UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas

FIE
Facultad de
Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética

TRABAJO DE DIPLOMA

Protección contra la corrosión en sistemas de puesta a tierra mediante el método de corriente impresa

Autor: Brian Sánchez Cepero

Tutor: Ing. Victor Rolando Jara González

Dr. C. Ángel Cecilio Valcárcel Rojas

Santa Clara, julio 2018

Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.
Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:
Atribución- No Comercial- Compartir Igual

Para cualquier información contacte con:
Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830
Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

PENSAMIENTO

“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en lo bello y maravilloso mundo del saber.”

Albert Einstein

DEDICTORIA

Dedico este trabajo a mis padres quienes han dedicado mucho esfuerzo a mi formación como profesional y a todas aquellas personas que de una manera u otra siempre me han apoyado.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer a mis tutores, el Ing. Víctor Rolando Jara González y el Dr. C. Ángel Cecilio Valcárcel Rojas por haber dedicado tiempo y guiarme en esta difícil tarea.

También quiero agradecer a todos mis amigos que siempre estuvieron conmigo y que nos apoyamos en los buenos y malos momentos.

A mis padres, que son la razón por la que siempre me he planteado estás metas y son mi fuente de inspiración para logar lo que hoy se hace realidad.

RESUMEN

Las mallas de tierra de las subestaciones eléctricas se encuentran sometidas a la acción corrosiva de los suelos, propiciando el deterioro de las mismas hasta provocar su desaparición y por consiguiente su salida de funcionamiento. En la actualidad existen varios métodos para la protección de este fenómeno inevitable, el cual afecta los equipos, la operación de los medios de protección y la vida del personal una vez que la malla de puesta a tierra es afectada. Este trabajo se realiza con el objetivo de diseñar un programa que permita modelar un sistema de protección catódica para prolongar la vida útil y el adecuado funcionamiento de las mallas de puesta tierra de subestaciones eléctricas de potencia. El método implementado fue el de protección catódica por corriente impresa, programado en MatLab creando finalmente el programa ECMaT 2.0 (Estudios de Corrosión en Mallas de Tierra) desarrollado en el Centro de Estudios Electroenergéticos de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, el cual aporta una solución técnica favorable y proporciona al usuario una visualización gráfica de la configuración del sistema de puesta a tierra, conjuntamente con la ubicación de los ánodos.

ÍNDICE

PENSAMIENTO III
DEDICTORIA IV
AGRADECIMIENTOS V
RESUMEN VI
INTRODUCCIÓN 1
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LA CORROSIÓN 3
1.1 Definición de corrosión 3
1.1.1 Causas de la corrosión 3
1.1.2 Clasificación de corrosión 5
1.1.3 Tipos de corrosión 7
1.2 Corrosión en las mallas de tierra 8
1.3 Fundamentos de la corrosión 9
1.3.1 Mecanismos básicos de la corrosión 9
1.3.2 Potenciales de corrosión 10
1.4 Protección catódica 11
Conclusiones del capítulo 15
CAPÍTULO 2. PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA 16
2.1 Protección catódica por corriente impresa 16
2.1.1 Tipos de ánodos auxiliares 18
2.1.3 Cálculo de la protección y distribución de los ánodos 22
2.2 Criterios de protección catódica 23
2.2.1 Conductores eléctricos 24
2.2.2 Conectores eléctricos 25
2.2.3 Resistencias eléctricas 25
2.2.4 Cambios en los requerimientos de corrientes 25
2.2.5 Requerimientos de corrientes de protección 25
2.2.6 Resistividad eléctrica 27
2.3 Fuentes de corriente 28
2.3.1 Rectificadores 28
2.3.1.1 Tipos de rectificadores 29
2.3.2 Dinamo con motor térmico 30

2.4 Ventajas y limitaciones del método de protección catódica por corriente impresa .. 30
Conclusiones del capítulo 31
CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO EN EL PROGRAMA ECMaT 2.0 . 32
3.1 Características generales del programa ECMaT 2.0 32
3.1.1 Diseño gráfico 32
3.1.2 Procedimiento de trabajo 33
3.2 Metodología de cálculo empleado 37
3.2.1 Vida útil 37
3.2.2 Corriente necesaria 38
3.2.3 Voltaje de salida en el rectificador 39
3.2.4 Capacidad del transformador 40
3.3 Ejemplo de cálculo empleando ECMaT 2.0 40
Conclusiones del capítulo 44
CONCLUSIONES 45
RECOMENDACIONES 46
REFERENCIAS BIBIOGRÁFICAS 47

INTRODUCCIÓN

Un sistema de puesta a tierra es parte fundamental dentro de las instalaciones eléctricas, ya que se utiliza como medio protector para drenar las corrientes de falla y sobretensiones. Si no se cuenta con un sistema de tierra que drene estos flujos de corriente y tensión excesivos, se corre el riesgo de tener pérdidas humanas, así como de equipo eléctrico. Por esta razón el presente estudio propone una protección contra los ataques corrosivos que se presentan en los sistemas de puesta a tierra, prolongando el período de vida útil de estas instalaciones y disminuyendo el efecto natural de corrosión de este tipo de instalación.

El empleo de metales en las instalaciones de puesta a tierra presenta problemas de corrosión complicados; dichos metales resulta imposible sustituirlos por productos no metálicos, como tampoco puede aplicarse el remedio de un recubrimiento no metálico para proteger la superficie debido a que esta debe ser conductora, es necesario por tanto buscar alternativas con el fin de mantener la vida útil de las mallas de puesta a tierra.

La técnica de protección catódica la inició Sir Humphrey Davy en el año de 1824, instalando ánodos de una aleación de zinc en el casco de los buques navales. La aplicación de la protección catódica a estructuras subterráneas surgió en Estados Unidos e Inglaterra alrededor de 1910, hoy en día su uso es casi universal. El dimensionamiento de sistemas de protección catódica se realiza utilizando ecuaciones empíricas ya comprobadas combinadas con algunas consideraciones básicas, lo que en conjunto constituye un proceso relativamente complejo del cual la realización de cálculos repetitivos ocupa la mayor parte [1].

Actualmente los cálculos para el dimensionamiento de sistemas de protección catódica pueden facilitarse con el empleo de programas computacionales, con el cual se obtiene un hábil manejo de la información, rapidez en el tiempo de respuesta y lo más importante confiabilidad en los resultados obtenidos, considerando esto se desarrolló y elaboró un programa para el diseño de sistemas de protección catódica con varios ánodos de sacrificio, buscando que los sistemas dimensionados presenten un mayor nivel de análisis, pudiendo ser optimizados. Teniendo en cuenta lo planteado surge el siguiente **problema científico:**

¿Cómo desarrollar algoritmos de programación en el programa ECMaT para modelar el método de protección catódica por corriente impresa en sistemas de puesta a tierra?

Para dar respuesta a esta interrogante científica, se plantea como **objetivo general:**

Implementar en el programa ECMaT, algoritmos que permitan modelar el método de protección catódica por corriente impresa en sistemas de puesta a tierra afectados por la corrosión.

Respondiendo al objetivo general, se definen los siguientes **objetivos específicos:**

1- Fundamentar teóricamente lo referente a la protección de sistemas de puesta a tierra contra la corrosión mediante el método de la corriente impresa.

2- Determinar los parámetros de diseño de un rectificador según los requerimientos del sistema de protección al que esté conectado.

3- Determinar la capacidad del transformador de servicio que, conectado directamente al rectificador, cumpla con los parámetros establecidos en el sistema de protección.

4- Programar en el software ´´ECMaT 1.0´´ el método de la corriente impresa, actualizando el mismo a versión 2.0.

5- Aplicar los resultados obtenidos en materia de software a un sistema de puesta a tierra afectado por la corrosión.

Como **tareas técnicas** en el trabajo se consideraron las siguientes:

1- Fundamentación teórica en lo concerniente al método de protección catódica por corriente impresa, enfocado especialmente en la protección de sistemas de puesta a tierra afectados por la corrosión.
2- Cálculo de los parámetros de diseño de un rectificador que garantice la alimentación en CD al sistema de protección.
3- Cálculo de la capacidad del transformador de servicio de la subestación, según la mínima requerida por el sistema de protección.
4- Implementación de algoritmos en el programa ECMaT para la modelación del método de protección catódica por corriente impresa.
5- Empleo del programa ECMaT 2.0 en la protección de sistemas de puesta a tierra afectados por la corrosión, empleando el método de protección catódica por corriente impresa.
6- Confección del informe.

Organización del informe

El trabajo está dividido por tres capítulos, el primero presenta los fundamentos teóricos sobre la corrosión y la protección catódica. En el segundo se abordan temáticas sobre la protección catódica por corriente impresa y los cálculos necesarios para implementar dicho método. En el tercero se realiza una breve descripción de la primera versión del programa (ECMaT 1.0); luego, se describe el procedimiento considerado para implementar en el mismo el método de protección por corriente impresa, actualizándolo a versión 2.0. Se aplican los resultados a una situación real que requiere protección mediante corriente impresa, validando así los mismos.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LA CORROSIÓN

La corrosión produce cambios físicos en los metales, donde el metal corroído genera una corriente eléctrica. Recibiendo esta energía el segundo metal puede mantener su nivel de energía y mantenerse estable, para que la corriente eléctrica fluya, debe existir una conexión metálica entre los dos elementos. Los dos metales implicados en el proceso de corrosión son electrodos específicamente, el electrodo que libera energía eléctrica al ambiente es el ánodo y el que recibe esta energía es el cátodo. El ánodo libera energía y pierde parte de su forma física y el cátodo gana una cantidad proporcional de energía y ocurre un cambio físico en este metal.

1.1 Definición de corrosión

La corrosión puede definirse como el ataque destructivo que sufre un material, generalmente metálico, por reacción química o electroquímica por el medio que lo rodea (atmosfera, suelo, agua, etc.). Existen dos tipos de corrosión, la corrosión química, en la que un material que se disuelve en líquido corrosivo y este se seguirá disolviendo hasta que se consuma totalmente o se sature el líquido y la corrosión electroquímica que involucra en forma simultánea un transporte de electricidad a través de un electrolito, generando una disminución espontánea en la energía de la celda o pila de corrosión. La corrosión es un problema inevitable, sin embargo se puede retrasar el efecto destructivo que tiene [2].

1.1.1 Causas de la corrosión

Se acepta generalmente la corrosión como un fenómeno electroquímico que implica la existencia de pilas de corrosión en las que la corriente fluye de los cátodos a los ánodos.

Las pilas de corrosión pueden ser debidas a múltiples causa o heterogeneidades que presenta la superficie metálica. Incluso considerado un monocristal (cristal metálico simple que exhibe una estructura perfecta), los átomos de las esquinas o bordes (figura 1.1) tienen mayor tendencia a pasar a la solución que los átomos del interior del cristal.

En la práctica, los metales son materiales policristalinos constituidos por innumerables pequeños granos, en los que la distribución de los átomos está bastante lejos de la perfección exhibida por el monocristal. Como ahora veremos hay numerosas imperfecciones o heterogeneidades que son causas de la diferencia de potencial electroquímico y que motivan a la aparición sobre la superficie metálica de pilas de corrosión.

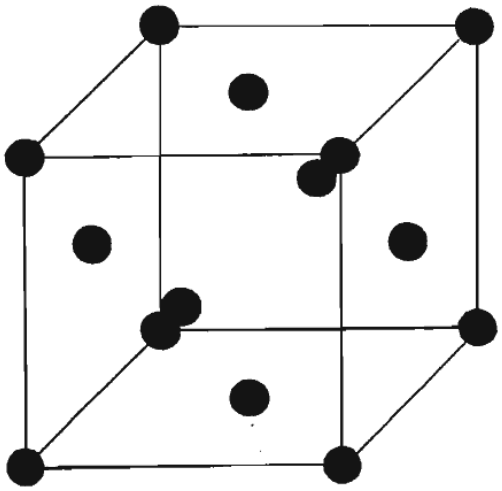

Figura 1.1. Celda unitaria de la red cristalina del cobre (Sistema cúbico centrado en las caras).

Las heterogeneidades pueden ser debidas al metal o al medio corrosivo en contacto con él.

Entre las heterogeneidades del metal, que constituyen las causas más frecuentes de la corrosión electroquímica se distinguen distintos tipos:

- De constitución: fases dispersas en la matriz metálica de diferente composición química.
- De estructura: anisotropía de los granos cristalinos, bordes de granos, dislocaciones emergentes, tamaño de grano, etc.
- Mecánicas: regiones de metal deformado en frío, zona de metal bajo tensión externa.
- Debida a diferentes estados superficiales: partículas contaminantes de la superficie, unión bimetálica, discontinuidades en películas que cubren el metal.
- Grados de pulido: rayas, etc.

Las heterogeneidades del medio corrosivo pueden ser de:

- Diferencia de temperatura.
- Diferencias de concentración salina, composición o pH.
- Diferencia de concentración de oxígeno (aireación diferencial).
- Movimiento del líquido.
- Presencia de agentes especialmente corrosivos.
- Acciones mecánicas simultáneas.

1.1.2 Clasificación de corrosión

La corrosión se puede clasificaren tres grandes grupos:

Corrosión de Ataque Directo: Es aquella que se presenta por la combinación química directa de un elemento metálico, con elementos químicos como el cloro, oxígeno o el azufre.

Corrosión Bacterial: En la mayoría de los casos es causada por la bacteria sulfato-reductora, esta bacteria, cuando se encuentra en presencia de un sistema determinado acelera la corrosión.

Anteriormente se creía que la bacteria sulfato-reductora solo se encontraba en terrenos fangosos, pero en la actualidad se los han descubierto en diferentes tipos de suelos, agua fresca y agua de mar [3].

Corrosión electroquímica: Es un proceso que está constituido por una zona anódica, catódica y un medio electrolítico. Generalmente la zona anódica se corroe y la catódica se reduce. La corrosión no tiene presencia si no se encuentra alguno de estos elementos.

