sacrificio.
2. Una vez identificadas las variables de diseño para el sistema de protección catódica por ánodo de sacrificio, se procede a recolectar y extraer datos de trabajo de campo realizado previamente.
3. En concordancia con la información técnica obtenida, procedemos a realizar la programación de la simulación en Matlab tomando en cuenta que las variables de salida del software deben coincidir con las variables obtenidas en campo.
4. Una vez obtenidos los datos arrojados por la simulación se procede a tabular y organizar dichos datos de acuerdo a los casos que se presentan.
5. Considerando los datos obtenidos realizamos una comparación minuciosa de los datos en contraste con los datos obtenidos en campo.
6. Después de comparar los datos obtenidos en la simulación con los datos obtenidos en campo, se procede a realizar las conclusiones pertinentes.

7. Una vez realizado lo anterior se hace de necesidad realizar recomendaciones y modificaciones a la simulación y la forma que se usa dicha herramienta, para garantizar la mayor exactitud y confiabilidad posible de Este instrumento de diseño.

### **3.3 Nivel De La Investigación.**

Según Fidias G. Arias (2006) el nivel de investigación se refiere al grado de profundidad con que se aborda un fenómeno u objeto de estudio.

Se puede definir que el nivel de la investigación es de tipo exploratoria, esto se basa a que la investigación posee muy poco campo de estudio en el cual se ha realizado avances.

### **3.4 Confiabilidad, Población Y Muestra**

#### **3.4.1 Confiabilidad**

Se determinará a través de la comparación de los resultados obtenidos mediante la simulación y los resultados obtenidos en el campo, donde se pueda garantizar un porcentaje óptimo, más cercano al 100%.

#### **3.4.2 Población Y Muestra**

Según Santa Paella y Feliberto Martins (2012) “la población de una investigación es el conjunto de unidades de las que se desea obtener información sobre las que se van a generar conclusiones. La población puede ser definida como el conjunto finito o infinito de elementos, personas, o cosas pertinentes a una investigación que generalmente suele ser inaccesible” y “afirma que la muestra representa un subconjunto de la población, accesible y limitado sobre el que realizamos las mediciones o el experimento con la idea de obtener conclusiones generalizables a la población.

En este trabajo de investigación, se llamará muestra, al sistema de protección catódica desarrollado con anterioridad en campo.

### **3.5 Técnicas E Instrumentos De Recolección**

Para llevar a cabo la investigación se utilizó la revisión documental, la cual “se trata del acopio de los antecedentes relacionados con la investigación, se realiza por

la consulta de documentos escritos, sean formales o no, en los que se plasmará un conocimiento que fue avalado por autores que realizaron una investigación previa” (Delgado de Smith. 2013).

### **3.6 Fases Metodológicas**

En este punto se describirá el procedimiento ejecutado durante el desarrollo de la investigación el cual fue desplegado en cuatro fases las cuales proporcionarán el cumplimiento a los objetivos específicos ya mencionados.

#### **Fase I: Análisis Documental.**

En el análisis documental se investigará y recabará la información disponible sobre el tema. Para tal fin, acudiremos a diversos sitios de internet, libros de textos y se consultará con especialistas en el área de protección catódica y de desarrollo y diseño de software. En este punto, se debe incluir la búsqueda y selección de las herramientas de simulación a escoger entre las opciones factibles encontradas.

#### **Fase II: Estudio de herramienta y datos a utilizar.**

Una vez seleccionado el programa Matlab como la herramienta para el desarrollo de la simulación a utilizar, se procederá al análisis y aprendizaje de las herramientas que provee dicho programa para la realización del desarrollo de los modelos matemáticos necesarios para el diseño de protección catódica.

#### **Fase III: Desarrollo.**

Desarrollar los algoritmos necesarios para simular los diferentes modelos matemáticos utilizados para la realización de sistemas de protección catódica.

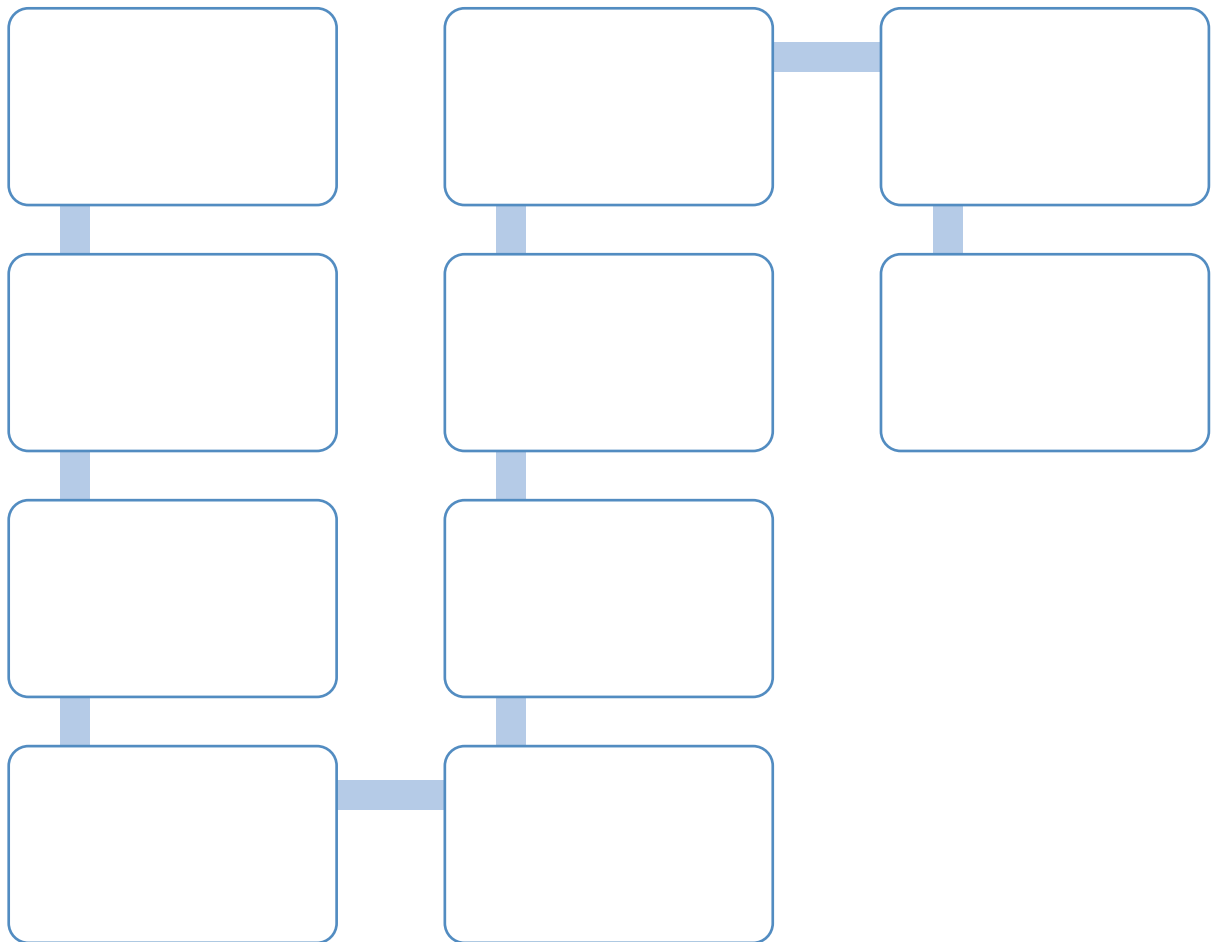
#### **Fase IV: Análisis y comparación de resultados obtenidos.**

