

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electrónica



TRABAJO DE DIPLOMA

**Protección contra la corrosión mallas de tierra de
subestaciones eléctricas.**

Autor: Yenisey Santos Abreu

Tutor: Dr. Ángel Valcárcel Rojas

Santa Clara

Curso 2013-2014

"Año 56 de la Revolución"



Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electrónica



TRABAJO DE DIPLOMA

**Protección contra la corrosión mallas de tierra de
subestaciones eléctricas.**

Autor: Yenisey Santos Abreu

Email: yenisey@uclv.edu.cu

Tutor: Dr Ángel Valcárcel Rojas

Email: valca@uclv.edu.cu

Santa Clara

2013-2014

"Año 56 de la Revolución "





Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de
Departamento donde se
defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

Comprender las cosas que nos rodea es la mejor preparación para comprender las cosas que están más allá.

DEDICATORIA

Quiero dedicar este proyecto a todos los que de una forma u otra han contribuido con su ayuda para poder salir adelante. En especial a mis padres y mi hermano que me han apoyado en todo momento, a mis compañeros de estudio a mis amigos, a mi tutor por brindarme su ayuda y orientación cada vez que lo necesitaba, y a todos los profesores que nos han formado para llegar hasta aquí.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor Ángel Valcárcel Rojas. A mis padres por estar siempre a mi lado, a todas mis amistades, mis compañeros de trabajo de traviesa, José Ramón, Ariel, Molina que con cada duda me ayudaron y no tuve queja de ellos. A Darilis y Portal que en estos años siempre se portaron muy bien conmigo. En general a todos los que de una forma u otra me ayudaron y se mantuvieron siempre a mi lado para que al fin pudiera lograr mi objetivo.

TAREAS TÉCNICAS

1. Realizar un análisis crítico de la bibliografía relacionada con la protección de instalaciones soterradas contra la corrosión de los suelos.
2. Obtener una metodología que permita determinar el sistema de protección catódica con ánodo de sacrificio necesario para proteger una malla de tierra de una subestación eléctrica.
3. Desarrollar en Matlab una función con la metodología implementada e incorporarla al programa PAST.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

Las mallas de tierra de las subestaciones eléctricas son elementos del sistema que se encuentran sometidos a la acción corrosiva de los suelos. Existen varios métodos para la protección de estas instalaciones contra este fenómeno inevitable y en algunos casos extremadamente activo y capaz de poner fuera de parámetros a las subestaciones con el consiguiente peligro para las personas, el equipamiento y la operación satisfactoria de los medios de protección. Este trabajo se ha realizado con el objetivo de desarrollar un programa que permita diseñar el sistema de protección catódica necesario para garantizar una vida útil prolongada y el adecuado funcionamiento de la malla de tierra de subestaciones eléctricas de potencia. Los métodos implementados son el de protección catódica por ánodo de sacrificio. Este método fueron programado en MatLab e incorporados al programa PAST, desarrollado el Centro de Estudio Electro energéticos de la Universidad Central de Las Villas.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
TAREAS TÉCNICAS.....	iv
RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 1 “Generalidades sobre corrosión”	4
1.1. FUNDAMENTOS DE LA CORROSIÓN.....	4
1.1.1 DEFINICIÓN.	4
1.1.2 FORMAS EN QUE SE PRESENTA LA CORROSIÓN.....	4
1.1.3 CAUSAS POR LAS QUE SE PRODUCE LA CORROSIÓN EN LAS MALLAS DE TIERRA.....	5
1.1.4 CORROSIÓN POR ATAQUE DIRECTO.....	6
1.1.5 FUNDAMENTOS DE LA CORROSIÓN.....	6
1.1.6 MECANISMO BÁSICO DE LA CORROSIÓN.	6
1.1.7 PROTECCIÓN CATÓDICA.....	10
1.1.8 PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPUESTA.....	11

1.1.9 FUENTES DE CORRIENTE.	14
1.1.10 OTRAS FUENTES DE CORRIENTE.	14
Capítulo 2. PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS DE SACRIFICIO.	15
2.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS ANODOS DE SACRIFICIO.....	17
2.1.2. METALES ANÓDICOS.	18
2.1.3. MAGNESIO.....	18
2.1.4. Zinc.	21
2.1.5. ALUMINIO.....	22
2.2. RELLENO ANÓDICO.	23
2.2.1. RELLENO BACKFILL.....	24
2.2.2. VIDA DEL ÁNODO.	25
2.2.3. CONDUCTORES ELÉCTRICOS.....	26
2.2.4. CONECTORES ELÉCTRICOS.	26
2.2.5. RESISTENCIAS ELÉCTRICAS.	27
2.2.6. CAMBIOS EN LOS REQUERIMIENTOS DE CORRIENTE.....	27
2.2.7. CRITERIOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA.	27
2.2.8. REQUERIMIENTOS DE CORRIENTE DE PROTECCIÓN.....	29
2.2.9. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....	30
Capítulo 3. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROGRAMA.	32
3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PROGRAMA.....	32
3.2. PARÁMETROS DE DISEÑO.	33
3.3. ENTRADAS INICIALES DEL PROGRAMA.....	33
3.3.1. MÓDULO DE CÁLCULO PARA OTRAS ESTRUCTURAS.....	33

3.3.2. MATERIAL DE LA ESTRUCTURA A PROTEGER.	34
3.3.3. ÁREA DE LA ESTRUCTURA A PROTEGER.	34
3.3.4. VIDA ÚTIL REQUERIDA DEL SISTEMA.	34
3.3.5. RESISTIVIDAD DEL MEDIO (ρ).	35
3.3.6. CONDUCTORES ELÉCTRICOS Y ESPACIAMIENTO ENTRE ÁNODOS.	35
3.3.7. DENSIDAD DE CORRIENTE.....	36
3.3.8. SELECCIÓN DEL MATERIAL ANÓDICO.	36
3.3.9. DETERMINACIÓN DE REQUERIMIENTOS TOTALES DE CORRIENTE.	39
3.3.10. INICIALIZACIÓN DEL CÁLCULO.	39
3.3.11. SELECCIÓN DEL MATERIAL ANÓDICO Y SU TAMAÑO.	40
3.3.12. CÁLCULO DEL PESO DEL MATERIAL ANÓDICO POR LECHO.....	40
3.3.13. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA TOTAL DEL CONDUCTOR ELÉCTRICO.....	40
3.3.14. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA ÁNODO-SUELO.....	41
3.3.15 CÁLCULO DE LA CORRIENTE DRENADA POR LA CAMA ANÓDICA....	43
3.3.16 CÁLCULO DEL TIEMPO DE VIDA DEL LECHO ANÓDICO.	44
3.3.17 CÁLCULO DEL NÚMERO DE LECHOS.....	44
3.3.18. CÁLCULO DEL ESPACIAMIENTO TEÓRICO ENTRE LECHOS ANÓDICOS.....	45
3.3.19 CARACTERÍSTICAS DE LA FUNCIÓN INCORPORADA EN EL PAST 45	
3.3.20 EJEMPLOS DE CÁLCULO	48
CONCLUSIONES	51
RECOMENDACIONES	52

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
---------------------------------	----

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la electrotecnia a nivel mundial y en Cuba en particular ha motivado la construcción de una gran cantidad de subestaciones eléctricas de potencia, con sus respectivas mallas de tierra; considerando las características propias de Cuba, donde muchas de estas instalaciones se construyen muy cerca del mar, la corrosión suele ser muy alta por lo que se hace vital la presencia de un control adecuado de la misma; dentro de los métodos utilizados para ello el más apropiado es la protección catódica.

La técnica de protección catódica la inició Sir Humprey 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.