Cuando el ánodo comienza a diluirse (corroerse) da paso a la liberación de electrones en forma de iones metálicos, al electrolito.

En el caso del Zinc (Zn) la reacción que sucede cuando éste es ánodo:

Zn (sólido) - Zn^{2+} (electrolito) + 2 electrones

Donde:
Zn (sólido): Elemento en estado basal.
Zn^{2+} (electrolito): Elemento ionizado.
2 electrones: Iones liberados en el electrolito.
La reacción anterior da paso a una oxidación. Se conoce que en un conductor metálico los electrones se mueven en sentido opuesto al convencional (negativo a positivo), por lo que en el ánodo la corriente eléctrica sale para entrar a la solución electrolítica y finalmente llegar al cátodo (figura 1.2)

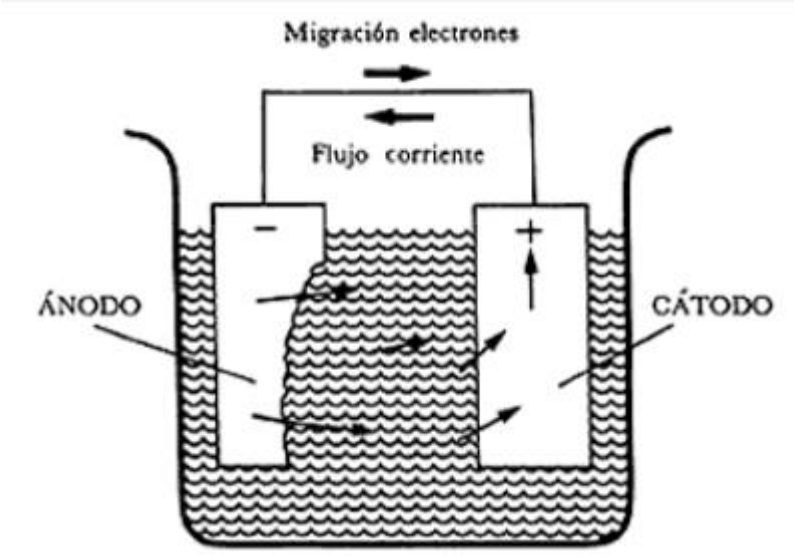

Figura 1.2. Dirección del flujo de corriente entre un ánodo y un cátodo en una celda de corrosión.

En el diagrama de la figura 1.2, las flechas representan las corrientes eléctricas fluyendo del ánodo al cátodo y retornando a través de un medio conductor (por ejemplo, hilo metálico de cobre).

Los electrones que se liberan del ánodo se combinan con iones presentes en el electrolito. Depositándose en la superficie del cátodo.

Algunos ejemplos de las reacciones catódicas más comunes en presencia de agua son:

$2H^+ + 2$ electrones = H_2 (gas)

Donde:

$2H^+$: Elemento en estado basal.

2 electrones: Iones liberados en el electrolito.

H_2 (gas): Producto liberado en estado gaseoso.

O_2 (gas) + 2 H_2O + 4 electrones = 4 OH (medio alcalino)

Donde:

O_2 (gas) + 2 H_2O: Compuesto que tiene reacción.
4 electrones: Iones liberados en el electrolito.
4OH: Producto liberado.
O_2 (gas) + 4 H^+ + 4 electrones = 2 H_2O (medio ácido)
Donde:
O_2 (gas) + 4 H^+: Compuesto que tiene reacción en el cual H^+ es el elemento ionizado.

4 electrones: Iones liberados en el electrolito.
2 H_2O (medio ácido): Producto liberado.
Los tres ejemplos anteriores son reacciones de reducción.

1.1.3 Tipos de corrosión

La destrucción por corrosión toma muchas formas dependiendo de la naturaleza del metal o de la aleación, la presencia de inclusiones y materiales extraños en la superficie, la homogeneidad de la estructura, la naturaleza del medio corrosivo, los factores ambientales, presencia de oxígeno, temperatura, tensiones, velocidad de movimiento, incrustaciones de óxido, grietas, depósitos porosos, efectos galvánicos entre metales diferentes, presencia de corrientes vagabundas que provienen de otras fuentes, etc.

La forma, apariencia, distribución de ataque, la localización y características del área afectada son factores indicativos de los diferentes tipos de corrosión.

La corrosión se puede clasificar desde los siguientes puntos de vistas:

Naturaleza de la corrosión:

- Seca: Cuando envuelve una reacción con gases a altas temperaturas.
- Húmeda: Cuando para su formación se requiere un medio líquido húmedo.

Apariencia del metal corroído:

Uniforme: El metal se corroe a la misma velocidad sobre la totalidad de la superficie. Es la más común de corrosión, puede ser seca o húmeda, química o electroquímica. En ella el metal expuesto se va desgastando, pero la pérdida del metal es proporcional a toda el área expuesta. Es el tipo de corrosión es más fácil de medir y las fallas se pueden prevenir mediante inspecciones periódicas o utilizando inhibidores [4], seleccionando los materiales adecuados, o determinando la fuente de corrosión que afecta a la totalidad del metal [5].

Localizada: En la corrosión de ataque localizado, la pérdida del metal solo afecta algunas áreas de la estructura y su prevención más difícil que la de ataque uniforme.

Las formas más comunes son:

- Ranuras: Se considera como zonas de estructura molecular más débil que el conjunto. Su formación se puede atribuir a las siguientes causas:

  Falta de oxígeno.

  Cambios de acidez.

  Formación de especies iónicas nocivas en los sitios donde se forma una grieta.

- Picaduras: es un fenómeno que dónde tiene lugar un proceso electroquímico. Los elementos que favorecen este fenómeno son casi siempre de tipo ambiental, como depósitos que impiden el reparto igualitario de oxígeno disuelto en el electrólito.

Esto crea una diferencia de potencial entre los dos medios, lo que provoca disoluciones reducidas en área pero grandes en profundidad. Estos depósitos pueden ser suciedad, grasa o sedimentos sobre la superficie metálica, o los mismos productos resultantes de la corrosión.

- Exfoliación: Es una forma de corrosión sub-superficial que comienza sobre una superficie limpia y se extiende por debajo de ella. Se difiere de la anterior por su apariencia laminada. Es común en aleaciones de aluminio y se combate con tratamientos térmicos.

- Selectiva: Se produce en las aleaciones polifásicas (metales alea dos) y sucede porque uno de los componentes de la aleación se corroe con más facilidad que los otros (aleaciones Cu-Zn).

- Diferencial: Las variaciones de composición del medio que baña una superficie metálica, tanto en concentración, como en la naturaleza de los componentes originan diferencias de potencial electroquímico que promueven, a su vez, fenómenos de ataque localizado.

- Erosión: Es causado por el movimiento de un metal sobre una superficie metálica, que ocasiona el desgate por la fricción y la corrosión. Generalmente se atribuye al desprendimiento de la capa protectora de óxido o de adherentes.

- Galvánica o Bimetálica: Este tipo de corrosión se presenta cuando se encuentra en contacto dos metales diferentes (es decir dos metales con distintos potencial electroquímico). Por lo general el metal menos noble se disuelve más rápidamente que si estuviese aislado y expuesto al mismo medio corrosivo.

1.2 Corrosión en las mallas de tierra

Al entrar en contacto la malla de acero con un electrolito, se inicia en su superficie de forma espontánea, la ionización de las moléculas de hierro. Imaginemos por un momento que el electrolito no interviniera en el proceso.

El metal de la malla se iría cargando negativamente por los electrones cedidos en la formación de los iones de hierro y, a la inversa, el electrolito se cargaría positivamente por los iones de metal en el disuelto. El proceso continuará hasta alcanzar el equilibrio que define el potencial electroquímico. En este momento se detendría el proceso de ionización del metal y con ello su disolución en el electrolito, con otras palabras, se detendría la corrosión del acero.

Visto de este modo, el equilibrio depende de que no desaparezcan los electrones de la superficie de la malla.

En general, la realidad es muy distinta. Al enterrar una malla el metal se encuentra inmerso en un electrolito húmedo, muy complejo, compuesto por una enorme cantidad de iones, más o menos activos, es decir necesitados de electrones, entre los que tienen lugar multitud de reacciones con la consiguiente captación de electrones que imposibilitan el supuesto

equilibrio. Lo normal es que dicho equilibrio no se alcance nunca, es decir, que el proceso de corrosión continúe hasta la total corrosión de la malla en un plazo de tiempo más o menos largo.

Según donde se produzca la captación de los electrones del hierro por los iones del electrolito se distinguen dos tipos de corrosión: Corrosión química o por ataque directo o Corrosión electroquímica.

1.3 Fundamentos de la corrosión

Los sistemas y métodos para la reparación, prevención y protección contra la corrosión son muy variados y constantemente aparecen nuevos productos que tratan de evitar y controlar este fenómeno.

Existen diversas maneras de luchar contra la corrosión:

1. Aislamiento eléctrico del material, mediante empleo de pinturas o resinas, depósitos metálicos de espesor suficiente, o por aplicación de recubrimientos diversos.

2. Polarización del mecanismo electroquímico. Esto se logra eliminando el oxígeno disuelto mediante la adición de inhibidores, los cuales pueden llegar a polarizar uno de los electrodos de la pila de corrosión, y llegar a detener o disminuir sus efectos.

3. Utilización de materiales resistentes a la corrosión de acuerdo con el medio de exposición.

1.3.1 Mecanismos básicos de la corrosión

Para que un proceso de corrosión electroquímico se presente son necesarias condiciones tales como:

1. Un ánodo y un cátodo.

2. Una diferencia de potenciales entre el ánodo y el cátodo, la cual puede deberse a:

- Contacto entre metales diferentes.
- Variación en la composición química en diferentes puntos sobre la superficie de un metal.
- Imperfecciones superficiales del metal.
- Tensiones residuales como resultado de los procesos de fabricación.
- Presencia de bacterias sulfato reductoras.

3. Conexión eléctrica entre el cátodo y el ánodo (generalmente están en la misma estructura).

4. El ánodo y el cátodo deben estar en contacto con un electrolito. La humedad atmosférica o del suelo satisface ésta condición.

Una vez alcanzadas estas condiciones en el ánodo el metal se corroe o disuelve, esto puede visualizarse como el paso del metal a un ion metálico o como la pérdida de uno o más electrones del átomo metálico, lo que eléctricamente puede escribirse como:

$M = M^{n+} + ne^-$

Metal = ión metálico + electrones

Como etapa posterior a ésta reacción el ion metálico pasa al estado mineral de menor potencial, generalmente a óxidos.

En el cátodo el metal no reacciona pero sobre su superficie se presentan reacciones de reducción, que dependiendo del electrolito serán:

- Desprendimiento de hidrógeno en medios acuosos:

$2 H^+ + 2 e^- - H2 \uparrow$

- Reducción del oxígeno si éste está presente en medios neutros o alcalinos:

$2 H_2O + O_2 + 4 e^- - 4 OH^-$

Reducción del oxígeno si está presente en medios ácidos y aireados, la cual puede darse en forma simultánea con el desprendimiento de hidrógeno.

$O_2 + 4H^+ + 4 e^- - 2 H_2O$

La diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo es la diferencia algebraica de sus potenciales individuales en relación con un mismo electrodo de referencia. Como normalmente no se emplean metales puros sino aleaciones, es fundamental conocer el comportamiento electroquímico de dichos materiales, por ello se han desarrollado las series galvánicas prácticas en diversos electrolitos.

La velocidad de disolución de un metal es directamente proporcional a la cantidad de corriente que fluye y la cantidad total de metal disuelto es proporcionar a la cantidad de electricidad que ha circulado por él; según la ley de Faraday [6].

La velocidad de corrosión disminuye como resultado de los efectos de los productos de las reacciones anódicas y catódicas; es posible medir éstos efectos en términos de potencial del metal sobre el cual están ocurriendo las reacciones, de tal forma que el potencial de la superficie del metal catódico cambia a un valor menos noble y de igual forma en la superficie anódica se observa que el cambio de potencial es en sentido contrario, aumenta a un valor más noble. Ésta variación en el potencial de los electrodos, cuando circula corriente por ellos se conoce como polarización [7].

1.3.2 Potenciales de corrosión

El potencial de una solución está relacionado a la energía que es liberada cuando el metal se corroe, tales metales de corrosión son susceptibles de ser medidos, al menos en sentido relativo, por ejemplo, colocando un metal más reactivo tal como el zinc y un metal menos reactivo tal como el cobre, en una solución de cloruro de sodio y midiendo el voltaje y la

dirección de la corriente que se genera por la acción galvánica. Si los experimentos se reportan utilizando una solución distinta, una concentración diferente, sería entonces diferentes los voltajes que se registrarían, pudiendo cambiar entonces las posiciones de algunos de los metales con relación a los otros de las series galvánicas.

La fuerza que hace fluir la corriente es el potencial que existe entre el ánodo y el cátodo, mientras más grande sea la diferencia de potencial entre los electrodos, mayor será la fuerza con que fluirá la corriente. Para medir la diferencia de potencial se utilizan electrodos de referencia y el potencial obtenido se expresa con relación al electrodo de referencia a utilizar.

Para efectuar trabajos de corrosión se utilizan generalmente electrodos de referencia, los más utilizados y económicos son los de cobre, sulfato de cobre, los calomelanos y el electrodo de hidrógeno [8].

La determinación exacta del potencial existente entre los diferentes elementos ha permitido la elaboración de la tabla de la fuerza electromotriz tomando como referencia el electrodo de calomel [2].

1.4 Protección catódica

Existen dos tipos de sistemas de protección catódica, los cuales se pueden emplear en forma individual o combinada: la protección galvánica (ánodos de sacrificio) y la protección catódica por corriente impuesta.