Los datos obtenidos de las diferentes variables, se analizarán y se compararán con los datos obtenidos previamente en campo, para estimar la certeza y confiabilidad de la simulación desarrollada.

**CAPITULO IV**  
**ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**4.1 Estructura De La Simulación**

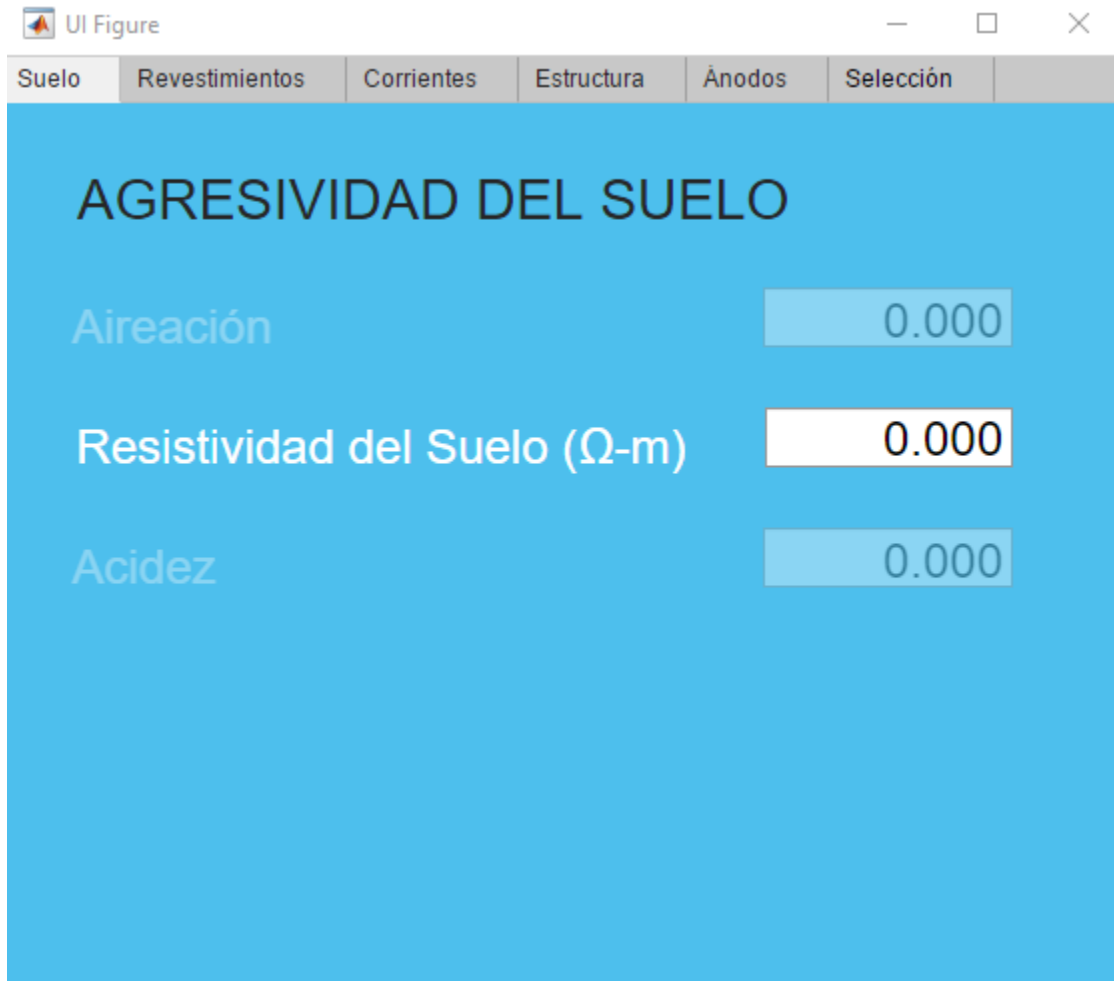
**4.1.2 Diagrama De Flujo**



**Figura 4. Diagrama de flujo de la simulación.**  
Landaeta y Segovia, 2018.

## 4.2 Manual Para El Usuario

### 4.2.1 Pestaña “Suelo”



Ul Figure

Suelo | Revestimientos | Corrientes | Estructura | Ánodos | Selección

### AGRESIVIDAD DEL SUELO

Aireación	0.000
Resistividad del Suelo ( $\Omega$ -m)	0.000
Acidez	0.000

**Figura 5. Pestaña de valores de agresividad del suelo.**  
Landaeta y Segovia, 2018.

En esta primera pantalla el usuario debe introducir los valores, previamente obtenidos, sobre el estudio del suelo donde se desarrollará el proyecto de protección catódica por ánodos de sacrificio.