Con el fin de reducir al mínimo los cálculos de diseño se pueden implementar ayudas 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 más recomendable es crear programas de aplicación general que permitan integrar las ecuaciones anteriormente descritas con los criterios existentes; considerando esto se desarrolló y elaboró un programa para el diseño de sistemas de protección

catódica con ánodos de sacrificio y por corriente impuesta, buscando que los sistemas dimensionados presenten un mayor nivel de análisis, pudiendo ser optimizados.

Luego de realizada la Revisión Bibliográfica, teniendo en cuenta las posibles respuestas a la problemática científica y después de fomentado el marco teórico; se plantea la siguiente hipótesis de investigación:

Hipótesis: La acción corrosiva de los suelos degrada considerablemente las características eléctricas de las mallas de tierra de las subestaciones eléctricas, fundamentalmente su resistencia y los potenciales de paso y contacto bajo condiciones de corto circuito, lo que hace necesario su protección catódica, con el objetivo de incrementar su vida útil y garantizar su correcto funcionamiento.

Dentro de este contexto, se pretende con el trabajo de investigación, cumplir con los siguientes objetivos:

Objetivo general:

Desarrollar un programa que permita diseñar el sistema de protección catódica necesario para garantizar una vida útil prolongada y el adecuado funcionamiento de la malla de tierra de subestaciones eléctricas de potencia, sometidas a la acción de terrenos altamente corrosivos.

Objetivos específicos:

1. Determinar los fundamentos teóricos sobre corrosión y los métodos que se utilizan internacionalmente para el diseño de sistemas de protección catódica.
2. Desarrollar una metodología para diseñar sistemas de protección catódica de subestaciones eléctricas de potencia.

3. Programar en MatLab una función con la metodología obtenida e incorporarla al programa PAST.
4. Evaluar con varios ejemplos las potencialidades de la metodología implementada.

El trabajo está dividido en tres capítulos, en el primero se presentan los fundamentos teóricos de la corrosión y la protección catódica. En el segundo capítulo se trata el tema de la protección catódica con ánodos de sacrificio y por corriente impresa incluyendo los criterios de diseño utilizados. En el tercer capítulo se da una descripción general del programa (información requerida, proceso de cálculo, y estructuración), e incluyen diseños de prototipos que muestran la aplicación del programa.

Capítulo 1 “Generalidades sobre corrosión”

1.1. FUNDAMENTOS DE LA CORROSIÓN.

1.1.1 DEFINICIÓN.

La corrosión puede definirse como la degradación de un metal por la interacción con el medio que lo rodea. De acuerdo con el tipo de interacción la corrosión será química o electroquímica; la primera implica la reacción del metal con un medio no iónico y se presenta a elevadas temperaturas; la segunda 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, a éste grupo pertenecen la corrosión atmosférica, la corrosión en soluciones salinas, en agua de mar, en soluciones ácidas y la corrosión en suelos entre otras. En cualquiera de los casos se presenta una transformación del metal a su forma nativa como mineral. La corrosión en sentido más amplio es un fenómeno natural, por medio del cual los sistemas químicos expresan su tendencia hacia un estado de equilibrio estable.(Rodríguez, 2005)

1.1.2 FORMAS EN QUE SE PRESENTA LA CORROSIÓN.

La superficie de un metal se puede corroer de diversas formas:

Uniforme: Un metal localizado en un medio corrosivo homogéneo se corroerá generalmente de un modo uniforme, es decir, la pérdida de espesor será idéntica en cada punto de la superficie del material.

Localizada: Esta forma de corrosión se dará en los casos ya estudiados de corrosión de tubería enterrada, por formación de pilas, por disimilitud de electrolitos, por corrosión bacteriana y por corrientes vagabundas.

Picaduras: Se caracteriza por la formación de picaduras profundas de pequeño diámetro, pudiendo llegarse a la perforación rápida de tuberías de bastante espesor. Entre otras causas, pueden ser originadas por poros en el revestimiento de la tubería.

Corrosión 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).

1.1.3 CAUSAS POR LAS QUE SE PRODUCE LA 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.(Agulleiro, 2006)

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.

1.1.4 CORROSIÓN POR ATAQUE DIRECTO.

Corrosión Química: La corrosión química se caracteriza por que los electrones cedidos por el ion del metal son captados en el mismo sitio en que este se formó, es decir, no hay un desplazamiento de electrones en el interior del metal.

Corrosión Electroquímica: En las pilas electroquímicas, en el ánodo se origina un flujo de electrones (corriente eléctrica) que se desplaza por todo el circuito eléctrico hasta alcanzar el cátodo donde los electrones son captados por iones del electrolito.

1.1.5 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.

1.1.6 MECANISMO BÁSICO 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 éstas 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:



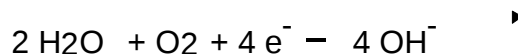
Como etapa posterior a ésta reacción el ion metálico pasa al estado mineral de menor potencial, generalmente a óxidos.

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

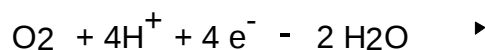
- Desprendimiento de hidrógeno en medios acuosos:



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



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



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, como la presentada en la Tabla 1.1, donde los metales con menores potenciales se denominan activos o anódicos y se oxidan cuando se encuentran unidos a metales de mayor potencial. (Agulleiro, 2006)

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 proporcional a la cantidad de electricidad que ha circulado por él; según la ley de Faraday. (Cefracor, 2004)

Tabla 1.1 Serie galvánica práctica (suelos neutrales y agua).

METAL	POTENCIAL (V)¹
Magnesio comercialmente puro.	-1.75
Aleación de magnesio (6% Al, 3% Zn, 0.15% Mn).	-1.6
Zinc.	-1.1
Aleación de Aluminio (5% Zn).	-1.0
Aluminio comercialmente puro.	-0.8
Acero medio.	-0.5 a -0.8
Hierro Dulce.	-0.2 a -0.5
Hierro fundido.	-0.5
Plomo.	-0.5
Acero en concreto.	-0.2
Cobre, latón y bronce.	-0.2
Hierro fundido alto silicio.	-0.2
Acero inoxidable.	-0.2
Carbón, grafito y coque.	-0.3

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. (Faragaus, 2007)

1.1.7 PROTECCIÓN CATÓDICA.

Existen diversas formas de prevenir la corrosión que dependen de la naturaleza de la misma; la prevención de la corrosión puede llevarse a cabo en el diseño de los equipos, con uso de técnicas electroquímicas o por acción sobre el medio de trabajo.

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 corroe; de acuerdo con la Figura 1.1 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. (Giudice, 2008)

Otra forma de observar el proceso de corrosión es mediante el análisis del diagrama de Evans (Figura 1.2), 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 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} .

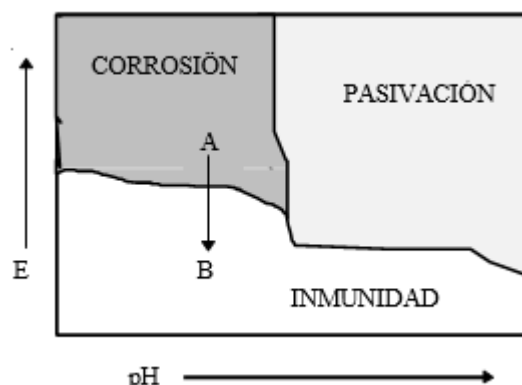


FIGURA 1.1 Diagrama general de Pourbaix.

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. (Giudice, 2008)

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.