Dentro de las técnicas electroquímicas de control de la corrosión la protección catódica es tal vez el más eficaz e importante de los métodos de protección, ya que puede aplicarse para evitar la corrosión de todos los metales y aleaciones estructurales; al mismo tiempo que puede eliminar los efectos de corrosión por baja tensión, corrosión con fatiga y el ataque en forma de picadura. El mecanismo de éste sistema de protección se basa en la polarización catódica del metal a proteger mediante la acción de una corriente continua externa la cual lleva el potencial de la superficie del metal hasta un valor de potencial de protección; esto es, bajar el potencial del metal a proteger hasta un valor en el cual no se corroa; de acuerdo con la Figura 1.3 es llevar el potencial del metal desde el punto A en la zona de corrosión hasta un punto B en la zona de inmunidad de un diagrama de potencial - pH, comúnmente denominado diagrama de Pourbaix [9].

Otra forma de observar el proceso de corrosión es mediante el análisis del diagrama de Evans (Figura 1.4), el cual se obtiene al graficar la curva de polarización catódica para el proceso de reducción y la curva de polarización anódica para el proceso de disolución del metal, donde el punto de intersección de las curvas proporciona la velocidad de corrosión; se observa, que si el potencial se incrementa de E_{corr} a, la velocidad de disolución del metal aumenta de i_{corr} a i_{A1} y la velocidad del proceso de reducción decrece desde i_{corr} a i_{A2}.

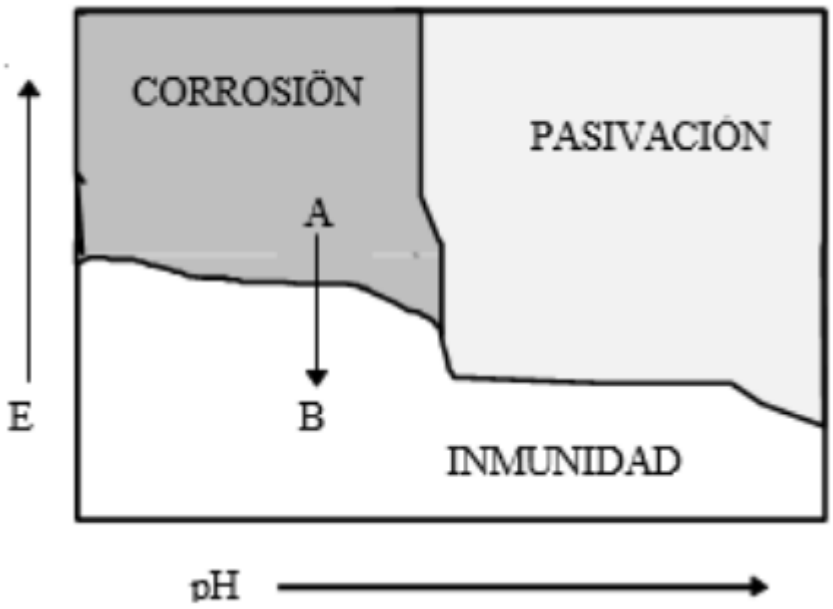

Figura 1.3. Diagrama general de Pourbaix.

Por otro lado si el potencial se disminuye hasta B, la velocidad de disolución del metal disminuye desde i_{corr} hasta i_{B1} y la velocidad del proceso de reducción aumenta de i_{corr} a i_{B2}. Sin embargo ni el potencial A ni el potencial B pueden alcanzarse en forma espontánea, dado que en el primer caso hay un exceso de electrones liberados i_{A1}-i_{A2} ($i_{neta} = i_A - | i_B|$), estos electrones extras deben retirarse a través de un circuito externo y en el segundo caso se presenta una deficiencia de electrones por consumo $i_{B2} - i_{B1}$, esta deficiencia se suple a través de un circuito externo. En general para alcanzar potenciales por encima de E_{corr}, los electrones deben retirarse del metal y para situar el potencial por debajo de E_{corr}, es necesario suministrar electrones [1].

Con base en el diagrama de Evans puede afirmarse que al potencial de corrosión, E_{corr}, las velocidades de las reacciones anódica y catódica son iguales en magnitud pero de signos opuestos y que esta velocidad es igual a la velocidad de corrosión natural o libre. También se deduce que por debajo de E_{eqa} es termodinámicamente imposible que ocurra la disolución del metal. De igual forma por encima de E_{eqc}, la reacción catódica no sucede.

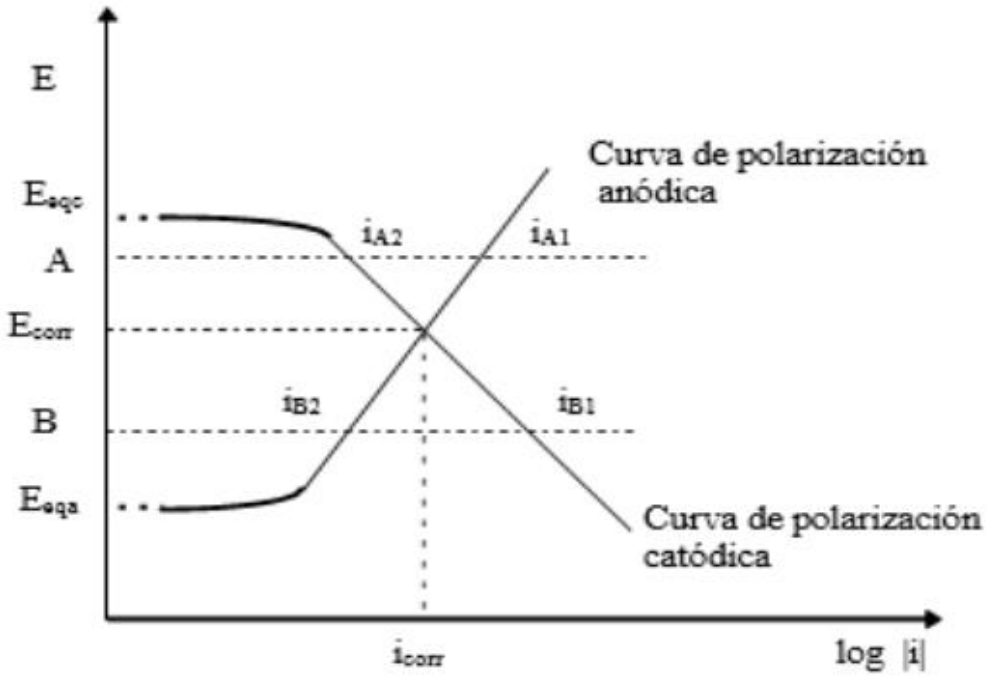

Figura 1.4. Diagrama general de Evans para un sistema de corrosión.

La corriente continua externa se descarga por medio de una conexión enterrada (cama anódica enterrada), durante la descarga de corriente los materiales de la cama están sujetos a la corrosión a velocidad más baja que la usualmente presentada por los metales de las estructuras que se protegen; por lo tanto, puede decirse que la protección catódica en términos estrictos no elimina la corrosión, sino que la desplaza de la estructura y la concentra en otro sitio conocido [10].

El fenómeno de protección catódica puede examinarse a partir de la ecuación fundamental de corrosión como se muestra a continuación:

$$I = \frac{Ea - Ec}{R} \quad (1.1)$$

Donde:

I = corriente de corrosión que fluye del ánodo hacia el cátodo.

E_a - E_c = diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo en la misma estructura.

R = suma de la resistencia de salida de la corriente del ánodo hacia el electrolito, con la resistencia de entrada de la corriente del electrolito hacia el cátodo.

Por la ecuación, verificamos que cuando existe una diferencia de potencial (E_a - E_c) sobre la superficie de una estructura enterrada y cuando la resistencia (R) posee un valor finito, la corriente de corrosión (I) fluye, generando el proceso corrosivo en el área anódica; de tal forma que la corrosión se anula haciendo la diferencia de potenciales entre el área anódica

y catódica igual a cero o aumentando infinitamente el valor de la resistencia, lo que puede conseguirse mediante la aplicación de un revestimiento perfecto; solución económicamente inviable. Para la protección de estructuras con máxima economía son usados los esquemas mixtos de protección, los cuales consisten en emplear un revestimiento con buenas características aislantes y de bajo costo complementado con un sistema de protección catódica [1].

En la protección catódica por corriente impuesta el suministro de corriente directa se realiza desde una fuente externa de fuerza electromotriz generalmente rectificadores. En conjunto con los rectificadores, el método por corriente impuesta utiliza ánodos, en cuanto sea posible inertes tanto en agua como en suelo, una instalación típica de corriente impuesta puede observarse en la Figura 1.5.

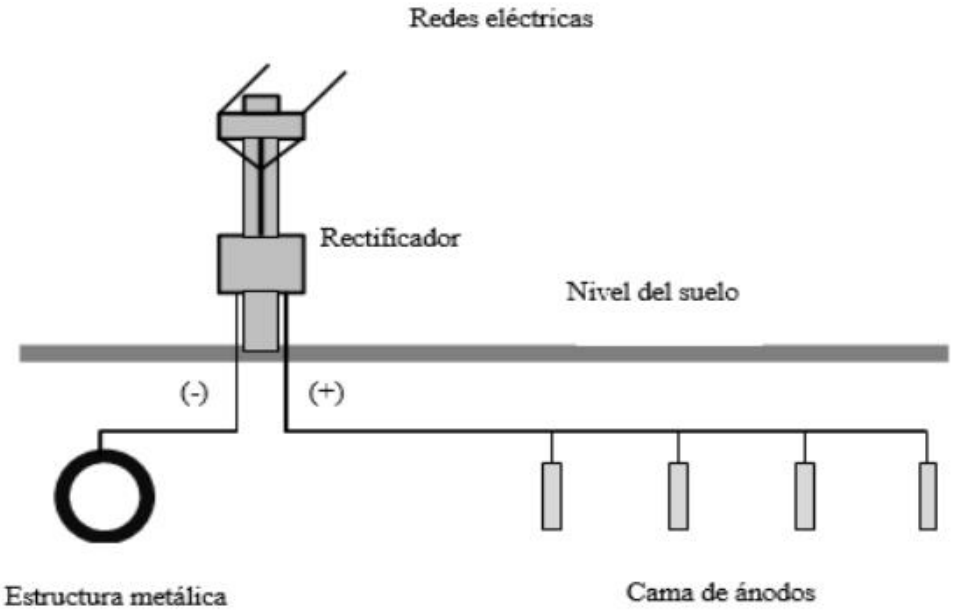

Figura 1.5. Protección catódica por corriente impuesta.

Es necesario realizar consideraciones tanto técnicas como económicas al hacer la selección de cual método de protección catódica sería el más recomendable; dado que cada método presenta ventajas y desventajas características. Ver tabla 1.1.

Tabla 1.1. Comparación de las protecciones catódicas.

Ánodos de Sacrificio	Corriente Impuesta
Ventajas	
Fácil de instalar.	Sirve para áreas grandes.
No requiere potencia externa.	Aplicables en cualquier medio.
Voltaje de aplicación fijo.	Útil en diseños de cualquier requerimiento de corriente mayor de 5 amperes.
Aplicable en casos de requerimiento de corriente pequeña, económico hasta 5 amperios.	Resistividad eléctrica ilimitada.
La interferencia con estructuras enterradas es prácticamente nula.	
Mantenimiento simple.	
Desventajas	
Sólo se los utiliza hasta un valor límite de resistividad eléctrica hasta 50Ω-m.	Amperaje variable.
Útil en medios de baja resistividad.	Voltaje de aplicación variable.
Amperaje limitado.	Requiere potencia externa.
	Mantenimiento no simple.
	Alto costo de instalación.
	Es necesario analizar la posibilidad de interferencia.

Conclusiones del capítulo

La corrosión está presente hoy en día en muchos materiales afectando la vida útil de los mismos, lo que hace que constantemente tengamos que estar luchando contra este fenómeno, en este capítulo se exponen las causas fundamentales de la corrosión donde se explican los distintos tipos de corrosión que existen y sus clasificaciones, así como los fundamentos básicos de la corrosión y los métodos que existen para frenarla, ya que es un fenómeno inevitable.

CAPÍTULO 2. PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA

Frecuentemente ocurre que las partes de una estructura metálica enterrada tienen un potencial respecto al suelo, que las hace actuar como ánodos y esto hace necesariamente que la estructura se corroa. Para obviar este problema, es necesario ajustar artificialmente el potencial de la estructura a valores apropiados, tales que el nuevo potencial contrarreste, por lo menos, la corriente de corrosión.

Este ajuste se puede lograr por el suministro de corriente a la estructura mediante la aplicación o combinación de los métodos siguientes: método de los ánodos de sacrificio y método de corriente impuesta.

Para que la protección catódica sea aplicada correctamente, se debe tomar en cuenta todos los factores importantes que entran en el diseño, incluyendo el potencial a que se debe llevar el metal para prevenir el ataque corrosivo, la resistencia del medio que determina el tipo, el número de ánodos que se debe usar y la posibilidad de cambiar la protección catódica por medios de protección.

El método de la protección catódica por corriente impresa utiliza una fuente de corriente continua externa para imprimir la corriente necesaria para la protección de una estructura.

2.1 Protección catódica por corriente impresa

El sistema de protección catódica con corriente impresa se llevó a cabo aproximadamente cien años después que el de ánodos galvánicos

Este procedimiento consiste en unir eléctricamente la estructura que se trata de proteger con el polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua (pura o rectificada) y el positivo con un electrodo auxiliar que cierra el circuito. Los electrodos auxiliares se hacen de chatarra de hierro, aleación de ferrosilicio, grafito, titanio platinado, etc. Es completamente indispensable la existencia del electrolito (medio agresivo) que completa el conjunto para que se realice el proceso electrolítico.