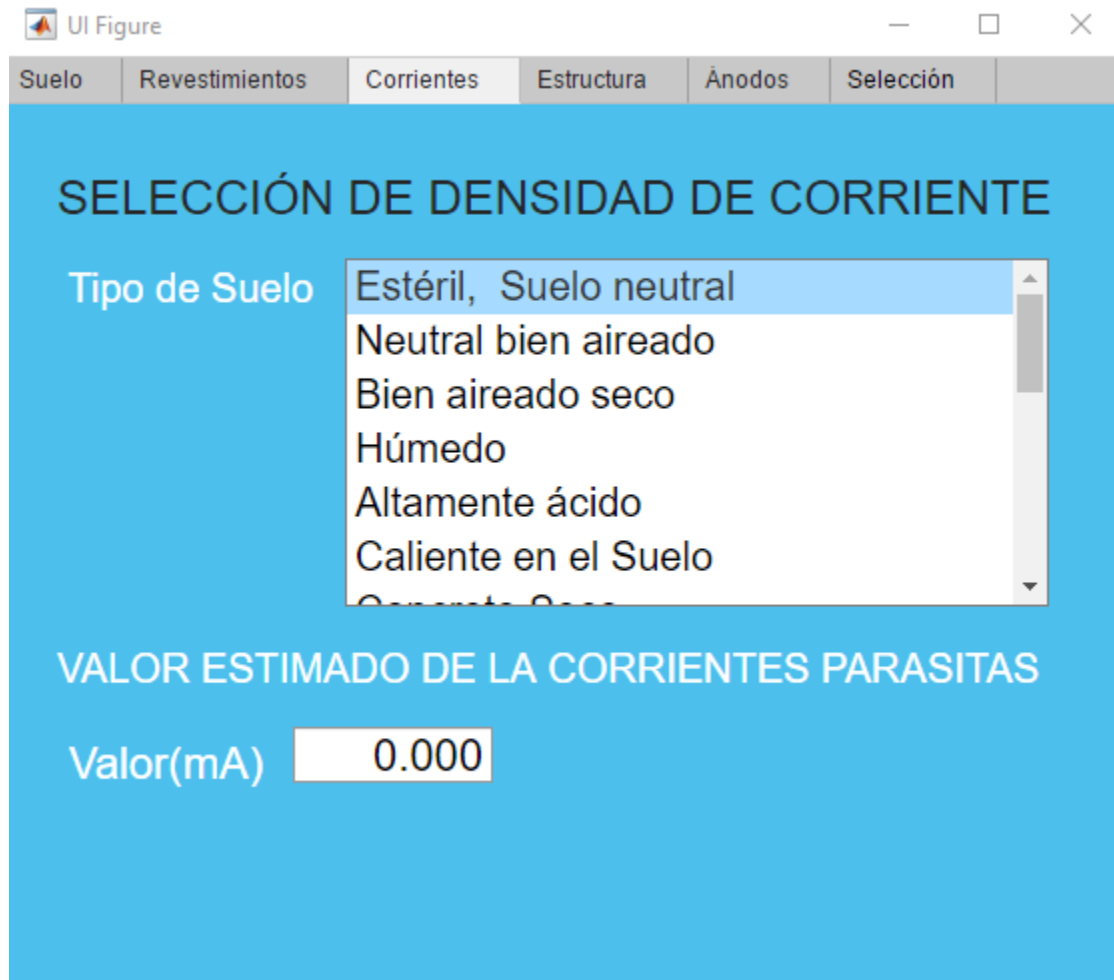
#### 4.2.2 Pestaña De Revestimientos



**Figura 6. Pestaña de selección de revestimiento para la tubería.**  
**Landaeta y Segovia, 2018.**

En esta segunda pestaña el usuario seleccionará si desea utilizar algún tipo de revestimiento para ayudar a proteger la estructura y cual tipo de revestimiento desea utilizar.

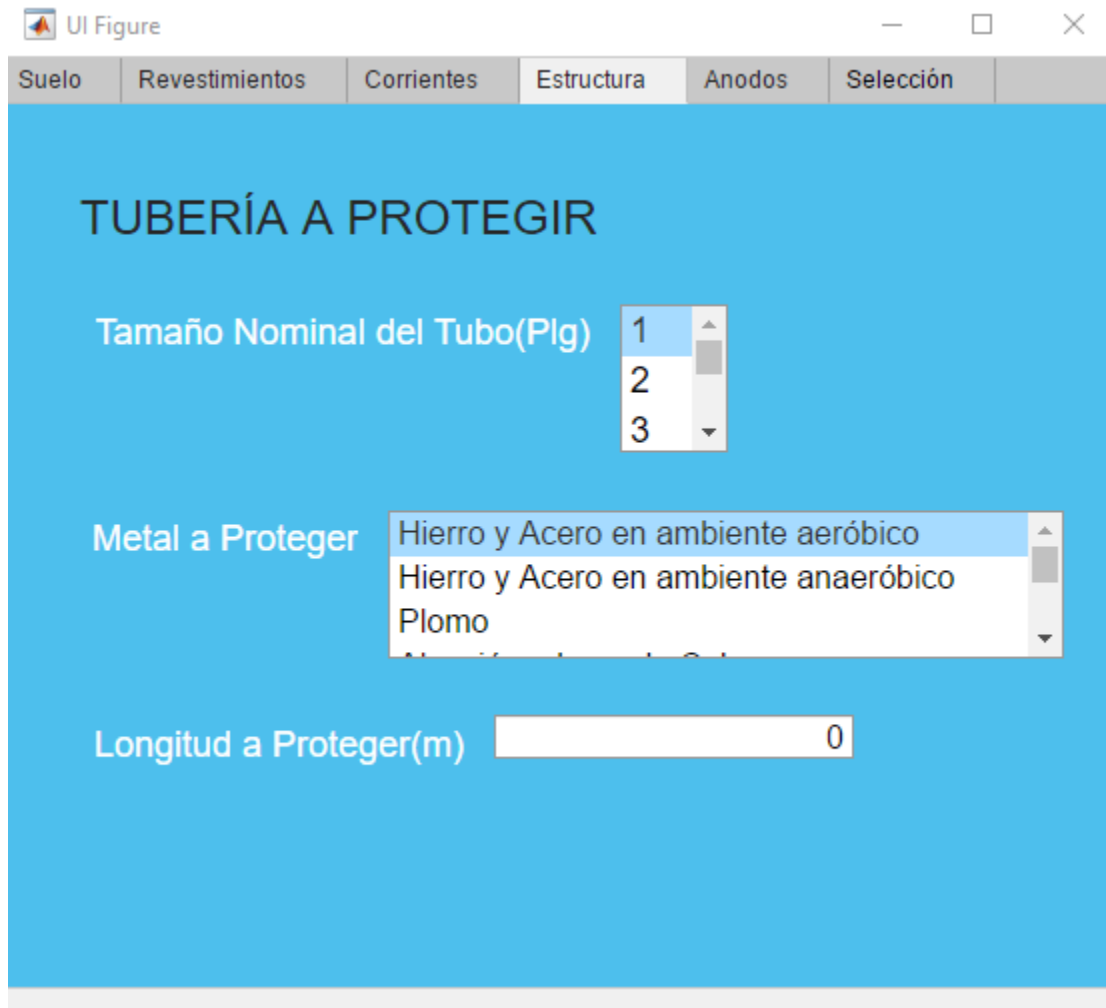
### 4.2.3 Pestaña “Corrientes”