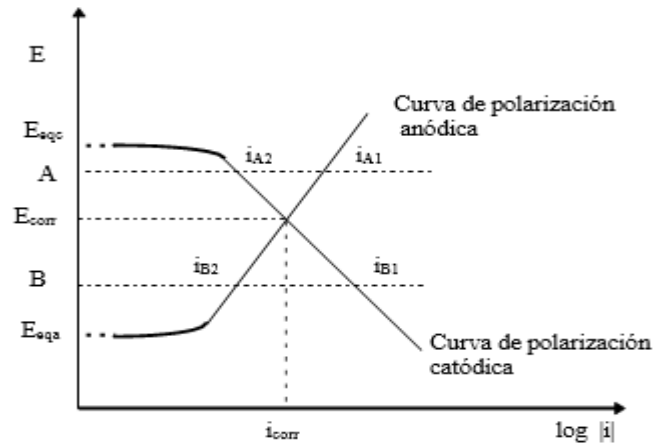


FIGURA 1.2 Diagrama general de Evans para un sistema de corrosión.

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. (Giudice, 2008)

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

$$I = \frac{E_a - E_c}{R} \quad (1)$$

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. (Group, 2011)

Para la aplicación de un sistema de protección catódica existen dos técnicas: el método galvánico o con ánodos de sacrificio, y el método por corriente impresa. En la protección catódica por corriente impresa 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 impresa utiliza ánodos, en cuanto sea posible inertes tanto en agua como en suelo, una instalación típica de corriente impresa puede observarse en la Figura 1.3.

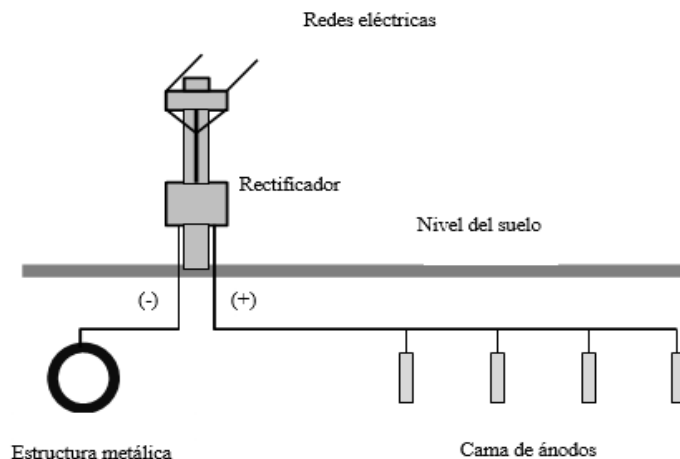


FIGURA 1.3 Protección catódica por corriente impresa.

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 1.2

Tabla 1.2 Ventajas y desventajas de los sistemas de protección catódica.

Ánodos de sacrificio	Corriente impuesta
VENTAJAS	
Fácil de instalar.	Sirve para áreas grandes.
No requieren potencia externa.	Aplicables en cualquier medio.
Voltaje de aplicación fijo.	Útil en diseño de cualquier requerimiento de corriente mayor de 5 amperios
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.

1.1.8 PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPUESTA.

Cuando es insuficiente el potencial generado por ánodos reactivos y es importante la extensión de la red que ha de protegerse, ha de recurrirse al empleo de la denominada corriente impuesta.

Esta corriente, que es continua, se obtiene a partir de la red de baja tensión en corriente alterna (380, 220 ó 125 voltios) transformada a una tensión más baja y rectificada. (Gummow, 2001)

Todo este proceso se realiza en unos aparatos llamados transforrectificadores (también llama-dos estaciones de protección catódica o EPC), cuyo polo positivo va unido a un lecho dispersor (Ánodo), y su polo negativo conectado a la estructura que se va a proteger (cátodo) hallándose todo ello (ánodo y cátodo) inmerso en un electrolito tierra.

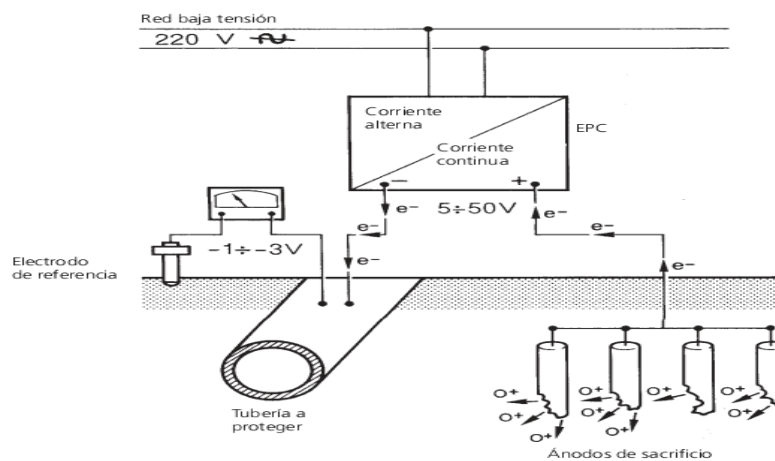


FIGURA 1.4 Esquema de protección catódica por corriente impuesta.

El funcionamiento del sistema es el siguiente: la corriente que sale por el polo positivo del transforrectificador pasa al suelo (electrolito) a través del lecho dispersor formado por uno o varios ánodos, y de ahí a la tubería (cátodo), a través de la cual retorna hacia el polo negativo de dicho transforrectificador, cerrándose el circuito eléctrico.

De esta forma se crea una diferencia de potencial entre la conducción y los ánodos, la cual normalmente varía entre 5 y 50 voltios, dando lugar al paso de una corriente determinada que a su vez hará que la conducción alcance el nivel de potencial de protección preestablecido respecto a su electrolito, es decir, el terreno. (J., 2001)

En este tipo de protección el material anódico puede ser cualquier metal, ya que se le fuerza a que se comporte como ánodo. En la práctica, por razones económicas y de rendimiento, los materiales principalmente empleados son chatarra de hierro o raíles, grafito y ferrosilicio. Tiene considerable importancia el tipo de terreno donde se hayan de enterrar los ánodos para la elección de su tipo. (J., 2001)

Electrodo de referencia cobre/sulfato de cobre (Cu/Cu SO₄).

Este electrodo es en realidad media pila formada por una barra de cobre sumergida en una solución saturada de sulfato de cobre. Todo ello se encuentra en un recipiente cilíndrico cerrado por un lado por un tapón poroso, que es el que se pone en contacto con el suelo, saliendo por el otro lado el cable de conexión al voltímetro. Ver figura 1.5.

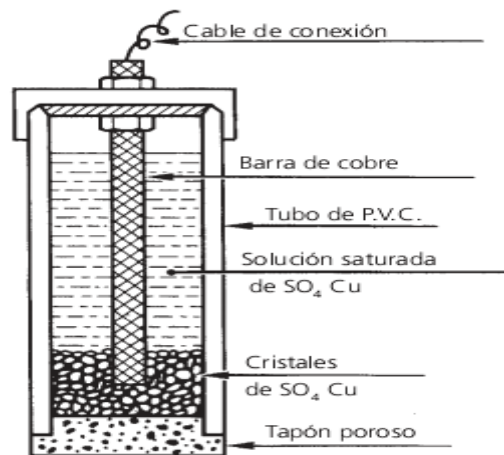


FIGURA 1.5. Electrodo de referencia cobre/sulfato.

Existen otros electrodos de referencia, pero el más empleado es de Cu/Cu SO₄.

Cuando se mide el potencial de la conducción respecto al electrodo de referencia, se forma una pila electroquímica completa, uno de cuyos electrodos es el de referencia y el otro la tubería, actuando el suelo de electrolito y cerrándose el circuito exterior a través de los cables y el voltímetro.