Este sistema de protección catódica tiene la característica de que utiliza como ánodo dispersor de la corriente (electrodo auxiliar) materiales metálicos que en mayor o menor grado se consumen con el paso de la corriente. Sin embargo, el intercambio necesario de corriente con el electrolito tiene lugar a través de reacciones electroquímicas, las cuales dependen tanto del material anódico, como del ambiente que rodea al mismo e incluso de la densidad de corriente que éste suministra.

Por ejemplo, en el caso de un ánodo de chatarra de hierro o de acero al carbono, la reacción electródica es la de disolución del hierro:

$$Fe \qquad Fe^{2+} + 2e^{-} \qquad (1)$$

y por tanto, el ánodo se consume con el tiempo. Para aquellos ánodos que se pueden considerar insolubles o inertes, por ejemplo el de titanio platinado, la reacción electroquímica puede ser:

$$4\,OH^{-}\ O_2 + 2\,H_2O + 4\,e^{-} \qquad (2)$$

$$2C1^{-}\ C1_{\,2} + 2e^{-}, \qquad (3)$$

según el ambiente y la densidad de corriente suministrada por el ánodo.

En el suelo y en las aguas naturales tiene lugar la reacción (2), mientras que en el agua de mar tiene lugar principalmente la reacción (3). Los componentes de un sistema de protección catódica con corriente impresa son:

a) un ánodo dispersor, *b)* una fuente de corriente continua y *c)* el cable portador de la corriente. En la figura 2.1 se presenta un esquema de la protección de una tubería enterrada en el suelo [11].

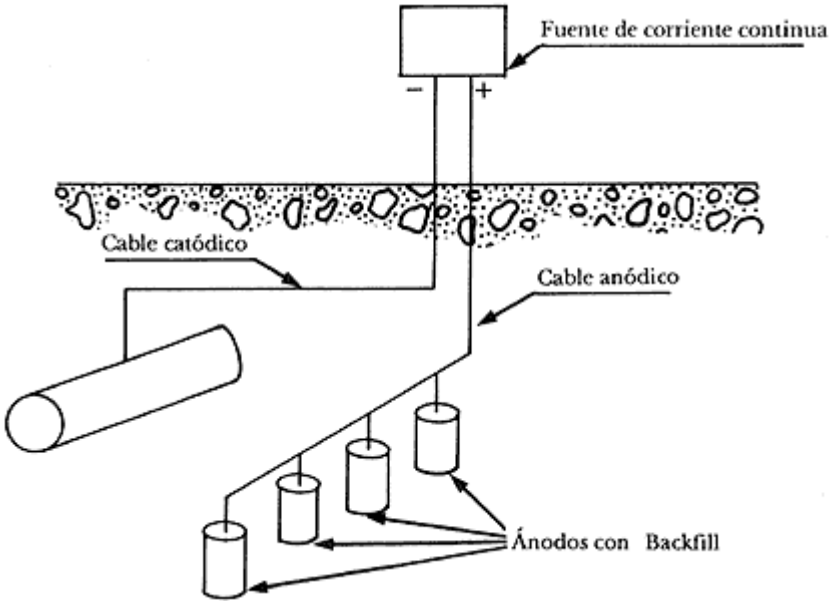

Figura 2.1. Esquema de proteción catódica con corrriente impresa de una tubería enterrada.

2.1.1 Tipos de ánodos auxiliares

Todos estos ánodos van consumiéndose a mayor o menor velocidad con el paso de la corriente. Así, por ejemplo, la chatarra de hierro se consume muy rápidamente y el titanio platinado a un ritmo muy lento. A continuación se describen brevemente cada uno de estos electrodos.

Chatarra de hierro

Por ser lo más económico, la chatarra de hierro es utilizada con frecuencia como ánodo auxiliar. Dentro de los perfiles es el carril viejo el más utilizado y, dentro de las fundiciones, la tubería.

Puede ser aconsejable la utilización de este tipo de ánodos en terrenos de resistividad elevada, y es recomendable también que se le rodee de un relleno artificial constituido por carbón de coque (con un diámetro medio de partícula de 10 mm).

El consumo medio de los lechos constituidos por perfiles de acero viene a ser de 5 kg/A-año y de 8-10 kg/A-año para la tubería de fundición.

Ferrosilicio

El ánodo de ferrosilicio es recomendable en terrenos de media y baja resistividad. Se coloca hincado o tumbado, en el suelo, y normalmente rodeado de un relleno de carbón de coque.

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

Sus dimensiones más normales corresponden a 1 500 mm de longitud, 75 mm de diámetro, y su peso aproximado es de 60 kg.

El ferrosilicio es muy frágil en virtud de su estructura cristalina, por lo que se ha de tener un extremo cuidado en su embalaje y transporte.

Grafito

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

Este ánodo es frágil, por lo que su transporte y embalaje debe ser cuidadoso. Sus dimensiones varían: su longitud oscila entre 1 000 y 2 000 mm y su diámetro entre 60 y 100 mm. Son más ligeros de peso que los de ferrosilicio.

La salida máxima de corriente que tienen estos ánodos es de 3 a 4 A por ánodo y su desgaste varía entre 0.5 y 1 kg/A-año.

Titanio platinado

El de titanio platinado es un ánodo especialmente indicado para instalaciones en agua de mar, aunque también es perfectamente utilizable en aguas dulces o incluso en suelos. Su característica más relevante es que con pequeños voltajes (12 V) se pueden sacar intensidades elevadas de corriente, y además, su desgaste es apenas perceptible. En el agua de mar tiene, sin embargo, algunas limitaciones con respecto a la tensión a la que se puede aplicar, la cual nunca puede pasar de 12 V, ya que las tensiones más elevadas podrían ocasionar que se despegara la capa de óxido de titanio y que, por tanto, se deteriorara el ánodo. En aguas dulces que no tengan cloruros estos ánodos pueden actuar a tensiones de 40-50 V. La salida máxima de corriente puede ser de 3 000 A/m^2, y su desgaste en las condiciones más adversas es de 0.01 g/A-año.

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

Su resistencia mecánica es pequeña, y por simple abrasión, como en los casos de buques que naveguen por zonas que tengan arena, puede suceder que el platino desaparezca y quede el ánodo pasivado instantáneamente, y resulte, por tanto, inservible. Es éste un caso extremo, que no suele suceder, pero al menos se tiene que saber que esto puede pasar.

Tántalo platinado

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

Plomo-plata

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

Se utiliza más frecuentemente en agua de mar, en donde la corriente máxima de salida no pueda ser superior a 270 A/m^2. Se desgasta entre 50 y 200 g/A-año.

Estos ánodos deben presentar una superficie plana, con lo cual se evitan en lo posible las aristas, pues en estas zonas la capa de peróxido de plomo se forma mal o no se forma, por lo que en estos puntos se puede presentar una corrosión fuerte.

Titanio-óxido de titanio y óxido de rutenio

Estos ánodos, desarrollados en Estados Unidos en 1968, están constituidos por una combinación de óxidos de titanio y de rutenio, que se adhieren a un soporte de titanio, mientras se controla el proceso a alta temperatura (700° C) Como resultado se obtiene una estructura cristalina y dura que presenta una superficie extremadamente rugosa, lo que aminora los problemas de resistencia y facilita el proceso electroquímico. Su máxima capacidad de corriente (1100 A/m^2) lo coloca a la altura de los ánodos de titanio platinado, y su costo es, aproximadamente, 20% menor [11].

2.1.2 Propiedades de los ánodos auxiliares

Como se ha visto, los diversos tipos de materiales que se utilizan como ánodos para los sistemas de protección catódica con corriente impresa se escogen básicamente en función de sus prestaciones necesarias y del medio en que serán colocados.

En general, un buen ánodo debe poseer las propiedades siguientes:

a) Bajo consumo,

b) densidad de corriente erogada elevada,

c) pequeñas dimensiones,

d) baja resistividad,

e) buena resistencia mecánica, y

f) elevado potencial de ruptura.

Los ánodos que se utilizan en la corriente impresa pueden dividirse, en cuanto a su consumo, en: *a*) ánodos solubles, *b*) semiinertes y *c*) inertes. Actualmente se prefieren los inertes ya que, pese a que su costo es más alto, tienen las mejores características. En el cuadro 2.1 se resumen las propiedades principales de los ánodos utilizados en la corriente impresa, clasificados según su consumo. En el mismo cuadro se incluye el medio en el cual pueden utilizarse.

Tabla 2.1. Características de los ánodos empleados en protección catódica con corriente impresa.

Tipo	*Peso específico* g/cm^3	*Consumo* $kg/A\text{-}año$	*Densidad de corriente* A/m^2 *máxima*	*práctica*	*Utilización (medio)*
Acero Chatarra	7.8 7.0	~9. 4.5-1	5	1	todos
Grafito	1.6	0.1-1	10-100	2.5-40	terreno, agua de mar; excluido el fondo marino y el agua dulce
Ferro-silicio: 0.95%C 16%Si, 0.75% Mn	~7	0.25-1	30-40	10-100	agua dulce, terreno
Fe-Cr-Si: 0.95%C, 0.75% Mn, 4.5%Cr, 14.5%Si	7	0.25-1	270		terreno, agua de mar, fondo marino
Pb-Ag (2% Ag)	11.3	~0.2	300	30-65	sólo agua de mar; excluido el fondo marino
Pb-Ag-Sb (1%Ag, 6%Sb)	11	~0.5	300	50-200	
Titanio platinado	4.5	8.10^{-6}	400 por cada micra de platino de espesor	500-1 000	terreno no salino con backfill, agua de mar; excluido el fondo marino y el agua dulce
Niobio platinado	8.4			500-700	
Tántalo platinado	16.6			500-1 100	
Titanio-óxido de rutenio (DSA)	4.5	5.10^{-7}	1100	700-1 100	todos

En el suelo o terreno se usa principalmente la aleación **Fe-Cr-Si**, mientras que en el agua de mar se tiende a utilizar ánodos inertes del tipo **Ti/Pt o Ti/RuO_2** (ánodos dimensionalmente estables, DSA).

La elección de un ánodo no se hace solamente en base a su consumo o a la densidad de corriente que puede proporcionar; hay que tener en cuenta, además, sus propiedades de resistencia mecánica, su resistencia a la erosión (como en el caso de que sean utilizados en agua de mar, y sobre todo sumergidos en las inmediaciones del mar o en el fondo marino), su facilidad de instalación, el tiempo de sustitución e incluso su disponibilidad en el mercado.

En el terreno, los ánodos pueden ser instalados en un lecho de bentonita o polvo de coque, lo cual crea un medio homogéneo, húmedo y de baja resistividad alrededor del ánodo, con lo que se aumenta su diámetro aparente y las dimensiones efectivas del ánodo, y se disminuye de esta forma la resistencia ánodo-suelo, se evitan los problemas de corrosión localizada que pueden romper el ánodo y reducir el consumo del material anódico [11].

2.1.3 Cálculo de la protección y distribución de los ánodos

El cálculo de un sistema de protección catódica con corriente impresa es relativamente más sencillo que el de ánodos galvánicos. De hecho, no es necesario optimizar las dimensiones y peso de los ánodos para garantizar por un lado el suministro de la corriente necesaria para la protección, y por el otro la duración de los ánodos elegidos.

Una vez establecida la corriente total de protección, se elige el tipo de ánodo con base en los criterios examinados en el párrafo anterior y, teniendo en cuenta la densidad de corriente máxima que puede suministrar cada ánodo, se determina su número por exceso con respecto al teórico, para así poder obtener un mayor grado de confiabilidad.

Todavía deberá tenerse en cuenta, para lograr una protección lo más económica posible, la optimización del número y dimensiones de los ánodos, en relación con la mayor o menor resistencia total que se determine, lo que se reflejará en la potencia del generador o fuente de corriente continua y en su costo de instalación.

Para la protección de estructuras ya existentes en agua de mar (por ejemplo la protección de estructuras viejas, protegidas inicialmente con ánodos de sacrificio) la elección de pocos pero potentes ánodos remotos, o al revés, de muchos pequeños distribuidos sobre toda la estructura, puede llevar a grandes diferencias en el costo de instalación, todo ello ligado al elevado costo de la instalación submarina de los ánodos. La elección de instalar pocos ánodos resulta sin duda más económica, pero en este caso es necesario tener presente que si se instalan pocos ánodos el sistema pierde confiabilidad, pues si uno de los ánodos queda fuera de servicio, esto significará una pérdida de protección que puede oscilar entre 50 y 100%, lo cual no sucede cuando se colocan muchos ánodos pequeños distribuidos en toda la estructura.

En la ubicación de los ánodos o del lecho anódico es muy importante conocer la posición de posibles estructuras que pudieran estar presentes en las vecindades, con objeto de evitar fenómenos de interferencia que puedan provocar ataques graves de corrosión. Por ejemplo, si se debe proteger una tubería que cruza a otra, disponiendo los ánodos como se indica en la figura 2.2, se interfiere la tubería extraña. Ésta, de hecho, representa el "camino" preferible (de menor resistencia) para la corriente suministrada por los ánodos. Aquella zona de la tubería extraña que recibe la corriente queda protegida catódicamente, mientras que en aquella de las cual sale la corriente, hay corrosión. Como la mayoría de la tuberías enterradas, está además protegida con algún tipo de recubrimiento aislante, la corriente

está relacionada con algún defecto del recubrimiento, por lo cual la densidad de corriente local puede resultar muy elevada y por ahí producir un ataque particularmente severo [11].