**Figura 7. Pestaña de selección de densidad de corriente y valor estimado de corrientes parasitas.**  
**Landaeta y Segovia, 2018.**

En esta tercera pestaña el usuario seleccionará, dependiendo del tipo de suelo existente, el valor tabulado de la densidad de corriente y el valor estimado de las corrientes parasitas.

#### 4.2.4 Pestaña “Estructura”



**Figura 8. Pestaña de selección del tamaño nominal de la tubería, material a proteger y longitud a proteger.**  
Landaeta y Segovia, 2018.

En esta cuarta pestaña el usuario debe seleccionar el tamaño nominal del tubo (Plg), el material del cual está compuesto y la longitud del mismo (M).

#### 4.2.5 Pestaña “Ánodos”

UI Figure

Suelo | Revestimientos | Corrientes | Estructura | **Anodos** | Selección

### Rellenos Químicos para Ánodos Galvánicos

NO  SI

Tipo: A, B, C, D

YESO(%) 0

BENTONITA(%) 0

SULFATO DE SODIO(%) 0

RESISTIVIDAD( $\Omega$ -m) 0

### Ánodos de Sacrificio Comerciales

MATERIAL: Magnesio, Zinc

Magnesio(Lb): 9, 12, 17

Zinc(Lb): 15, 18, 24

**Figura 9. Pestaña de selección del relleno químico para los ánodos, material y peso de los ánodos.**  
Landaeta y Segovia, 2018.

En esta quinta pestaña se seleccionará si se desea usar un relleno químico para el ánodo, y de ser así, cuál de los 4 tipos existentes se utilizará, dependiendo de su compuesto y el valor de la resistividad que este ofrece.

De igual manera se debe seleccionar el material del cual estará hecho el ánodo y el peso del mismo (Lb).

#### 4.2.6 Pestaña “Selección”

Suelo	Revestimientos	Corrientes	Estructura	Ánodos	Selección	+
<b>AGRESIVIDAD DEL SUELO</b>				<b>Metal a Proteger</b>		<b>Den Est (mA)</b>
Aireación	<input type="text" value="0.000"/>			<input type="text"/>	<input type="text" value="0.000"/>	
Resistividad del Suelo ( $\Omega$ -m)	<input type="text" value="0.000"/>			<b>Longitud a Proteger (m)</b>		
Acidez	<input type="text" value="0.000"/>			<input type="text" value="0"/>		
Bacteria Sulforeductoras (Ppm)	<input type="text" value="0.000"/>			<b>Backfill</b>		
<b>SELECCIÓN DE REVESTIMIENTOS</b>				<b>Tipo</b>		<input type="text"/>
<input type="text"/>				<b>Tipo de Ánodo</b>		<input type="text"/>
<b>SUELO</b>				<b>PARAMETROS DEL ÁNODO</b>		
<input type="text"/>				Peso (kg)	<input type="text" value="0.000"/>	
CORRIENTES PARASITAS (mA)	<input type="text" value="0.000"/>			Diametro (m)	<input type="text" value="0.000"/>	
VOLTAJE RECOMENDADO (mA)	<input type="text" value="0.000"/>			Largo (m)	<input type="text" value="0.000"/>	
<b>Tamaño Nominal del Tubo(Plg)</b>				<b>EJECUTAR CALCULOS</b>		
<input type="text" value="0.000"/>	<b>Superficie (m)</b>	<input type="text" value="0.000"/>				

**Figura 10. Pestaña de corroboración de datos introducidos.**  
Landaeta y Segovia, 2018.

En esta sexta y última pestaña le usuario tiene la posibilidad de corroborar y verificar los datos anteriormente seleccionados y de estar de acuerdo con dichos valores, debe proceder a ejecutar la simulación, haciendo uso del botón “Ejecutar cálculos” y a continuación se desplegará la venta de resultados.

#### 4.2.7 Ventana De Resultados

## CALCULO PROTECCIÓN CATÓDICA

Área de tubería Expuesta (m <sup>2</sup> )	0	Longitud del ánodo (m)	0
Área de tubería revestida (m <sup>2</sup> )	0	Diametro del ánodo (m)	0
Deterioro del revestimiento (%)	0	Factor de espaciamiento	0
Densidad de corriente para tramo revestido (mA/m <sup>2</sup> )	0	Número de ánodos por lecho	0
Densidad de corriente para tubería desnuda (mA)/m <sup>2</sup>	0	Resistencia del lecho de ánodos (Ω)	0
Corriente de protección (mA)	0	Potencial catódico polarizado (mV)	0
Corriente con sobreprotección (mA)	0	Potencial ánodo polarizado (mV)	0
Peso total de material ánodico (kg)	0	Tiempo de servicio estimado (Años)	0
Vida útil del sistema (Años)	0	Corriente de salida del ánodo (mA)	0
Eficiencia del ánodo (%)	0	Tipo de revestimiento	
Capacidad teórica del ánodo (A-h/Kg)	0	Tipo de suelo	
Factor de utilización	0	Metal a proteger	
Capacidad practica del ánodo (A-h/kg)	0	Tipo de relleno	
Peso del ánodo comercial (kg)	0	Tipo de ánodo	
Número de ánodos	0	Conductor	
Resistencia de un ánodo vertical (Ω)	0		

**Figura 11. Ventana desplegable de resultados.**  
Landaeta y Segovia, 2018.

Al desplegarse esta ventana, se podrá apreciar tanto los valores previamente ingresados a la simulación como los valores calculados por la simulación para el desarrollo del sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio.