1.1.9 FUENTES DE CORRIENTE.

Las más utilizadas son los rectificadores, los cuales permiten el paso de la corriente en un sólo sentido. Es un mecanismo de transformación de corriente alterna a corriente continua de bajo voltaje, mediante la ayuda de diodos de rectificación, comúnmente de selenio o silicio y sistemas de adecuación regulable manual y/o automática, a fin de controlar las características de la corriente según las necesidades del sistema a proteger. (Lambert, 2004)

Las condiciones que el diseñador debe estimar para escoger un rectificador son:

1. Características de la corriente alterna disponible en el área (voltios, ciclos, fases).
2. Requerimiento máximo de salida en CD (amperios y voltios).
3. Sistemas de montaje: sobre el piso, empotrado en pared, en un poste.
4. Tipos de elementos de rectificación: selenio, silicio.
5. Máxima temperatura de operación.
6. Sistema de seguridad: alarma, breaker, etc.
7. Instrumentación: voltímetros y amperímetros, sistemas de regulación.

1.1.10 OTRAS FUENTES DE CORRIENTE.

Es posible que habiendo decidido utilizar el sistema de corriente impresa no se disponga en la zona de líneas de distribución de corriente eléctrica, por lo que sería conveniente analizar la posibilidad de hacer uso de fuentes como:

- Baterías, de limitada aplicación por su bajo drenaje de corriente y vida limitada.
- Motores generadores.
- Generadores termoeléctricos.

Capítulo 2. PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS DE SACRIFICIO.

En la protección catódica con ánodos de sacrificio la corriente necesaria para la protección se logra uniendo la estructura a proteger a un ánodo galvánico haciendo innecesario el uso de una fuente eléctrica externa. El ánodo galvánico cuando se une a ella, dentro de un electrolito como el suelo o el agua, adquiere comportamiento anódico, liberando la corriente necesaria para la protección de la estructura, formándose así una pila galvánica, como se muestra en la Figura 2.1

La corriente emitida por el ánodo penetra la estructura a través del suelo o el agua, eliminando las corrientes de corrosión y retornando a su punto inicial por medio de un conductor, generalmente de cobre.(Lambert, 2004)

Para la protección de estructuras enterradas se emplean eficazmente los ánodos de magnesio y de zinc y para estructuras inmersas se utilizan ánodos de aluminio y en algunas ocasiones de zinc.

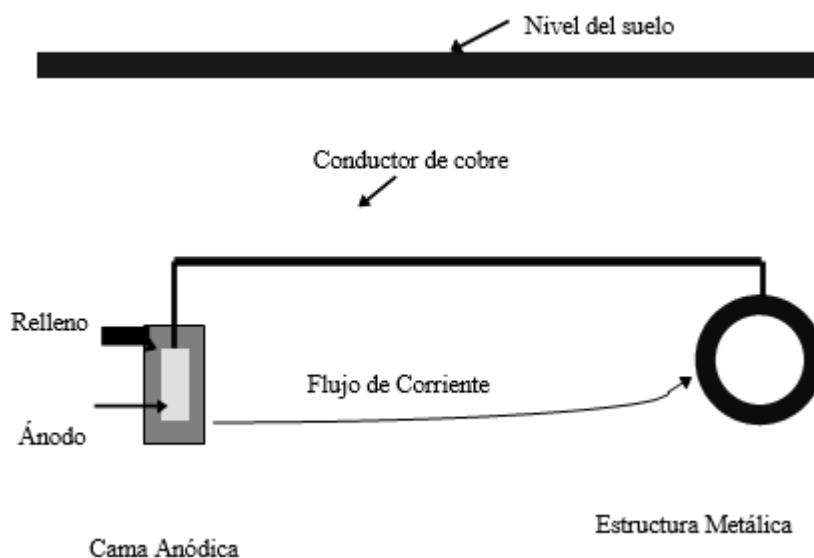


FIGURA 2.1. Protección catódica con ánodos de sacrificio.

Los ánodos galvánicos se entierran en conjunto con una mezcla (generalmente yeso, bentonita y sulfato de sodio), que se utiliza como relleno conductor, cuyo fin

es disminuir la resistividad eléctrica ánodo - suelo, reducir los efectos de polarización del ánodo y garantizar un desgaste uniforme en toda la superficie anódica.

Las características más importantes de un ánodo galvánico son: su potencial en circuito abierto (potencial medido con respecto al suelo, utilizando un electrodo de referencia), su contenido teórico de energía (expresado normalmente en A - hr / kg) y su eficiencia.(Giudice, 2008)

Las principales ventajas de la utilización de los ánodos galvánicos para proteger una estructura enterrada frente al uso de corriente impuesta son:

- No requiere suministro de corriente alterna.
- Los costos de mantenimiento e instalación son más bajos.
- Raramente aparecen problemas de interferencia con otras estructuras metálicas enterradas.
- Utilización más eficiente de la corriente de protección.

Por otra parte presenta desventajas tales como:

- La cantidad de corriente suministrada a una estructura metálica está limitada por la diferencia de potencial entre los ánodos y la estructura.
- La protección será más difícil si las resistividades eléctricas del suelo local no son suficientemente bajas.
- Los costos de implementación de un sistema de ánodos galvánicos serán muy altos si los requerimientos de corrientes son grandes, esto es, si el recubrimiento se halla en mal estado o la estructura es de grandes dimensiones, como en el caso de oleoductos y otros sistemas de transporte con diámetros considerables.
- Si la estructura metálica se encuentra influenciada por fugas de corriente provenientes, por ejemplo, de líneas de alta tensión, los ánodos galvánicos serán poco eficientes.(Giudice, 2008)

El método de protección catódica con ánodos galvánicos o de sacrificio normalmente se escoge cuando se requiere poca cantidad de corriente para

proteger estructuras, lo que se da con revestimientos de buena calidad y en estructuras de pequeñas dimensiones y cuando el suelo en el cual se ubica la estructura tiene baja resistividad eléctrica, normalmente inferior a 6000 ohm - cm.

2.1 CARACTERISTICAS DE LOS ANODOS DE SACRIFICIO.

1. Debe tener un potencial de disolución lo suficientemente negativo para polarizar la estructura de acero (metal que normalmente se protege) a -0,8 V contra el electrodo de Ag/AgCl. Sin embargo, el potencial no debe de ser excesivamente negativo, ya que eso motivaría un gasto superior con un innecesario paso de corriente. El potencial práctico de disolución puede estar comprendido entre -0,95 a -1,7 V vs Ag/AgCl.
2. El metal debe presentar una pequeña tendencia a la polarización, no desarrollar películas pasivantes protectoras, y tener un elevado sobrepotencial para la formación de hidrógeno.
3. El metal debe tener un elevado rendimiento eléctrico, expresado en amperes-hora por kg de material (A-h/kg), lo que constituye su capacidad de drenaje de corriente.
4. En su proceso de disolución anódica, la corrosión deberá ser uniforme.
5. El metal debe ser de fácil adquisición, y poderse fundir en diferentes formas y tamaños.
6. Bajo costo. (Giudice, 2008)

2.1.1 ÁNODOS AUXILIARES UTILIZADOS.

Los tipos de ánodos utilizados se escogen en función de sus prestaciones necesarias y del medio en que serán colocados. En general, un buen ánodo debe poseer las siguientes propiedades:

- Bajo consumo.
- Densidad de corriente drenada elevada.
- Pequeñas dimensiones.

- Baja resistividad.

Considerando que el flujo de corriente se origina de la diferencia de potencial entre el metal a proteger y el ánodo, éste último deberá ocupar una posición más elevada en la tabla de potencial (serie electroquímica). De acuerdo con esto, los materiales anódicos que pueden ser utilizados son el zinc, magnesio y aluminio.