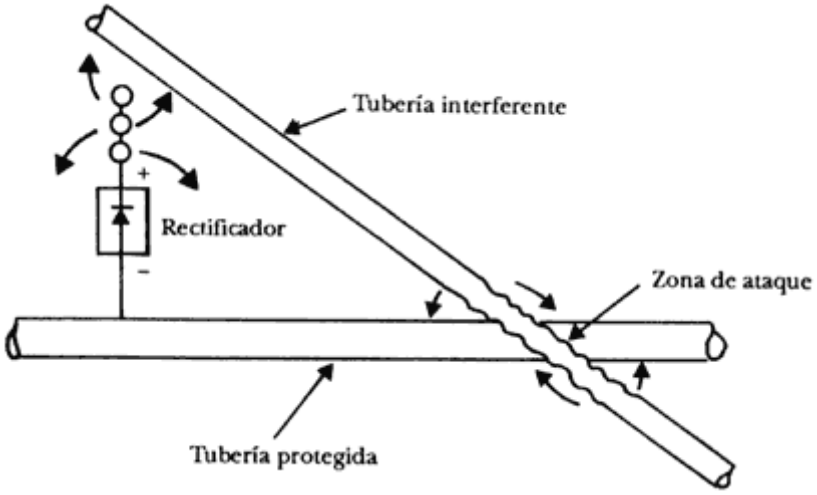

Figura 2.2. Ejemplo de interferencia provocada por una tubería extraña situada en la proximidad de una tubería protegida catódicamente.

2.2 Criterios de protección catódica

Pese a que el principio fundamental de la protección catódica es la generación de una corriente positiva sobre toda la superficie del metal a proteger, la determinación de éste valor de corriente criterio de protección es muy variable, debido a que ésta se halla ligada a la polarización catódica, la cual depende de la naturaleza del ambiente; esto conduce a considerar el potencial de la estructura como el parámetro de protección más confiable.

La utilización del valor del potencial como criterio de protección depende del metal a proteger, variando únicamente por acción de altas temperaturas (donde se recomienda un incremento de -2 mV / °C) y por la presencia de bacterias sulfato reductoras (donde se sugiere un incremento de -0.1 V referido al electrodo de cobre/sulfato de cobre). Los valores usualmente recomendados se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Potenciales recomendados para protección catódica.

METAL A PROTEGER	E (Cu / $CuSO_4$)
Hierro y acero en ambiente aeróbico	- 0.85 V
Hierro y acero en ambiente anaeróbico (acción	- 0.95 V
Plomo	- 0.6 V
Estaño	- 0.7 V
Níquel	- 0.8 V
Aleación a base de cobre	- 0.5 a - 0.65 V
Aluminio limite positivo	- 0.95 V
Aluminio limite negativo	- 1.2 V
Cobre	- 0.2 V

Otro criterio, también utilizado, consiste en promover, mediante la aplicación de la corriente de protección catódica, un incremento negativo mínimo de 0.3 V (en algunos casos 0.25 V es suficiente), sobre el potencial natural (potencial medido antes de la utilización del sistema de protección catódica) de la estructura. Éste criterio es válido cualquiera que sea el electrodo de referencia usado [12].

Cuando se desconoce el potencial de protección de determinada aleación o material metálico, un criterio seguro de protección es incrementar su potencial en -0.3 V, siendo para materiales anfóteros (zinc, aluminio y estaño) suficiente una variación de -0.15 V; estos metales no pueden polarizarse con potenciales más negativos que - 1.2 V, pues sufren corrosión severa, llamada corrosión catódica, debido a los altos valores de pH desarrollados, que tornan el medio muy alcalino.

2.2.1 Conductores eléctricos

En los sistemas de protección catódica las tensiones involucradas son bajas y por tanto, la tensión no es factor importante en la selección de los conductores.

Para el dimensionamiento de los cables se deben tener en cuenta los siguientes factores:

1. Resistencia eléctrica; es importante que los conductores presenten una baja resistencia, debido a que primordialmente en los sistemas de protección catódica por corriente impresa se manejan muy bajas tensiones y cualquier aumento en la resistencia puede ser significativo.

2. Conducción de corriente; las intensidades de corriente manejadas en los sistemas de corriente impresa son muy bajas, en la mayoría de los casos, los cables de 6 mm^2 de sección transversal permiten en forma satisfactoria la conducción de corriente, siendo los más utilizados.

3. Revestimiento aislante; es de fundamental importancia la especificación adecuada del revestimiento de los cables, para que soporten las condiciones de trabajo exigidas, tratándose de bajas tensiones y bajas corrientes, es usual instalar los cables directamente en el suelo. Un deterioro del revestimiento puede acarrear la absorción de humedad, que próxima a las conexiones causa oxidación introduciendo resistencias adicionales en el circuito [13].

2.2.2 Conectores eléctricos

Es esencial para los sistemas de protección catódica una perfecta continuidad eléctrica del circuito. Las conexiones eléctricas deben hacerse con soldadura, si es posible o por medio de conectores eléctricos, los conectores de presión son satisfactorios desde que su ajuste se apropiado. Es imprescindible que tales conexiones sean perfectamente aisladas para evitar el contacto directo con el electrolito.

2.2.3 Resistencias eléctricas

Con el objetivo de limitar la corriente drenada por los ánodos, cuando se comprueba que tal corriente es muy alta, es factible introducir una resistencia de valor adecuado en el circuito empleándose para ello un reóstato.

2.2.4 Cambios en los requerimientos de corrientes

Dentro de ciertas limitaciones es posible diseñar una instalación de protección catódica por corriente impresa, pese a que tal diseño es relativamente simple los parámetros naturales en los que se basa pueden no permanecer constantes.

El consumo de material anódico produce cambios en la resistencia del ánodo, la estructura igualmente puede verse afectada y sus requerimientos de corriente variar, esto puede deberse a que la naturaleza alcalina de las reacciones causa una polarización sobre las sales de calcio y magnesio o una alta resistencia del recubrimiento tal como un asfalto puede deteriorarse naturalmente. La variación en los parámetros de diseño, cualquiera que sea, trae como consecuencia cambios en los requerimientos de corriente de protección, llegando a disminuir hasta en un 50 % cuando se presenta la formación de capas calcáreas sobre estructuras marinas, o incrementarse hasta 20 veces por el deterioro del recubrimiento o por daños en la superficie del cátodo.

2.2.5 Requerimientos de corrientes de protección

La corriente necesaria para la protección catódica depende fundamentalmente de varios factores:

• Área a proteger y condiciones del revestimiento.

• Resistividad eléctrica del suelo.

• Dificultad de polarización de la estructura.

• Forma geométrica de la estructura.

Debido a las grandes variaciones existentes en los factores arriba mencionados, ya sea de una estructura a otra o de la misma estructura, se puede afirmar que la única manera de

disponer con precisión de la corriente necesaria para la protección, es por medio de pruebas de campo; empleando para ello una fuente de generación de corriente directa para realizar envíos de corriente y un lecho auxiliar de ánodos, normalmente de chatarra de hierro. El cambio de voltaje por unidad de amperaje da una indicación de la corriente requerida para alcanzar el potencial de protección deseado [14].

A continuación, en la Tabla 2.3 se muestran los requerimientos de corriente para protección catódica.

Tabla 2.3. Requerimientos de corriente para protección catódica.

MEDIO	**CORRIENTE REQUERIDA (mA / pie^2)**
Estéril, suelo neutral	0.4 - 1.5
Suelo neutral bien aireado	2.0 - 3.0
Suelo bien aireado seco	0.5 - 1.5
Suelo húmedo	2.5 - 6.0
Suelo altamente ácido	5.0 - 15.0
Suelo con bacterias sulfato reductoras	Hasta 42.0
Caliente en el suelo	5.0 - 25.0
Concreto seco	0.5 - 1.5
Concreto húmedo	5.0 - 25.0
Agua fresca estacionaria	5.0
Agua fresca en movimiento	5.0 - 6.0
Agua fresca altamente turbulenta con oxígeno disuelto	5.0 - 15.0
Agua caliente	5.0 - 15.0
Agua de estuario contaminada	50 - 150
Agua de mar	5.0 - 25.0
Químicos, soluciones alcalinas o ácidas	5.0 - 25.0
Aceros bien revestidos en suelos	0.01 - 0.02
Aceros bien revestidos con detector de fugas	0.001 o menos

En muchos casos existen ventajas técnicas y económicas que determinan la necesidad de diseñar el sistema de protección catódica antes de construir la estructura que desea protegerse; en dichas circunstancias se recurre entonces a la experiencia adquirida en casos semejantes, y a valores disponibles en la literatura, como los presentados en las Tablas 2.4 y 2.3 los cuales dan una idea aproximada de la magnitud de la corriente requerida; ya que variaciones en el ambiente afectan la polarización catódica y por ende los requerimientos de corriente [15].

Tabla 2.4. Densidad de corriente recomendadas para protección catódica.

Estructura	**Densidad de corriente (mA / pie^2)**
Tuberías	1 - 2
Paredes de pozos profundos	1
Fondo de tanques parte externa	1
Parte interna de tanques	5 - 10
Tanques de proceso	7 - 10
Estructuras en agua de mar	5 - 15
Estructuras en zonas pantanosas	1 - 2

2.2.6 Resistividad eléctrica

Uno de los parámetros más importantes en la corrosión y la protección catódica es la resistividad eléctrica de un electrolito; ésta es una propiedad del material, la cual está definida con base en la medición de la resistencia entre las caras opuestas de un cubo especifico de material, las unidades empleadas usualmente son ohm / cm3 y ohm / m3, al hacerla independiente de las dimensiones, la resistividad eléctrica se convierte en una propiedad intrínseca cuyas unidades pueden ser escritas como ohm - m2 / m o ohm - m. La resistividad de los electrolitos comunes varía considerablemente de uno a otro, así, para el agua de mar se tienen valores entre 0.20 y 0.30 ohm - m y para la roca de granito hasta 5000 ohm - m. Mientras el agua de mar es un electrolito uniforme, el suelo y las rocas presentan una alta heterogeneidad. La resistividad del suelo y las rocas varía notablemente con el contenido de agua y de su porosidad; de igual manera el valor de la resistividad de un terreno presenta aumento cuando la temperatura disminuye, registrando valores elevados al llegar al congelamiento; existen diversas correlaciones que permiten realizar correcciones sobre la resistividad por porosidad y temperatura de medio, siendo apropiada su aplicación en regiones donde se presentan estaciones [16].

Cuando el electrolito es un suelo se puede indicar la agresividad del mismo en relación con las estructuras de acero con base en la magnitud de su resistividad, como se observa en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Agresividad de los terrenos para estructuras de acero.

Agresividad	**Resistividad (ohm - m)**
Baja	Más de 100.
Media	De 20 a 100.
Elevada	De 10 a 20.
Alta	De 5 a 10.
Muy alta	Menos de 5.

2.3 Fuentes de corriente

El sistema de corriente impresa requiere de una fuente de corriente continua, no importa de dónde provenga, a condición de que se mantenga pese al paso del tiempo. Un sistema de corriente impresa debe de poder funcionar de forma permanente al menos durante diez años.

2.3.1 Rectificadores

Los aparatos que permiten el paso de la corriente en un solo sentido se conocen con el nombre de rectificadores.

Estos aparatos se alimentan con corriente alterna. Si se trata de un rectificador monofásico (Figura 2.3), estará constituido por un transformador monofásico T, alimentado en el primario a 110 o 220 V (tensión de la red de distribución). La tensión de salida puede ajustarse según las necesidades. Un puente monofásico reductor P, compuesto por 4 diodos o grupos de diodos de selenio o silicio. Este puente reduce las dos alternancias de la corriente monofásica. El selenio es más barato, pero también es más frágil que el silicio [11].

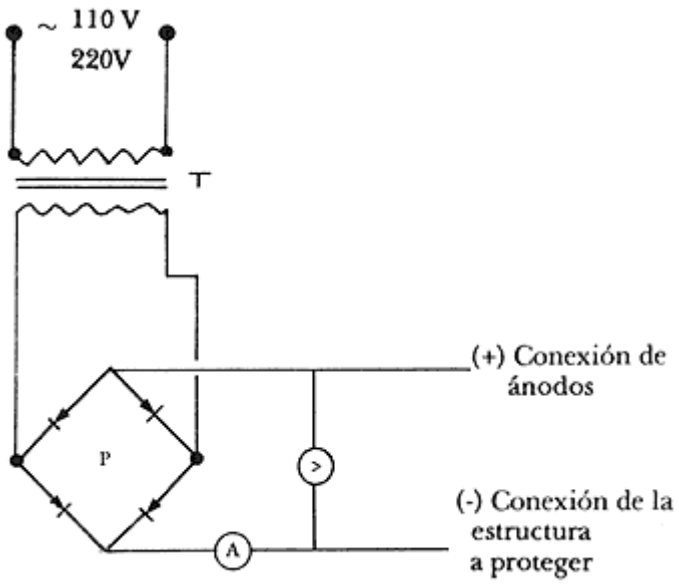

Figura 2.3. Esquema de un transforrectificador monofásico.

Un voltímetro permite controlar la tensión de salida y un amperímetro la intensidad total.

La tensión de salida puede ser regulada con ayuda de regletas o por medio de un "variac", el cual permite una regulación continua desde el 0 al valor máximo.

Cuando se necesitan intensidades altas de corriente es más económico utilizar rectificadores alimentados con corriente trifásica de 380 V.

2.3.1.1 Tipos de rectificadores

Rectificadores Manuales

Características:

Regulación mediante derivaciones del secundario del transformador.
Rectificación de onda completa.
Eficiencia > 95%.
Ventilación por convección natural
Robustez y durabilidad garantizada.
Ajuste grueso y fino.

Rectificadores Automáticos

Características:

Regulación automática por potencial o corriente constante.
Regulación manual potenciométrica multivueltas.
Puente rectificador semicontrolado con tiristores o MOSFET.
Adquisición de valores con conversores ADC de alta resolución y velocidad.