### 4.3 Corrida De Validación

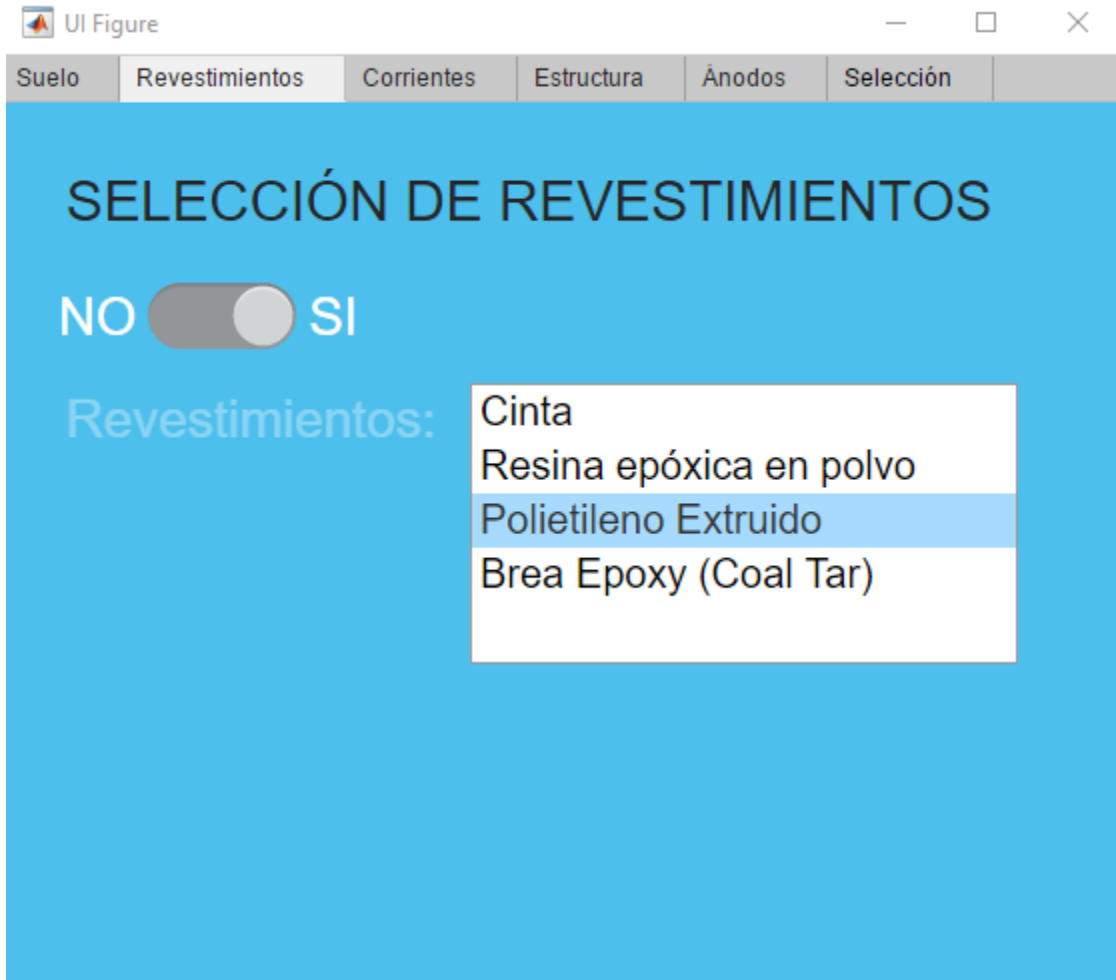
#### 4.3.1 Pestaña de validación “Suelo”



**Figura 12. Pestaña de valores de agresividad del suelo (Validación).**  
Landaeta y Segovia, 2018.

De acuerdo al estudio previo realizado en campo, se calcula un valor promedio de la resistividad del su ( -m).

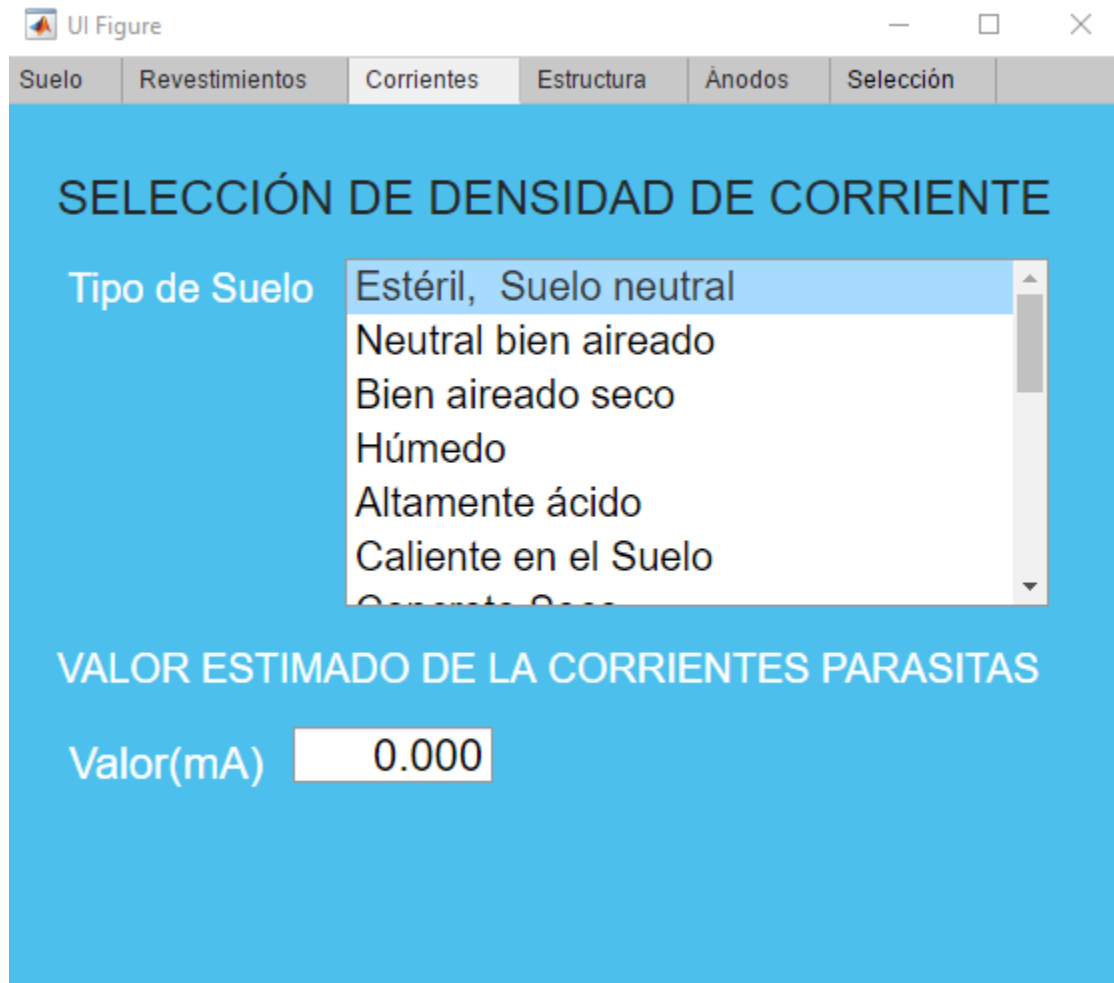
### 4.3.2 Pestaña de validación “Revestimientos”