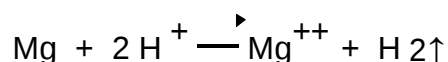
2.1.2. METALES ANÓDICOS.

Los metales más comúnmente usados como ánodos galvánicos son el magnesio, el zinc y el aluminio, éste último tiene teóricamente un contenido mayor de energía que los dos primeros, pero hasta ahora no ha encontrado una aplicación práctica en estructuras enterradas, por su baja eficiencia en suelos, por ende no serán considerados en el proyecto.(Rodríguez, 2005)

2.1.3. MAGNESIO.

El magnesio puro permite manejar un voltaje de 850 mV para la protección de acero, pero experimentalmente se ha demostrado una muy rápida corrosión con muy baja eficiencia. Algunas aleaciones comerciales con aproximadamente 150 mV menos de voltaje manejado se han ensayado demostrando ser satisfactorias en una gran variedad de electrolitos. Estas aleaciones han sido utilizadas extensivamente en la fabricación de ánodos de sacrificio. El magnesio y muchas de sus aleaciones bajas se corroen rápidamente en soluciones acuosas, el metal puro se disuelve en ácido con rápida evolución de hidrógeno y desprendimiento de calor, el metal no es anfótero y no es fuertemente atacado por álcalis.(Marine, 2005)

En electrolitos acuosos la disolución se presenta con desprendimiento de iones hidrógeno, de acuerdo con:



la reacción es un proceso irreversible en un potencial menos negativo que el sugerido por la teoría y porque en ésta la concentración de la sal metálica dentro

del electrolito tiene poco efecto sobre el potencial del metal. Tres propiedades del magnesio lo hacen utilizable como ánodo de sacrificio: posee un alto manejo de voltaje para la protección de acero, tiene un bajo equivalente electroquímico y tiene buenas propiedades de polarización anódica. El potencial de un pedazo de magnesio puro inmerso en una solución de sal acuosa diluida es -1.70 V respecto al electrodo de cobre/sulfato de cobre. Así, éste es anódico respecto a los metales comunes acero, plomo, aluminio, cobre y zinc.(Lambert, 2004)

Si la corrosión del magnesio se considera como una reacción divalente, entonces su equivalente electroquímico teórico es de 1000 A - hr / lb o 9 lb / A - año. Algunos duplican estos valores pero sobre una reacción monovalente manejando 500 A - hr / lb o 17.5 lb / A - año. Eficiencias mayores al 50 % rara vez son reportadas. La oxidación de la forma monovalente a la divalente puede ocurrir, pero ésta reacción no contribuye al uso de corriente del ánodo.

Los productos de la reacción anódica producen una elevada solubilidad de cloruros y sulfatos, cuya presencia impide la polarización. En agua fresca o en electrolitos en los cuales no se contenga ninguno de estos iones el hidróxido y el carbonato pueden formarse, pero estos no polarizan notablemente el ánodo, la introducción de muy pequeñas cantidades de iones sulfatos o cloruros producen la inmediata despolarización.(Moreno, 2006)

Estos iones se adicionan dentro del electrolito como relleno cuando se espera deficiencia, el metal se consume uniformemente pasando a ser una esfera. Existen tres factores que influyen sobre la eficiencia del magnesio como metal anódico:

1. Densidad de corriente:
2. Composición del ánodo.
3. Medio ambiente.

La eficiencia se incrementa a altas densidades de corriente pero generalmente la más alta eficiencia se obtiene con densidades por encima de $100 \text{ mA} / \text{m}^2$.

Ciertas aleaciones de 6 % de Al y 3 % de Zn (magnesio bimetalico) permiten alcanzar eficiencias más altas que el magnesio sólo, la razón de esto es

la menor velocidad de corrosión parásita en las aleaciones. Metales más nobles particularmente aquellos con voltaje superior al del hidrógeno, pueden causar la corrosión parásita; el cobre, hierro y níquel, son impurezas de ésta clase encontradas en el magnesio comercial. Los metales como plomo, estaño, cadmio y cinc parecen tener poca influencia sobre el comportamiento del ánodo. Dos series de aleaciones de ánodos son empleadas; en suelos. Particularmente de alta resistividad se usan ánodos de alta pureza y en agua de mar se utilizan ánodos de baja pureza que son más económicos. Los ánodos de alta pureza más recientemente desarrollados incluyen 1 % de Mn en lugar de Al y Zn permitiendo manejar 200 mV más de voltaje e incrementando por encima de 25 % el voltaje para el acero polarizado. En la Tabla 2.1 se presenta las aleaciones de mayor uso en la fabricación de ánodos de magnesio.(Reyna, 2007)

TABLA 2.1 Composición química porcentual de aleaciones de magnesio para ánodos de sacrificio.

ELEMENTO	ELEMENTAL	BIMETÁLICO	ELECTROLÍTICO	COMPOSICIÓN
Al	0.003	3.5 - 6.7	2.6 - 3.5	2.6 - 6.7
Zn	—	2.5 - 3.5	0.9 - 1.2	0.9 - 3.5
Mn	0.8	> 0.15	> 0.15	> 0.2
Si	0.005	< 0.3	< 0.3	< 0.1
Cu	0.003	< 0.05	< 0.05	< 0.05
Ni	0.001	< 0.03	< 0.03	< 0.02
Fe	0.03	< 0.003	< 0.003	< 0.03
Pb	—	—	—	< 0.04
Sn	—	—	—	< 0.05
Be	—	—	—	< 0.0028

El magnesio bimetálico comercialmente se conoce como magnesio H-1 y el magnesio electrolítico como magnesio high potencial.

2.1.4. Zinc.

El zinc puede dar un potencial de -1.10 V respecto al electrodo de cobre / sulfato de cobre y manejar voltajes de 0.25 V en la protección catódica del acero. La corrosión del zinc se lleva a cabo por una reacción divalente, con una eficiencia cercana al 100%. El consumo teórico del ánodo es de 10.45 kg/ A - año y en la práctica de 11.36 kg/A-año son consumidas. El zinc suspendido en agua o enterrado no se corroe rápidamente por reacciones parásitas y los ánodos de aleaciones mantienen altas eficiencias a muy bajas densidades de corriente. La corrosión del zinc es muy uniforme, aunque ánodos de alta pureza dejan una gran superficie granular visible que ocasiona pérdida adicional del metal hacia el final de la vida del ánodo, por aislación eléctrica ocurrida entre los granos.(Rodríguez, 2005)

El comportamiento de un ánodo de zinc depende de dos parámetros, la aleación particular de zinc usada para su fabricación y el medio dentro del cual se ubica. Si una varilla de zinc con algunas ppm de cualquier impureza se usa como ánodo, ésta polariza cerca de 20 mV dando un excelente comportamiento, presentando un consumo bajo independiente de las variaciones en la densidad de corriente. Las propiedades y composiciones de las aleaciones de zinc usadas en ánodos de sacrificio se han dividido en dos grupos, de acuerdo con que se utilicen en el mar o en otro electrolito. En suelos o rellenos, el zinc con 99.99 % de pureza es empleado satisfactoriamente. En la Tabla 2.2 se presentan las aleaciones típicas para ánodos de zinc.

El bajo voltaje manejado limita el uso del zinc a suelos con una baja resistividad, excepto cuando se utiliza para proteger estructuras muy bien recubiertas. El zinc es sensible a la temperatura presentando inversión del voltaje manejado en relación con el acero a 70 °C en agua; por lo cual el zinc no puede emplearse para la protección de cilindros de almacenamiento de agua caliente. (Faragauss, 2007).