Rectificadores Especiales

Características:

Desarrollo a medida según necesidades específicas.
Sistema modular.
Rectificadores de alta corriente.
Gabinetes aptos para condiciones de corrosión extrema.
Frecuencia 50 / 60 Hz.
Refrigeración por aceite dieléctrico.
Tensiones de entrada de 110, 480, etc

2.3.2 Dinamo con motor térmico

Permite la protección catódica en donde no existe posibilidad de suministrar energía eléctrica, como en el caso de los desiertos o zonas selváticas. El motor térmico puede estar alimentado, ya sea directamente a partir de la conducción que se desea proteger, ya sea por un depósito que se llena periódicamente [11].

2.4 Ventajas y limitaciones del método de protección catódica por corriente impresa

Las ventajas y desventajas que presenta el método de protección catódica por corriente impresa se resumen en el cuadro 2.6. Esencialmente, se puede decir que este método es más conveniente que el de los ánodos de sacrificio, cuando se tratan de proteger estructuras muy grandes o con una gran demanda de corriente y cuando la resistividad del ambiente es elevada, como en el caso de los suelos [11].

Tabla 2.6. Ventajas y limitaciones de la protección catódica con corriente impresa.

Ventajas	Limitaciones
• Puede diseñarse para un amplio intervalo de potencial y corriente. • Un ánodo o lecho anódico puede suministrar una gran corriente. • Con una sola instalación se pueden proteger superficies muy grandes. • Potencial y corriente variables. • Se puede utilizar en ambientes de resistividad elevada. • Eficaz para proteger estructuras no recubiertas o mal recubiertas.	• Puede causar problemas de interferencia. • Está sujeto a rotura de la fuente de corriente. • Requiere de una inspección periódica y de mantenimiento. • Requiere de una fuente de corriente continua. • Posibilidad de condiciones de sobreprotección con daños a recubrimientos y problemas de fragilización por la acción del hidrógeno. • Conexiones y cables sujetos a roturas. • Tiene un costo elevado.

Una gran ventaja de este método es su posibilidad de proteger una gran superficie con un solo ánodo. Por otra parte, tanto la diferencia de potencial como la corriente suministrada son variables y de aquí se desprende que el sistema presenta una gran flexibilidad operacional.

Este tipo de sistemas debe ser proyectado con cuidado para no causar problemas de corrientes erráticas (parásitas), las cuales pueden provocar la corrosión de estructuras vecinas.

Conclusiones del capítulo

La protección catódica por corriente impresa en las mallas de tierra es uno de los métodos más usados hoy en día para prevenir la corrosión, ya que aumenta el tiempo de vida de las mallas de tierra y disminuye costos, este método todavía se encuentra en estudios ya que depende de muchos fenómenos los cuales hay que tener bien en cuenta a la hora de realizar la protección. Para este tipo de protección se debe tener en cuenta los tipos de metales, la fuente de corriente continua a utilizar, los cables portadores de la corriente, así como algunos criterios de protección.

CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO EN EL PROGRAMA ECMaT 2.0

En este capítulo se describe el programa ECMaT 2.0, creado con el fin de proyectar sistemas de puesta a tierra que requieran protección catódica contra la corrosión. La primera versión del programa solo hace estudios de protección contra la corrosión mediante el método de ánodos de sacrificio (Versión 1.0), pero la necesidad de incluir estudios de protección contra la corrosión mediante el método de corriente impresa, ha incentivado el desarrollo de la aplicación hasta su versión actual, ECMaT 2.0.

3.1 Características generales del programa ECMaT 2.0

El programa ECMaT 2.0 fue creado en la plataforma gráfica de MatLab, e incluye los aspectos y consideraciones fundamentales para la protección catódica con ánodos de sacrificio y por corriente impresa. El programa tiene una interfaz que utiliza notaciones, comandos, funciones, operaciones, gráficas y formatos consistentes. Es de fácil asimilación, obteniéndose un alto nivel de eficiencia al operarlo sin convertirse en un medio con pocas capacidades de ampliación, actualización y transportabilidad.

3.1.1 Diseño gráfico

Como se ha mencionado hasta el momento, el programa ECMaT 2.0 cuenta con una interfaz gráfica sumamente amistosa con el usuario, la cual incluye un sistema de menús que facilitan al usuario establecer los parámetros de diseño, realizar los estudios y visualizar lo resultados; además, el programa cuenta con un sistema de ayuda y de trabajo con archivos en la interfaz gráfica principal. En la figura 3.1 se aprecia la interfaz gráfica del programa en su versión 2.0.

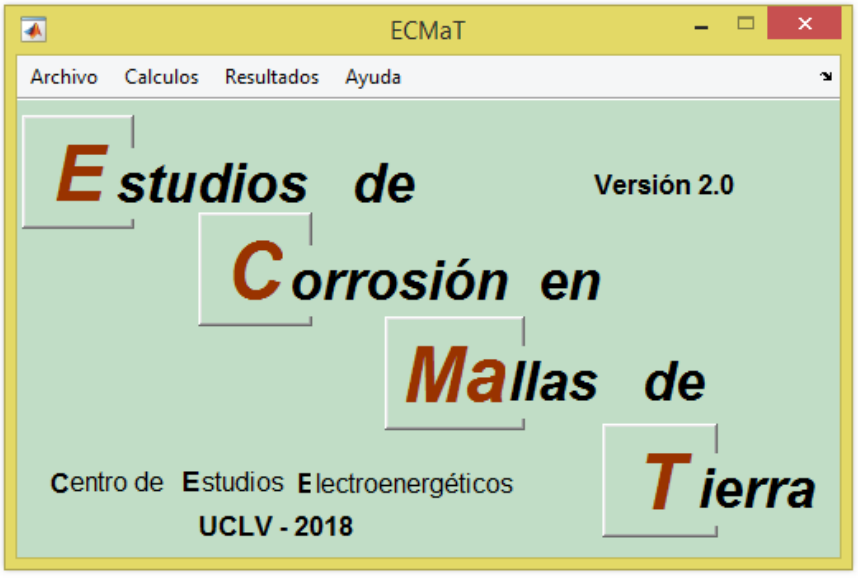

Figura 3.1. Interfaz gráfica principal del programa ECMaT 2.0.

3.1.2 Procedimiento de trabajo

En este epígrafe, se detalla el procedimiento básico que el usuario debe desarrollar para trabajar con el programa, enfocado en la correcta proyección del sistema de protección que desee emplear en su diseño.

Entrada de datos

Para el dimensionamiento de un sistema de protección catódica se precisa de una información técnica de la estructura a proteger y de los materiales a utilizar en conjunto con las mediciones de campo. Dicha información, se introduce al programa mediante la propia interfaz gráfica y cuyos valores correspondientes, constituyen los datos generales (o parámetros de diseño) que emplea para el cálculo del sistema de protección.

La entrada de datos generales (figura 3.2) se realiza mediante el menú ´´Archivo´´, en donde el usuario tiene la posibilidad de ´´Crear fichero´´. Se debe aclarar que esta entrada de datos es independiente al tipo de protección que se desee emplear en el diseño; se ofrece esta posibilidad al usuario especialmente para que tenga la opción de crear un fichero de datos, salvarlo y usarlo posteriormente, no obstante, si continúa con el trabajo puede servirle para proyectar el sistema de protección según el estudio escogido.

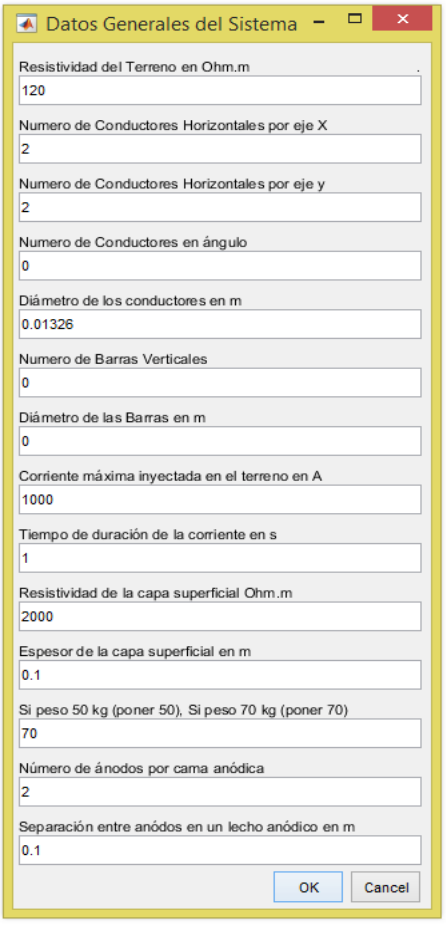

Figura 3.2. Panel de entrada de datos generales.

Cálculo del sistema de protección

Mediante el menú ´´Cálculos´´, el usuario puede elegir el tipo de método que desea emplear en la proyección del sistema de protección; dicha elección se aprecia en la figura 3.3 según la interfaz gráfica.

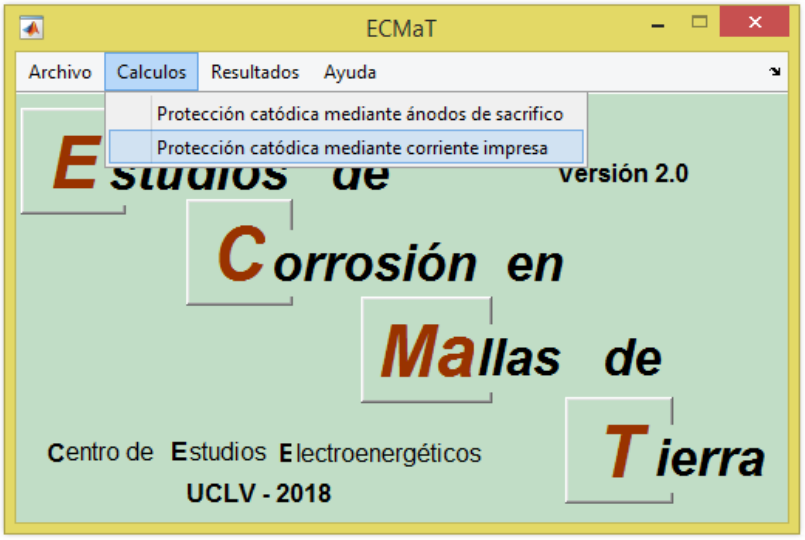

Figura 3.3. Elección del método de protección que se desea emplear.

Como se observa en la figura 3.3, se sobresalta la elección del método de protección mediante corriente impresa, temática fundamental en este trabajo y que constituye la actualización fundamental que se ha implementado para crear la versión ECMaT 2.0.

Suponiendo entonces la elección del método de la corriente impresa, el usuario visualiza una ventana emergente (figura 3.4), donde en ella puede elegir el tipo de ánodo que usará atendiendo a las normativas correspondientes.

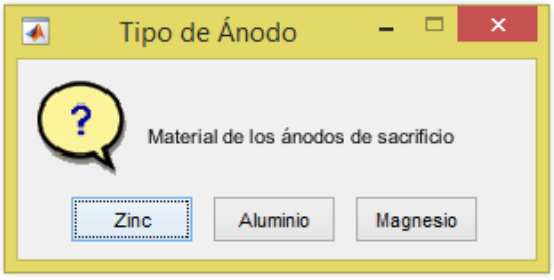

Figura 3.4. Ventana emergente para la elección del tipo de ánodo usado.

Luego aparece otra ventana emergente (figura 3.5), esta vez para especificarle al programa el tipo de terreno donde se encuentra el sistema; de esta manera, se tiene en cuenta este factor en el futuro establecimiento de la densidad de corriente típica usada en el cálculo.

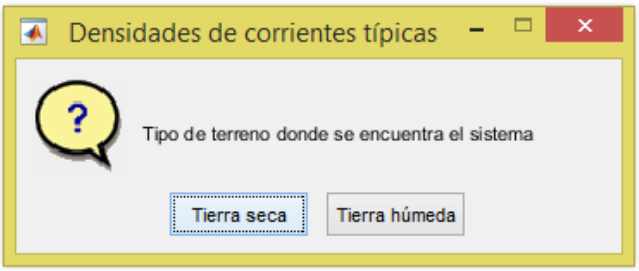

Figura 3.5. Ventana emergente para la elección del tipo de terreno.

Finalmente, en lo que refiere a la introducción de datos y elección de factores decisivos, aparece la última ventana emergente, esta vez, en forma de panel de introducción de datos usada para introducir las especificaciones de los ánodos. Esta ventana se puede apreciar en la figura 3.6.

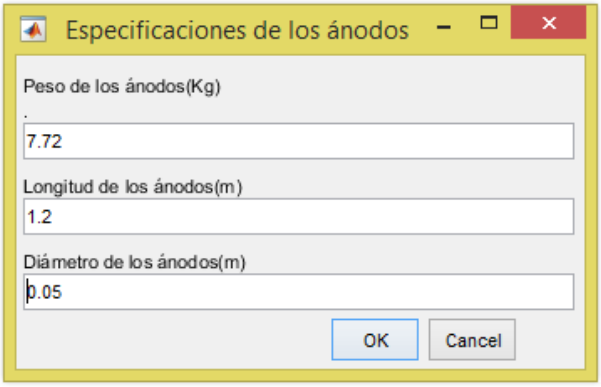

Figura 3.6. Ventana emergente para introducir las especificaciones de los ánodos.

Resultados

Cuando se realizan los cálculos correspondientes al método seleccionado, el usuario puede acceder a los resultados técnicos, gráficos y económicos mediante el menú ´´Resultados´´ (figura 3.7). Los resultados técnicos brindan especificaciones que se deben implementar en la proyección del sistema de protección, por ejemplo, cantidad y posición de electrodos de protección (o ánodos de sacrificio), tiempo de vida de los ánodos, corriente necesaria en la protección, capacidad del transformador de servicio de la subestación que alimenta el rectificador, etc. Por otra parte, los resultados gráficos brindan información visual con respecto a la ubicación de los ánodos de sacrificio en el sistema, permitiendo al usuario lograr una acertada precisión a la hora de colocarlos. Los resultados económicos muestran un balance general del costo de la instalación a partir de valores de costo por unidad, introducidos previamente; se debe precisar que el programa no facilita funciones de optimización técnico-económica según el empleo del método por corriente impresa.