**Figura 13. Pestaña de selección de revestimiento para la tubería (Validación).**  
Landaeta y Segovia, 2018.

A continuación se selecciona el revestimiento a utilizar para proteger la tubería de acero, siguiendo los lineamientos utilizados.

### 4.3.3 Pestaña de validación “Corrientes”

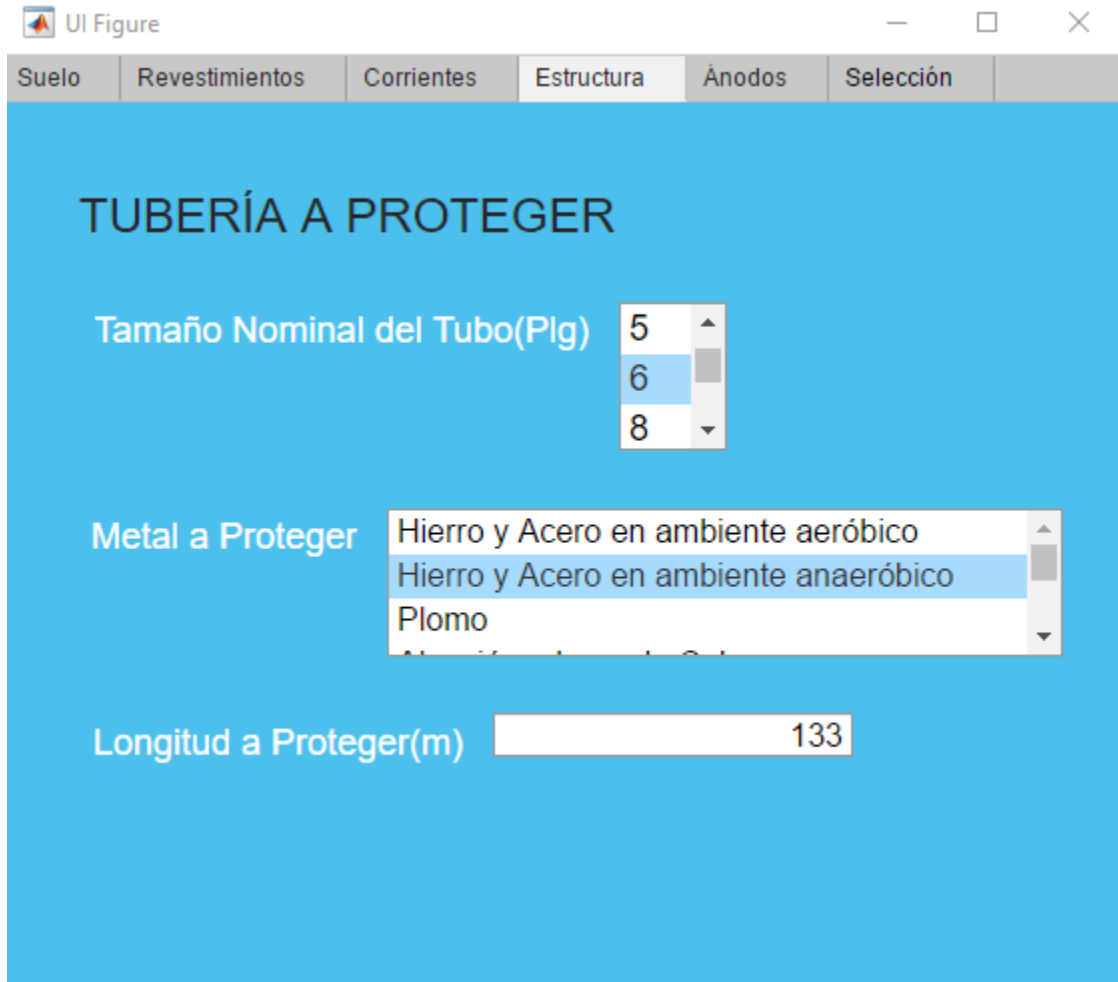


**Figura 14. Pestaña de selección de densidad de corriente y valor estimado de corrientes parasitas (Validación).**

**Landaeta y Segovia, 2018.**

Se selecciona el tipo de suelo, el cual se trata de un suelo neutro o estéril, despreciamos los valores de corrientes parasita y se continúa con el vaciado de datos.

#### 4.3.4 Pestaña de validación “Estructura”



**Figura 15. Pestaña de selección del tamaño nominal de la tubería, material a proteger y longitud a proteger (Validación).**

**Landaeta y Segovia, 2018.**

Se procede a la selección del tamaño nominal de la tubería a proteger, el material y la longitud de la misma.

#### 4.3.5 Pestaña de validación “Ánodos”

UI Figure

Suelo | Revestimientos | Corrientes | Estructura | **Ánodos** | Selección

### Rellenos Químicos para Ánodos Galvánicos

NO  SI

Tipo: A, B, C, D

YESO(%) 75

BENTONITA(%) 20

SULFATO DE SODIO(%) 5

RESISTIVIDAD(Ω-m) 50

### Ánodos de Sacrificio Comerciales

MATERIAL: Magnesio, Zinc

Magnesio(Lb): 32, 50, 60

Zinc(Lb): 15, 18, 24

Figura 16. Pestaña de selección del relleno químico para los ánodos, material y peso de los ánodos (Validación).

Landaeta y Segovia, 2018.

Posteriormente se selecciona el relleno químico del ánodo (Backfill), con su valor de resistividad correspondiente y de igual manera se selecciona el material del ánodo de sacrificio y su peso comercial.