ELEMENTO	ALTA PUREZA	MUY ALTA
Zn	99.9	99.99
Pb	0.07	0.006
Fe	0.02	0.005
Cd	0.07	0.004

TABLA 2.2. Composición química porcentual de aleaciones de zinc para ánodos de sacrificio.

2.1.5. ALUMINIO.

El Al, a pesar de ser, por sus características electroquímicas, el material idóneo para ser utilizado como ánodo de sacrificio, su empleo como tal es relativamente reciente. La razón estriba en que este metal, aleado o no, presenta un inconveniente: se le forma una película de óxido de aluminio (pasivación anódica) que lo hace muy resistente a la corrosión y por tanto al "sacrificio".

Para la utilización del Al como ánodo galvánico se han realizado numerosas investigaciones cuyo objetivo principal ha sido la búsqueda de elementos de aleación que limiten la pasivación anódica del mismo.

El Al, por su situación en la serie electroquímica, es el metal más idóneo para la protección catódica, pues ocupa una posición intermedia entre el Zn y el Mg, y tiene una capacidad elevada de corriente. Debido precisamente a su elevada capacidad de corriente, un solo ánodo de Al puede ejercer la acción de tres de iguales características de Zn, para una misma duración del ánodo. Aunque el precio del Al es más elevado que el del Zn, al tenerse que colocar menos ánodos esta diferencia se compensa y si se considera además, el ahorro de mano de

obra en la colocación de los ánodos de aluminio, éstos pueden llegar a ser incluso más económicos que los de Zn. (Agulleiro, 2006)

El campo de aplicación de los ánodos de Al es semejante al de los de Zn y su comportamiento es satisfactorio en la protección catódica de estructuras.

Tabla 2.3. Características electroquímicas de algunas aleaciones de zinc, aluminio y magnesio utilizadas en la actualidad.

<i>Aleación</i>	<i>Potencial (V) Ag/AgCl</i>	<i>Potencial respecto al acero protegido (-0.8V)</i>	<i>Capacidad de drenaje de corriente A-h/kg</i>
Zn*	-1.05	-0.25	780
Al-Zn-Sn	-1.07	-0.27	2 420
Al-In	-1.15	-0.35	2 740
Al-Hg	-1.05	-0.25	2 830
Mg	-1.5 a -1.7	-0.7 a -0.9	1 050 a 1 200

* Especificación militar norteamericana.

La utilización del Mg y sus aleaciones resulta del valor bastante bajo de su potencial de disolución que implica un bajo rendimiento de corriente y una disminución, a veces bastante grande, del potencial de la estructura a proteger. El magnesio puede utilizarse para la protección catódica de estructuras provistas de un recubrimiento de mala calidad situadas en un medio de resistividad elevada (10 000 Ω -cm) tal como es el caso de un suelo arenoso.

No son recomendables estos ánodos para su utilización en agua de mar, ya que su elevada autocorrosión hace que los rendimientos sean muy bajos; y su mejor campo de aplicación es en medios de resistividad elevada (entre 5 000 y 20 000 Ω -cm). (J., 2001)

2.2. RELLENO ANÓDICO.

La efectividad de operación de los ánodos de sacrificio instalados directamente en tierra es baja, debido principalmente a la formación de películas de los productos de la corrosión en su superficie; además se presenta la corrosión rápida y total de los ánodos de sacrificio, debido a las variaciones del suelo.

Para una mejor operación en instalaciones enterradas, los ánodos se rodean de materiales que los mantengan en estado activo (relleno anódico o backfill), lo cual evita la formación de las películas de los productos de corrosión, disminuyendo además la disolución del metal anódico y la resistencia a tierra. Para cada metal que se utiliza como ánodo de sacrificio existe una composición óptima del relleno químico, sin embargo, el componente básico es el yeso, debido a su bajo costo y a que su poca solubilidad en el agua permite utilizarlo por un largo periodo sin que requiera cambiarlo. En la Tabla 2.4 se observan las mezclas más frecuentemente utilizadas; en suelos de baja humedad se emplea el relleno tipo A, el cual permite mantener características de humedad apropiadas por su alto contenido de bentonita, el relleno B comúnmente empleado para los ánodos de zinc, la mezcla tipo C se emplea para ánodos de cinc o magnesio en suelos muy húmedos o pantanosos para evitar el posible arrastre del relleno, el relleno D por su baja resistividad es empleado en suelos de muy alta resistividad para reducir la resistencia ánodo - suelo. Es posible encontrar el relleno asociado con el ánodo galvánico, lo que comúnmente se denomina “ánodo empacado.

2.2.1. RELLENO BACKFILL.

Para mejorar las condiciones de operación de los ánodos en sistemas enterrados, se utilizan algunos rellenos; entre ellos, el de Backfill especialmente con ánodos de zinc y magnesio; estos productos químicos rodean completamente el ánodo produciendo algunos beneficios como:

- Promueven una mayor eficiencia.
- Desgaste homogéneo del ánodo.
- Evita efectos negativos de los elementos del suelo sobre el ánodo.
- Absorben humedad del suelo, manteniendo dicha humedad constante.

La composición típica del Backfill para ánodos galvánicos está constituida por yeso (CaSO_4), bentonita, sulfato de sodio; y la resistividad de la mezcla varía entre 50 y 250 $\Omega\text{-cm}$.

TIPO	YESO %	BENTONITA %	SULFATO DE SODIO %	RESISTIVIDAD (ohm - m)
A	25 ¹	75	0	3
B	50 ¹	50	0	3
C	50 ²	50	0	3
D	75 ¹	20	5	0.5

TABLA 2.4. Rellenos químicos para ánodos galvánicos.

¹Yeso hidratado

²Yeso moldeado

2.2.2. VIDA DEL ÁNODO.

El ánodo dará un tiempo de vida razonable si puede mantener sus propiedades electroquímicas y su consumo es suficientemente lento. El tiempo de vida puede depender de la velocidad de disolución del metal de acuerdo con la ley de Faraday y la eficiencia con la cual éste proceso ocurre; definiéndose ésta como la carga de A - h real sobre la teórica; la baja eficiencia puede ser ocasionada por la corrosión parásita, la cual causa la corrosión del ánodo sin liberar completamente la corriente.

Un importante parámetro en la determinación de la vida útil del ánodo es la velocidad de consumo del volumen del metal anódico, la que se halla influenciada por la forma y tamaño del ánodo más que por su masa, la cual afecta su resistencia dentro del electrolito.

El consumo del ánodo puede ser proporcional al total de carga liberado, pero la velocidad de consumo en cualquier punto sobre la superficie del ánodo dependerá de

su densidad de corriente; en los bordes, esquinas y otros puntos la densidad de corriente puede ser más grande y el ánodo se corroerá más rápidamente allí.

2.2.3. 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 ánodos de sacrificio 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 ánodos galvánicos 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.(Faragauss, 2007)

2.2.4. 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.

2.2.5. 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. En sistemas galvánicos ésta práctica es común cuando se emplean ánodos de magnesio.

2.2.6. CAMBIOS EN LOS REQUERIMIENTOS DE CORRIENTE.

Dentro de ciertas limitaciones es posible diseñar una instalación de protección catódica con ánodos de sacrificio, 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.

2.2.7. 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 como 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 de potencial como criterio de protección dependen del metal a proteger, variando únicamente por acción de altas temperaturas (donde se recomienda un incremento de $-2 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$) 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 2.5

TABLA 2.5. Potenciales recomendados para protección catódica.

METAL A PROTEGER	E (Cu / CuSO₄)
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.(Group, 2011)

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.