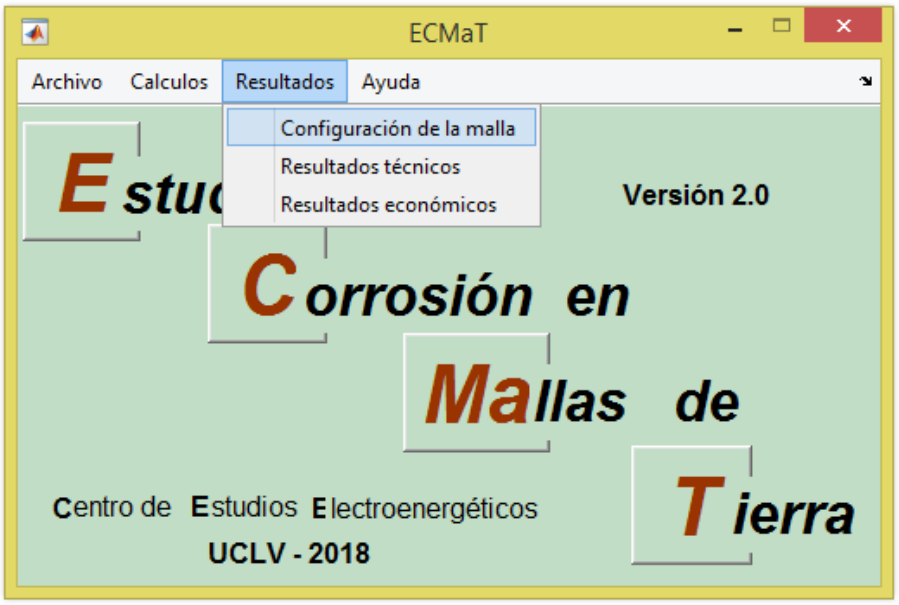

Figura 3.8. Acceso a la visualización de resultados.

Trabajo con archivos y ayuda

El programa cuenta con una serie de facilidades que hacen más eficiente su empleo, por ejemplo, el trabajo básico con archivos en entorno de Windows (Cargar y Guardar). Según la figura 3.9, puede observarse como se accede a las funciones básicas del trabajo con archivos desde la interfaz gráfica principal.

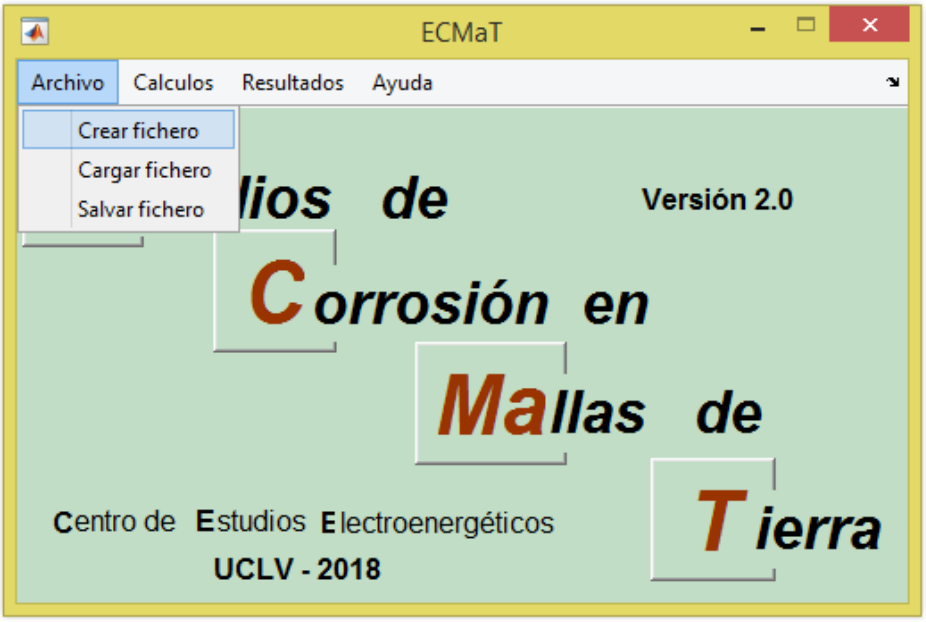

Figura 3.9. Funciones básicas del trabajo con archivos.

Teniendo en cuenta que el usuario puede presentar alguna duda en el manejo del programa, se ofrece un menú de ayuda (figura 3.10) con el cual el usuario puede acceder a información básica mediante una guía de usuario, además, puede ponerse en contacto directo con sus creadores en el Centro de Estudios Electroenergéticos mediante correo electrónico.

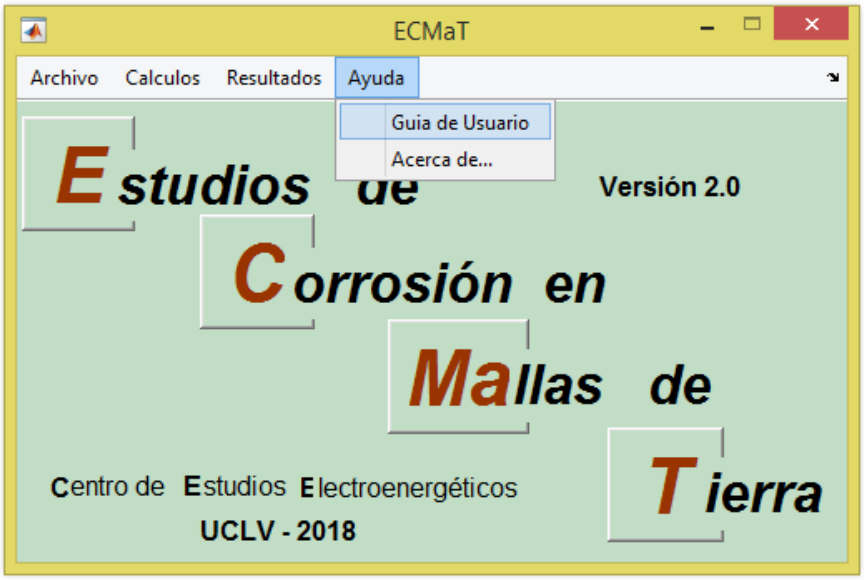

Figura 3.10. Menú de ayuda brindado al usuario.

3.2 Metodología de cálculo empleado

Los cálculos utilizados emplean el uso de ecuaciones empíricas las cuales proveen la información necesaria para el diseño de los sistemas de protección catódica haciendo referencia al tiempo de vida útil de la estructura a proteger. Dichos cálculos también incluyen la selección de la capacidad de la fuente de corriente directa a partir de un rectificador (incluyendo la intensidad de corriente necesaria). Especialmente para el diseño de un sistema de protección mediante corriente impresa, se deben considerar los aspectos que se desarrollan en los siguientes epígrafes.

3.2.1 Vida útil

La vida útil del ánodo depende tanto de su material como de su peso. Los datos del comportamiento del ánodo instalado, deben usarse para calcular el valor probable de consumo. El tiempo de vida del ánodo se determina con la expresión:

$$VidaUtil = \frac{U}{I * R * P * C}$$

Donde:

C= Capacidad de corriente (A-año/kg).

P= Peso del ánodo (kg).

R= Rendimiento (%) (tabla 3.1).

U= Factor de utilización (0.85).

I= Entrega de corriente del ánodo en (A).

Tabla 3.1. Capacidad de corriente teórica y rendimiento según el tipo de ánodo.

Metal anódico	Capacidad corriente teórica (A-año/kg)	Rendimiento %
Zinc (Zn)	0.094	95
Aluminio (Al)	0.340	90
Magnesio (Mg)	0.251	50

3.2.2 Corriente necesaria

Esta corriente es la que el rectificador debe proveer al sistema de protección, su expresión matemática se describe a continuación:

$$I = \frac{A * Id}{1000}$$

Donde:

I= Corriente requerida (A).

A= Área total del sistema de puesta a tierra (m^2).

Id= Densidad de corriente requerida en (mA/m^2).

La densidad de corriente requerida teniendo en cuenta el tipo de terreno se puede apreciar a continuación en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Densidad de corriente requerida (Id) según el tipo de terreno.

Tipo de terreno	Id (mA/m^2)
Tierra seca	10.76 - 21.52
Tierra con agua	21.52 - 53.82
Agua sin corriente	10.76 – 53.82
Agua de mar con corriente	32.29 – 129.17
Agua de mar sin corriente	107.6 - 2691

3.2.3 Voltaje de salida en el rectificador

Dicho voltaje se calcula mediante la expresión:

$$V = \mathrm{Rt} * \mathrm{I}$$

Donde:

V= Voltaje (C.D) de salida en el rectificador (V).

Rt= Resistencia total del circuito (Ω).

I= Intensidad de corriente requerida (A).

La resistencia total del circuito se calcula según:

$$\mathrm{Rt} = \mathrm{Rc} + \mathrm{Re} + \mathrm{Rg}$$

Donde:

Rc= Resistencia de los conductores del circuito, se calcula conociendo el calibre y longitud de dichos conductores.

Re= Resistencia de contacto a tierra de la estructura por proteger. Su valor puede obtenerse directamente en el campo y es igual al cambio de potencial obtenido en la estructura, con la corriente de prueba dividido entre esta.

Rg= Resistencia del dispositivo de tierra o cama anódica; puede ser Rv o Rh, es la que tiene mayor influencia en el valor de Rt. Su procedimiento de cálculo se describe a continuación atendiendo a la disposición de los ánodos en el terreno.

Teniendo en cuenta un solo ánodo en posición vertical:

$$Rg = \frac{0.00159\rho * 2.3 * \log(\frac{8 * L}{d})}{L}$$

Donde:

Rv= Resistencia de un ánodo vertical a tierra (Ω).

ρ= Resistividad del suelo o del material de relleno (Ω·m).

L= Longitud del ánodo (m).

d= Diámetro del ánodo (m).

Teniendo en cuenta varios ánodos en posición vertical y en paralelo:

$$Rg = \frac{0.00159\rho}{L}(2.3 * \log\left(\frac{8 * L}{d}\right) - 1 + \frac{2 * L}{s} * (2.3 * (log 0.656 * N)))$$

Donde:

Rv= Resistencia de la cama anódica en posición vertical, conectadas en paralelo (Ω).

ρ= Resistividad del suelo o del material de relleno (Ω·m).

L= Longitud del ánodo (m).

d= Diámetro del ánodo (m).

s= Espaciamiento entre ánodos (m).

N= Número de ánodos en paralelo.

3.2.4 Capacidad del transformador

El transformador monofásico (de servicio en la subestación) es el encargado de suministrar energía al rectificador que alimenta el sistema de protección. La expresión matemática para determinar su capacidad (kVA) se detalla a continuación:

$$Capacidad = \frac{V * I}{E * F * 1000}$$

Donde:

V= Voltaje del rectificador (V).

I= Intensidad de la corriente proveniente del rectificador (A).

E= Eficiencia del rectificador (%).

F= Factor de potencia del transformador (se toma 0.85).

3.3 Ejemplo de cálculo empleando ECMaT 2.0

Se pretende proteger contra la corrosión mediante el método de la corriente impresa, una malla de tierra de una subestación inmersa en un terreno con una resistividad de 120 Ω·m; posee conductores de diámetro de 0.01326 m y el espesor de la capa superficial de 0.1 m. La malla está constituida solo por electrodos horizontales. La figura 3.11 muestra la distribución de los electrodos en la malla a proteger.

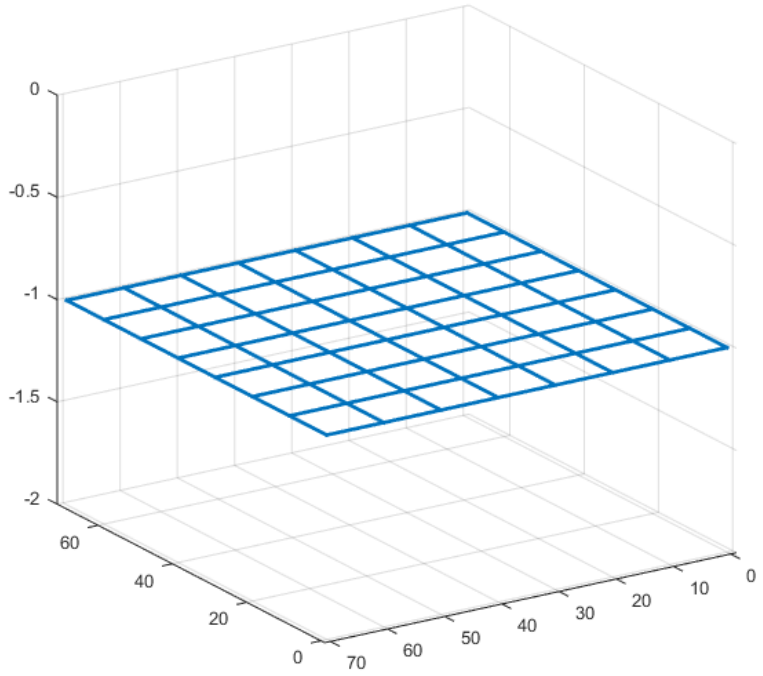

Figura 3.11. Distribución de los electrodos en la malla del sistema de puesta a tierra.

Resultados técnicos

Se muestran los resultados técnicos utilizando como material anódico Zinc en tierra seca en la Figura 3.12 y en tierra húmeda en la Figura 3.13.