#### 4.3.6 Pestaña de validación “Selección”

UI Figure

Suelo | Revestimientos | Corrientes | Estructura | Ánodos | Selección

**AGRESIVIDAD DEL SUELO**

Aireación: 0.000

Resistividad del Suelo ( $\Omega$ -m): 15.247

Acidez: 0.000

Bacteria Sulforeductoras (Ppm): 0.000

**SELECCIÓN DE REVESTIMIENTOS**

Polietileno Extruido

**SUELO**

Suelo con bacterias sulfato reduc

**CORRIENTES PARASITAS (mA)**: 0.000

**VOLTAJE RECOMENDADO (mA)**: 452.099

Tamaño Nominal del Tubo(Pulg): 0.152

Superficie (m): 1.734

**Metal a Proteger**: Hierro y acero en ambi

Den Est (mA): 10.750

Longitud a Proteger (m): 133

**Backfill**

Tipo: D

Tipo de Ánodo: Magnesio

**PARAMETROS DEL ÁNODO**

Peso (kg): 14.515

Diametro (m): 0.143

Largo (m): 0.521

EJECUTAR CALCULOS

Figura 17. Pestaña de corroboración de datos introducidos (Validación).  
Landaeta y Segovia, 2018.

Una vez seleccionados todos los parámetros, los mismos se pueden verificar rápidamente en la pestaña de “selección” y si se encuentra satisfecho con los valores seleccionados, se procederá a presionar el botón “EJECUTAR CALCULOS”.

#### 4.3.7 Ventana de validación De Resultados

CALCULO PROTECCIÓN CATÓDICA			
Área de tubería Expuesta (m <sup>2</sup> )	12.74	Longitud del ánodo (m)	0.5212
Área de tubería revestida (m <sup>2</sup> )	63.68	Diametro del ánodo (m)	0.1433
Deterioro del revestimiento (%)	0.1496	Factor de espaciamento	1.001
Densidad de corriente para tramo revestido (mA/m <sup>2</sup> )	10.75	Número de ánodos por lecho	3
Densidad de corriente para tubería desnuda (mA)/m <sup>2</sup>	452.1	Resistencia del lecho de ánodos (Ω)	1.79
Corriente de protección (mA)	136.9	Potencial catódico polarizado (mV)	950
Corriente con sobreprotección (mA)	164.3	Potencial ánodo polarizado (mV)	1500
Peso total de material anódico (kg)	61.57	Tiempo de servicio estimado (Años)	16.72
Vida útil del sistema (Años)	20	Corriente de salida del ánodo (mA)	102.5
Eficiencia del ánodo (%)	0.5	Tipo de revestimiento	Polietileno Extruido
Capacidad teórica del ánodo (A-h/Kg)	2.2	Tipo de suelo	Estéril, suelo neutral
Factor de utilización	0.85	Metal a proteger	Hierro y acero en ambier
Capacidad practica del ánodo (A-h/kg)	1100	Tipo de relleno	D
Peso del ánodo comercial (kg)	14.52	Tipo de ánodo	Magnesio
Número de ánodos	5	Conductor	N° 8 AWG
Resistencia de un ánodo vertical (Ω)	5.366		
Resistividad del medio (Ω-m)	7.422		

**Figura 18. Ventana desplegable de resultados (Validación)**  
**Landaeta y Segovia, 2018.**

## CONCLUSIONES

De acuerdo a los objetivos planteados en el inicio de este trabajo de investigación, luego del desarrollo a cabalidad del mismo, se logró lo siguiente:

Gracias al desarrollo de la simulación, es más eficiente la realización de cambios en los parámetros utilizados para el diseño de protección catódica, lo cual facilita considerablemente la posibilidad de desarrollar diferentes modelos y configuraciones para de esta manera contar con una amplia gama de posibilidades y lograr escoger la idónea para ser aplicada, según sea el caso.

De acuerdo a la diferencia porcentual de 13,05% (Vida útil del sistema), obtenidos al comparar la data resultante de la simulación con la data obtenida en campo, podemos constatar a ciencia cierta que Matlab constituye una herramienta confiable para la programación de la simulación, se puede evidenciar que el código resulta sencillo, compacto y permite apegarse a la realidad.

Durante el proceso de simulación y como resultado de la comparación de dicho proceso con respecto al estudio realizado en campo, se obtuvo una diferenciación de la corriente de salida del ánodo de 24,14%, todo esto motivado al cambio en las dimensiones del relleno químico (Backfill) y la no especificación de las dimensiones del ánodo.

La utilización independiente de valores durante el desarrollo del sistema de protección catódica en el campo y el desarrollo de la simulación, como son los ánodos comerciales disponibles, el tipo de recubrimiento y el relleno químico. motivado a la poca especificidad de los datos de campo suministrados, generan variaciones en los resultados finales obtenidos.

La simulación desarrollada como parte de este trabajo de investigación arrojó un conjunto de valores los cuales reflejan un pequeño margen de diferenciación del 13.05% (Vida útil del sistema), con respecto a la data de valores preexistentes, obtenidos en campo. Todo esto a pesar de los inconvenientes relacionados con la diferencia de los materiales utilizados en diferentes áreas de ambos procesos de diseño y los valores marginalmente especificados o mal utilizados en la data previa (Dimensiones del relleno del ánodo "Backfill", dimensiones del ánodo). Motivado a esto se puede confirmar la factibilidad y la confiabilidad de la simulación que a pesar de que los resultados arrojados por esta, no son idénticos a los previamente obtenidos, no dejan de ser resultados aceptables, factibles y favorables para el correcto desarrollo de diseños de sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificios.

Motivado a que el uso de Ánodos compuestos de aluminios se utiliza para ambientes marinos como plataformas offshore y sistemas cerca de costas y no para tuberías de acero enterradas, se decide eliminar la posibilidad de uso de ánodos de aluminio para la simulación.

## RECOMENDACIONES

Para futuros trabajos que puedan tomar esta tesis de grado, como punto de partida, se recomienda la aplicación del catálogo de materiales y diámetros de tuberías a proteger.

Tener una alta precisión al momento de realizar los estudios del suelo, la presencia de bacterias sulforeductoras y las variables del relleno del ánodo, ya que una pequeña variación en estos aspectos, conlleva consigo una gran variación en el resultado finales, lo cual influye directamente en los costos finales del desarrollo del sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio.