2.2.8. REQUERIMIENTOS DE CORRIENTE 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 d.c. 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.

TABLA 2.6. Requerimientos de corriente para protección catódica.

MEDIO	CORRIENTE REQUERIDA (mA /m)
Estéril, suelo neutral	0.121- 0.456
Suelo neutral bien aireado	0.608- 0.912
Suelo bien aireado seco	0.152 - 0.456
Suelo húmedo	0.76- 1.824
Suelo altamente ácido	1.52- 4.56
Suelo con bacterias sulfato reductoras	Hasta 12.768
Caliente en el suelo	1.52- 7.6
Concreto seco	0.152- 0.456
Concreto húmedo	1.52- 7.6
Agua fresca estacionaria	1.5
Agua fresca en movimiento	1.52- 1.824
Agua fresca altamente turbulenta con oxígeno	1.52- 4.56
Agua caliente	1.52- 4.56
Agua de estuario contaminada	15.2 - 45.6

Agua de mar	1.52- 7.6
Químicos, soluciones alcalinas o ácidas	1.52- 7.6
Aceros bien revestidos en suelos	0.003- 0.006
Aceros bien revestidos con detector de fugas	0.0003 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 2.6 y 2.7, 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.

TABLA 2.7. Densidades de corriente recomendadas para protección catódica.

ESTRUCTURA	DENSIDAD DE CORRIENTE (mA /m)
Tuberías	0.03 - 0.06
Paredes de pozos profundos	0.03
Fondo de tanques parte externa	0.03
Parte interna de tanques	0.15 - 0.30
Tanques de proceso	0.21 - 3.04
Estructuras en agua de mar	1.52 - 4.56
Estructuras en zonas pantanosas	0.03 - 0.06

2.2.9. 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 específico de material, las unidades empleadas usualmente son Ω/cm^3 y Ω/m^3 , al hacerla independiente de las dimensiones, la resistividad eléctrica se convierte en una propiedad intrínseca cuyas unidades pueden ser escritas como $\Omega\cdot\text{m}^2/\text{m}$ o $\Omega\cdot\text{m}$. 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 $\Omega\cdot\text{m}$ y para la roca de granito hasta 5000 $\Omega\cdot\text{m}$. 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. (Rodríguez, 2005)

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 2.8

TABLA 2.8. 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.

Capítulo 3. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROGRAMA.

Actualmente el diseño de sistemas de protección catódica se realiza utilizando ecuaciones empíricas combinadas con consideraciones prácticas; pero éste es un proceso amplio e iterativo que busca satisfacer requerimientos permitiendo que los factores y variables que fundamentan un aspecto sean consistentes con otros, todos los cálculos para el dimensionamiento de sistemas de protección catódica pueden facilitarse mediante el uso de los microcomputadores; con lo cual se obtiene un hábil manejo de la información, rapidez en el tiempo de respuesta y lo más importante confiabilidad en los resultados obtenidos.

La descripción del proceso de desarrollo y elaboración del programa, constituye básicamente un recuento de las observaciones, análisis y actividades realizadas, lo cual, el presente capítulo se dedicará a describir la forma en que se encuentra estructurado el programa desarrollado para el diseño de sistemas de protección catódica con ánodos de sacrificio, para hacer más clara la descripción se incluyen las consideraciones que fundamentan algunos de los aspectos del programa.

3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PROGRAMA.

Puede afirmarse que el programa posee uniformidad y un alto grado de compactación. Siendo la uniformidad el indicativo del grado en que la interfaz utiliza notación y formatos consistentes, aplica restricciones e incluye excepciones a algunas reglas. La compactación se refiere a la cantidad de información que presenta la interfaz y que debe retener la memoria humana; los atributos que miden el grado de compactación de la interfaz son:

- El número de comandos utilizados.
- El número de funciones y operaciones.
- La cantidad de colores empleados.
- La variedad y cantidad de mensajes de error.

- Los métodos abreviados para acceder a las funciones.
- El número de validaciones y chequeos de las entradas.

Por el análisis de éstos atributos el programa se puede considerar compacto, presentando por ello una solidez y potencia tal que permite una fácil asimilación de su interfaz, obteniéndose un alto nivel de eficiencia al operarlo, pero sin convertirse en un medio con pocas capacidades de ampliación, actualización y transportabilidad.

3.2. PARÁMETROS DE DISEÑO.

Para el dimensionamiento de un sistema de protección catódica se precisa de una información técnica de la estructura a proteger y de los materiales utilizados, que en conjunto con las mediciones de campo, constituyen los datos fundamentales para la elaboración del diseño, siendo denominados parámetros de diseño, con el fin de alcanzar un más claro y rápido entendimiento del programa y su algoritmo de cálculo se describe en forma breve y concisa la información básica involucrada en el diseño de un sistema de protección catódica.

3.3. ENTRADAS INICIALES DEL PROGRAMA.

Las entradas iniciales proveen la información necesaria para la ejecución del programa constituyéndose en el punto de partida para la realización de los cálculos de diseño del sistema de protección catódica, estos parámetros se describen a continuación.

3.3.1. MÓDULO DE CÁLCULO PARA OTRAS ESTRUCTURAS.

Para estructuras metálicas enterradas de geometrías diferentes a tuberías o a fondos de tanques, se diseñó un módulo general de cálculo en el cual se presentan dos opciones para el diseño del sistema de protección:

- Protección catódica utilizando camas anódicas de sólo un ánodo.
- Protección catódica usando una cama anódica de múltiples ánodos.

3.3.2. MATERIAL DE LA ESTRUCTURA A PROTEGER.

Usualmente se protegen catódicamente estructuras de hierro y acero en ambientes aeróbicos, en las cuales el potencial de protección (E_m) recomendado es -0.85 V referido al electrodo de cobre/sulfato de cobre, para estructuras de otros materiales los potenciales recomendados se pueden observar en la Tabla 2.3 del capítulo 2, si no se especifica el material de la estructura a proteger, el programa considerara que se trata de hierro o acero en ambiente aeróbico.

3.3.3. ÁREA DE LA ESTRUCTURA A PROTEGER.

El área de la estructura a proteger se obtiene a partir de la forma geométrica de la estructura, considerándose únicamente la superficie de la estructura en contacto directo con el medio corrosivo, en éste caso el suelo, expresado en m^2 .

De acuerdo con el tipo de estructura el área es determinada por el programa con base en la información ingresada, así:

Para una malla de tierra:

$$A = \pi d_H L_H + n_v \pi d_v L_v \quad (2)$$

Dónde:

A = Área del tramo (m^2).

d_H = diámetro del conductor horizontal (m).

L_H = longitud total del conductor horizontal de la malla (m).

d_v = diámetro del electrodo vertical (m).

L_v = longitud del electrodo vertical (m).

n_v = número de electrodos verticales (m).

3.3.4. VIDA ÚTIL REQUERIDA DEL SISTEMA.

La vida útil requerida del sistema, hace referencia al mínimo tiempo de servicio en años, que debe cumplir el sistema de protección catódica y el cual puede ser igual al tiempo de vida útil de la estructura que se desea proteger.

3.3.5. RESISTIVIDAD DEL MEDIO (ρ).

La resistividad del medio se obtiene por mediciones de campo a diferentes profundidades, usualmente entre 1 y 6 m, empleándose el valor promedio de la resistividad a una misma profundidad en ohm - m.