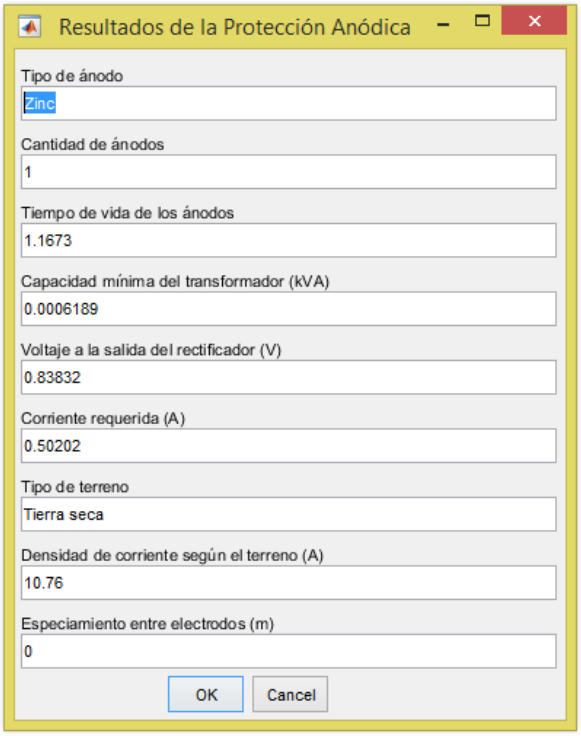

Figura 3.12. Resultados técnicos utilizando como material anódico Zinc en tierra seca.

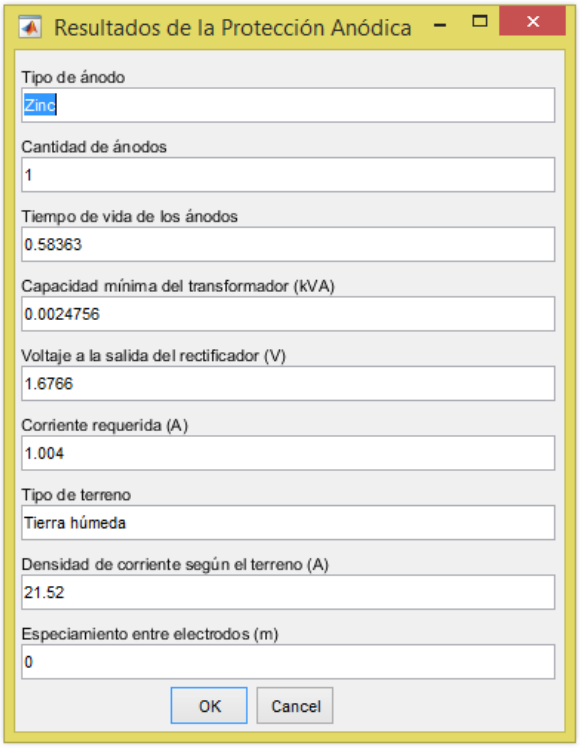

Figura 3.13. Resultados técnicos utilizando como material anódico Zinc en tierra húmeda.

Configuración del sistema protegido

En la Figura 3.14 se muestra la configuración del sistema protegido utilizando el Zinc como material anódico.

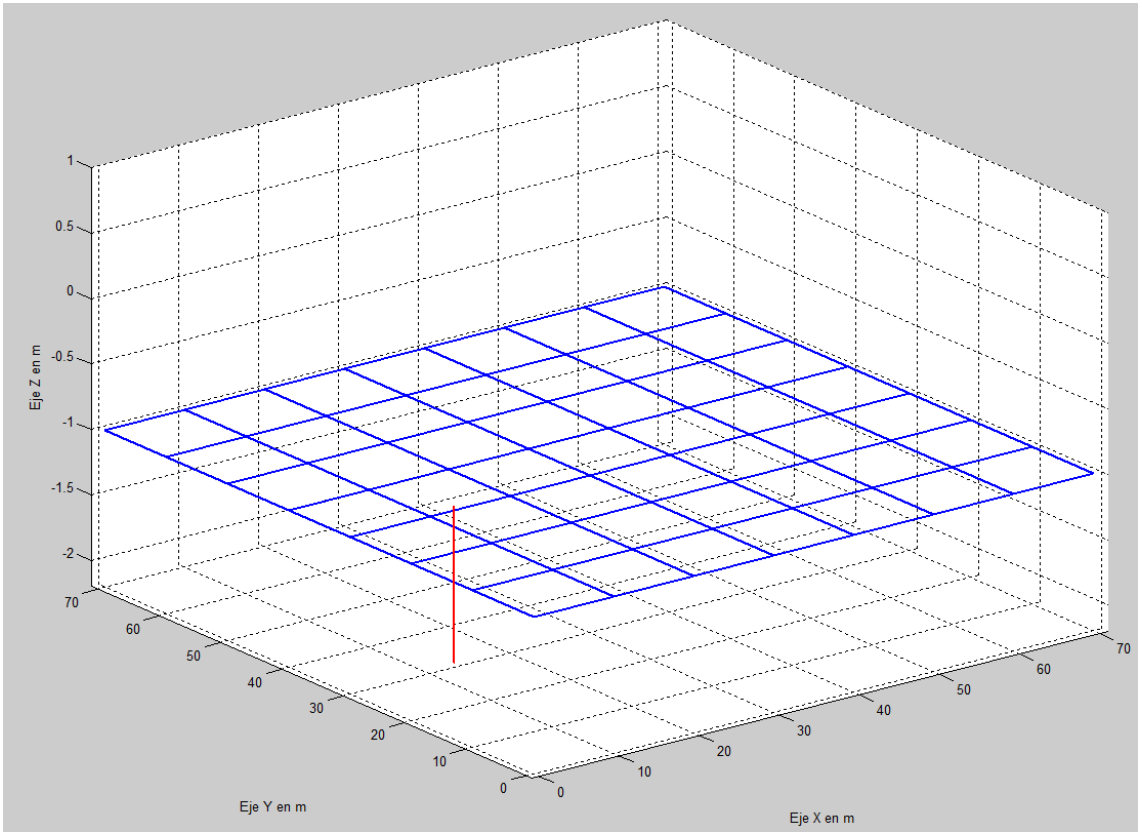

Figura 3.14. Configuración del sistema protegido.

Resultados económicos

En las figuras 3.15 y 3.16 se puede observar en proceso de introducción de costos y el análisis económico de la inversión.

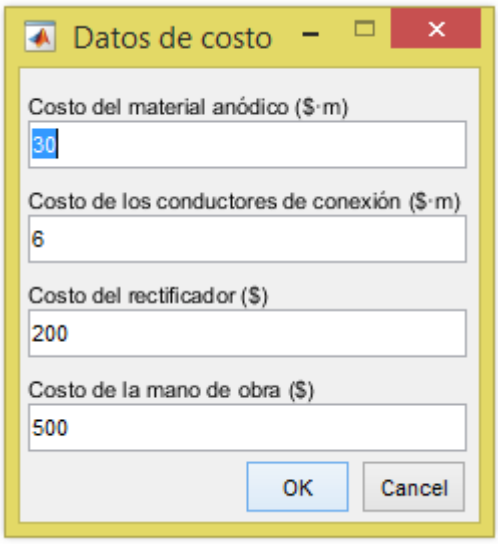

Figura 3.15. Datos de costo.

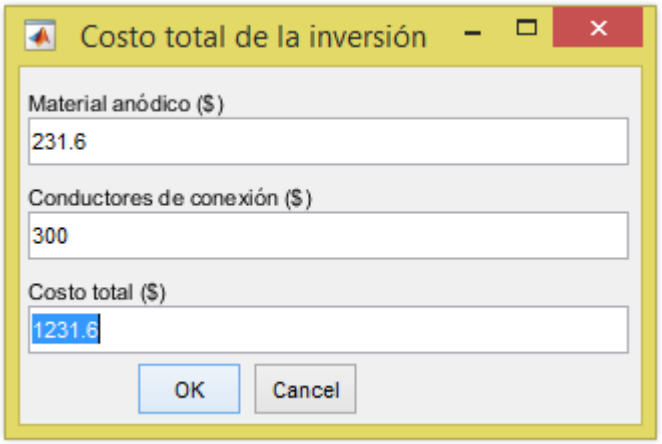

Figura 3.16. Costo total de la inversión.

Conclusiones del capítulo

El uso de aplicaciones computacionales facilita el empleo de métodos matemáticos con determinados niveles de complejidad, los cuales requieren por parte del usuario cierto nivel de destreza y conocimientos específicos según la materia. El programa ECMaT 2.0 está diseñado en un ambiente gráfico acorde a las habilidades básicas computacionales en el entorno de Windows, al alcance de personal calificado, profesores y estudiantes. La versión 2.0 incluye estudios de protección contra la corrosión que no poseía el programa, ampliando su uso en determinadas situaciones que requieran el empleo de métodos específicos enfocados en esta materia

CONCLUSIONES

Con la culminación de este trabajo de diploma se arribó a las siguientes conclusiones:

- El método de protección catódica por corriente impresa es una opción que se puede considerar de manera factible, para combatir el efecto de la corrosión en sistemas de puesta a tierra; su particularidad, es que necesita de equipamiento electrónico adicional para lograr su funcionamiento.
- El cálculo de los parámetros de diseño de un rectificador, garantiza al sistema de protección un correcto funcionamiento y no afecta los resultados esperados en la proyección del mismo, como, por ejemplo, el tiempo de vida del ánodo.
- La capacidad del transformador de servicio ubicado en subestaciones, está por encima de la capacidad mínima necesaria para alimentar el sistema de protección. La corriente y el voltaje requeridos, son lo suficientemente pequeños como para no proponer cambios en los transformadores de servicio, no obstante, el programa tiene en cuenta este criterio para cuando exista un sobredimensionamiento del sistema a proteger.
- El programa ECMaT 2.0 es una herramienta computacional actualizada después de la implementación del método de protección catódica por corriente impresa. Dicho programa está diseñando para proyectar sistemas de protección contra corrosión de manera integral, permitiendo al usuario poder elegir la mejor variante de acuerdo a su criterio y a las normas establecidas según el objeto de estudio.
- El empleo del programa en estudios de protección contra la corrosión en sistemas de puesta a tierra, demuestra su validez y garantiza resultados adecuados para la futura proyección del sistema de protección correspondiente.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda incluir el programa creado en el paquete de aplicaciones computacionales del CEE (Centro de Estudios Electroenergéticos), con el objetivo de incrementar la formación profesional en estudiantes de pregrado, especialmente en la asignatura Sistemas de Puesta a Tierra.

- Se propone el uso del programa en la UNE, enfocado especialmente en los estudios de funcionamiento y control de sistemas de puesta a tierra en subestaciones de potencia ya creados, los cuales pueden necesitar protección contra la corrosión.

REFERENCIAS BIBIOGRÁFICAS

[1] J. C. RODRÍGUEZ y N. A. P. CASALLAS, «Programa Para El Diseño De Sistemas De Protección Catódica Con Ánodos De Sacrificio».2005

[2] M. P. Idrovo Naranjo, «Estudio de corrosión en mallas de tierra», EPN, Quito, 2001.

[3] M. J. Herrera-Núuñez, A. A. Torres-Acosta, M. C. Alonso, J. T. Pérez-Quiroz, y M. Martínez-Madrid, «Effect of Amino Alcohol-Based Corrosion Inhibitor Addition on Galvanized Reinforcements in Alkaline Solutions», *Corrosion*, vol. 65, n.º 9, pp. 571-577, 2009.

[4] Y. F. de Gil, S. Camero, J. L. Prin, y R. Réquiz, «Evaluación de la corrosión inducida por bacteria sulfato reductora en un acero inoxidable 316L», *Rev. Latinoam. Metal. Mater.*, vol. 28, n.º 1, pp. 60-72, 2008.

[5] J.-F. Chen y W. F. Bogaerts, «Electrochemical emission spectroscopy for monitoring uniform and localized corrosion», *Corrosion*, vol. 52, n.º 10, pp. 753-759, 1996.

[6] D. C. Giancoli, *Física general*. Prentice-Hall Hispanoamericana, 1991.

[7] S. L. Figueroa Ramírez, *Encuentro con la anencefalia en contextos de pobreza y riesgo*. Mexicali: Universidad Autónoma de Baja California, 2009.

[8] M. L. Cerón y A. Soto–Bubert, *Elementos de Electroquímica*. 2004.

[9] J. G. Carriazo, M. U. Pérez, y O. H. Fandiño, «Diagramas de predominancia, de Frost y de Pourbaix: tres contextos para desarrollar competencias en procesos de óxido-reducción», *Sci. Tech.*, vol. 1, n.º 34, 2007.

[10] J. A. G. Fernández, *Control de la corrosión: estudio y medida por técnicas electroquímicas*. Editorial CSIC-CSIC Press, 1989.

[11] SISTEMA de protección catódica con corriente impresa. Disponible en: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_8.htm

[12] F. MÜLLER FILHO, L. PEREIRA DA SILVA, A. BARIA, y A. MIOCQUE, «Cathodic Protection: Conventional shallow groundbed vs deep groundbed anodes», *Mater. Perform.*, vol. 39, n.º 10, pp. 22-25, 2000.

[13] R. O. Bracco, «PROTECCIÓN CATÓDICA: EL ÁNODO POLIMÉRICO CONTINUO».2008

[14] J. Olaya-Flórez y M. M. Torres-Luque, «Corrosion resistance of organic coatings through electrochemical impedance spectroscopy», *Ing. Univ.*, vol. 16, n.º 1, pp. 43-58, 2012.

[15] D. Vergara y J. Toribio, «Influencia de la anisotropía microestructural de los aceros de pretensado en el aspecto fractográfico de la zona TTS», en *Anales de Mecánica de la Fractura*, 2009, vol. 26, pp. 325-330.

[16] D. L. Leng, «Zinc mesh cathodic protection systems», *Mater. Perform.*, vol. 39, n.º 8, pp. 28-33, 2000.