Se recomienda la programación de una “salida” de los resultados obtenidos en formato .jpg (Formato de imágenes), para una mayor facilidad de estudio y comprensión de los mismos.

Desarrollar dentro de la misma simulación, una aplicación capaz de calcular el costo aproximado del desarrollo e implementación del sistema de protección catódica.

Desarrollar la programación de un método de entrada en formato .txt (formato de texto), de forma que se pueda hacer los cálculos en lotes.

Agregar un módulo a la simulación de manera paralela que de manera previa la introducción de datos nos ayude a realizar cálculos asociados a los valores que intervienen en el cálculo y designación de resistividad del medio.

Como última recomendación, pero considerada una de las más importantes, podemos incluir la necesidad de llevar dicha simulación a sistemas de programación más portátiles como lo son los sistemas IOS y ANDROID, los cuales, por tratarse de sistemas operativos para dispositivos móviles, facilitaría en gran medida la posibilidad de utilizar dicha simulación en el campo, lo cual acortaría aún más el tiempo requerido para el desarrollo de un sistema adecuado de protección catódica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM, International. (Abril de 2012).

. West Conshohocken, EEUU.

Bravo, S. (1991).

Madrid:

paraninfo.

Casallas, J. R. (1.995).

Bogotá.

Ince, R. S. (2002).

Madrid: Mc Graw Hill.

Mikel, F. (2011).

Panplona.

NACE. The International Corrosion Society. (2004).

NACE. The International Corrosion Society. (2007).

Ornés, F. (2012).

Sartenejas.

Ortiz, A. (2013).

Caracas.

Rosas, M. (2012).

Sartenejas.

Santa Palella, S., & Martins Pestana, F. (2012).

Ventura, P. (2015).

Cartagena.

## ANEXOS

<b>PESO (lb)</b>	<b>dA (pie)</b>	<b>LA (pie)</b>	<b>dB (pie)</b>	<b>LB (pie)</b>
9	0.282	1.168	0.667	2.168
12	0.374	1.000	0.667	2.000
17	0.374	1.416	0.667	2.416
32	0.470	1.710	0.750	2.710
50	0.658	1.333	0.918	2.333
60	0.423	5.000	0.709	6.000

Dimensiones de ánodos de magnesio utilizados.

<b>PESO (lb)</b>	<b>dA (pie)</b>	<b>LA (pie)</b>	<b>dB (pie)</b>	<b>LB (pie)</b>
15	0.132	2.500	0.667	3.500
18	0.132	3.000	0.667	4.000
24	0.132	4.000	0.667	5.000
30	0.132	5.000	0.667	6.000
60	0.188	5.000	0.667	6.000
150	0.374	3.000	0.667	4.000

Dimensiones de ánodos de cinc utilizados.

DIAMETRO NOMINAL NPS	DIÁMETRO EXTERIOR (Pulg.)	ESPESOR DE PARED (Pulg.)	PESO TUBO 6m.		LARGO DEL TUBO (m)	GRADO	PRESION DE PRUEBA (psi)	SCH
			NEGRO (kg.)	GALVANIZADO (kg)				
1/4"	0,540	0,088	3,780	3,962	6,00	A	700	40
3/8"	0,675	0,091	5,040	5,296	6,00	A	700	40
1/2"	0,840	0,109	7,620	7,887	6,00	A	700	40
3/4"	1,050	0,113	10,140	10,479	6,00	A	700	40
1"	1,315	0,133	15,000	15,479	6,00	A	700	40
1 1/4"	1,660	0,140	20,340	20,935	6,00	A	1200	40
1 1/2"	1,900	0,145	24,300	25,016	6,00	A	1200	40
2"	2,375	0,154	32,640	33,579	6,00	A	2300	40
2 1/2"	2,850	0,203	51,780	52,880	6,00	A	2500	40
3"	3,500	0,216	67,740	69,080	6,00	A	2500	40
4"	4,500	0,237	96,420	98,233	6,00	B	2210	40
6"	6,625	0,280	169,560	172,271	6,00	B	1780	40
8"	8,625	0,322	255,300	258,721	6,00	B	1570	40
10"	10,750	0,365	361,740	366,215	6,00	B	1430	40
12"	12,750	0,406	478,200	483,592	6,00	B	1340	40
16"	16,000	0,500	739,800	746,235	6,00	B	1310	40
20"	20,000	0,500	930,720	938,871	6,00	B	1050	30
24"	24,000	0,500	1121,640	1131,507	6,00	B	880	XS

Medidas nominales de tuberías según normas ANSI.

<i>Metal o aleación</i>	<i>Suelo Cu/CuSO<sub>4</sub> (saturado)</i>	<i>Agua de mar Ag/AgCl/agua de mar</i>
Acero al carbón		
— condiciones normales	-850 mV	-800 mV
— condiciones anaerobias	-950 mV	-900 mV
Plomo	-600 mV	-550 mV
Cobre y sus aleaciones	-500 a -650 mV	-450 a -600 mV
Aluminio	-950 a -1200 mV	-900 a -1150 mV

Valores recomendados de polarización del cátodo.

NATURALEZA DEL TERRENO	RESISTIVIDAD EN OHM*M
Terrenos pantanosos	de algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceo	200 a 3.000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3.000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedente de alteración	1.500 a 10.000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600

Resistividad media según el tipo de terreno.

Agresividad corrosiva en función a la resistividad.	
<i>Suelo</i>	<i>Resistividad</i>
Corrosividad	$\rho$ ( $\Omega$ -cm)
Altamente corrosivo	0-1000
Corrosivos	1001-5000
Poco corrosivo	5001-10000
Muy poco corrosivo	10000 en adelante

Niveles de agresividad del suelo en función de la resistividad.

Uso General	Resistencia de cables conductores de cobre en ohm por foot desde 10° a 25 C	
	Conductor Tamaño (Awg)	
Grupos de Lechos Para Corriente Impresa	4/0	0.0509
	3/0	0.0642
	2/0	0.0811
	1/0	0.102
	1	0.129
	2	0.162
	4	0.259
Instalación de Anodos Galvánico	8	0.654
	10	1.04
Puntos de pruebas-Tuberías	12	1.65
	14	2.62
Instrumentos de plomo	16	4.18
	18	6.66
	20	10.6

Uso y resistencia de los cables conductores, según su calibre.