3.3.6. CONDUCTORES ELÉCTRICOS Y ESPACIAMIENTO ENTRE ÁNODOS.

Como ya se había indicado en el segundo capítulo, en los sistemas de protección catódica con ánodos de sacrificio las tensiones manejadas son bajas, por tanto, cualquier incremento en la resistencia del circuito puede ser significativo; por esto debe tenerse en cuenta: el espaciamiento entre ánodos en una misma cama anódica, la ubicación del primero de ellos respecto a la estructura y el tipo de conductores eléctricos empleados. En la Tabla. 3.1 se presentan los conductores eléctricos y sus respectivas resistencias empleados en protección catódica con ánodos de sacrificio.

TABLA 3.1 Resistencia de conductores de cobre para ánodos de sacrificio.

Tamaño del cable	Resistencia (ohm/m)
N/ 6AWG	1.249×10^{-4}
N/8AWG	1.9934×10^{-4}
N/10AWG	3.1699×10^{-3}
N/12AWG	5.02919×10^{-3}
N/14AWG	7.9857×10^{-3}

3.3.7. DENSIDAD DE CORRIENTE.

Cuando se tiene una estructura metálica protegida catódicamente la densidad de corriente (DC') requerida para lograr la protección está directamente relacionada con la forma de la estructura y las características propias del medio corrosivo en el cual se encuentra; es por esto, que recientemente han sido desarrolladas expresiones como la ecuación 2, para determinar tales valores, la cual relaciona la densidad de corriente con la resistividad, ecuación que se aplica para terrenos con valores de resistividad comprendidos entre 1000 ohm - cm y 300000 ohm - cm, sin embargo, para valores de resistividad inferiores a 40000 ohm - cm presenta un alto grado de desviación, por lo que no se hace aplicable para los cálculos de protección catódica con ánodos de sacrificio; por ende, los valores de densidad de corriente que se empleen en un diseño de un sistema de protección deben ser, en cuanto sea posible, obtenidos por pruebas directas sobre la estructura, o en su defecto, como ya se había mencionado mediante el empleo de valores recomendados por la literatura como los presentados en las Tablas 8 y 9 del segundo capítulo.

$$DC' = 73.73 - 13.35 \cdot \log \rho \quad (3)$$

3.3.8. SELECCIÓN DEL MATERIAL ANÓDICO.

Material anódico: La selección del material anódico se realiza de acuerdo con la resistividad del terreno sin embargo, el diseñador puede limitar el cálculo a un tipo y tamaño particular de ánodo (zinc, Mg-High Potential o Mg-H1) cuyas características se presentan en la Tabla 3.2

TABLA 3.2 Características de los ánodos de sacrificio.

CARACTERÍSTICA	Mg H-1	Mg High Potential	Cinc
Potencial (Cu / CuSO ₄)	-1.55	-1.75	-1.10
Eficiencia de corriente (%)	25 - 50	50	90
Salida de corriente real (A - hr/ lb)	250 - 500	500	335
Salida de corriente teórica (A - hr/ lb)	1000	1000	372
Perdida de peso real (lb / A - año)	35 - 17.5	17.5	26.2

Otros Datos necesarios.

Potenciales recomendados para protección catódica (Tabla 2.5).

TABLA 3.3 Potenciales recomendados para protección catódica.

METAL A PROTEGER	E (Cu / CuSO₄)
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

Las tablas 3.4 y 3.5 muestran las dimensiones de los ánodos galvánicos.

TABLA 3.4 Dimensiones de ánodos de magnesio.

Peso (Kg)	dA (m)	LA (m)	dB(m)	LB (m)
4.09	0.085	0.355	0.202	0.659

5.45	0.114	0.304	0.202	0.608
7.72	0.114	0.430	0.202	0.734
14.5	0.142	0.519	0.228	0.823
22.7	0.200	0.405	0.279	0.709
27.2	0.128	1.52	0.215	0.215

TABLA 3.5 Dimensiones de ánodos de Zinc.

Peso (Kg)	dA (m)	LA (m)	dB(m)	LB (m)
6.81	0.04	0.76	0.20	1.06
8.18	0.04	0.91	0.20	1.21
10.9	0.04	1.21	0.20	1.52
13.63	0.04	1.52	0.20	1.82
27.27	0.05	1.52	0.20	1.82
68.18	0.11	0.91	0.20	1.21

En la Figura 3.1 se muestran las características geométricas de un ánodo de sacrificio, donde:

LA = longitud del ánodo (m).

dA = diámetro del ánodo (m).

LB = longitud de columna completa (ánodo más relleno) (m).

dB = diámetro de columna completa (m).

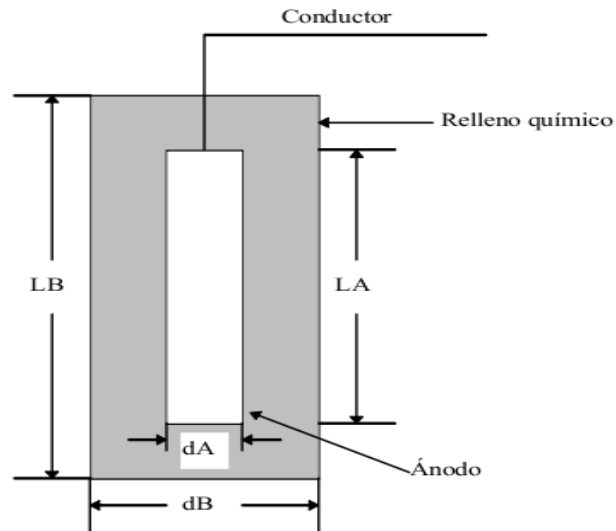


FIGURA 3.1. Características geométricas de los ánodos de sacrificio.

3.3.9. DETERMINACIÓN DE REQUERIMIENTOS TOTALES DE CORRIENTE.

Los requerimientos totales de corriente se determinan empleando la siguiente fórmula:

$$I_T = A \cdot DC \quad (4)$$

Dónde:

I_T = corriente total (A).

A = área a proteger (m^2).

DC = densidad de corriente de protección (A/m^2).

3.3.10. INICIALIZACIÓN DEL CÁLCULO.

Para el módulo de tuberías se inicializa el cálculo considerando dos ánodos por lecho, dado que en la práctica resulta inconveniente para la protección catódica de tuberías la instalación de camas anódicas de un solo ánodo para los otros módulos de cálculo se inicializa el mismo con un ánodo por lecho.

3.3.11. SELECCIÓN DEL MATERIAL ANÓDICO Y SU TAMAÑO.

Si el material anódico y su(s) tamaño(s) no se indican previamente por el diseñador, éste se selecciona automáticamente el material anódico con el valor de la resistividad del terreno así: para resistividades entre 20 ohm - m y 150 ohm - m se considera inicialmente el uso de ánodos de zinc, y para resistividades comprendidas entre 150 ohm - m y 600 ohm - m se utilizan ánodos de magnesio high potential.

Inicialmente se considera el uso de ánodos del menor peso disponible entre los seleccionados. Para los cálculos se consideran las características propias de cada tipo de ánodo, las cuales se encuentran en las Tablas 3.2, 3.3, y 3.4

3.3.12. CÁLCULO DEL PESO DEL MATERIAL ANÓDICO POR LECHO.

El peso de material anódico por lecho se determina con la siguiente expresión:

$$W1=nW \quad (5)$$

Dónde:

W1= peso del material anódico por lecho (lb).

W = peso del material anódico de un ánodo (lb).

n = número de ánodos por cama anódica.

3.3.13. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA TOTAL DEL CONDUCTOR ELÉCTRICO.

La resistencia total del conductor eléctrico se puede calcular por la expresión:

$$R_C = R_E (L_1 + (n - 1) \cdot S / 2) \quad (6)$$

Dónde:

RC= resistencia total del conductor eléctrico (ohm).

RE= resistencia especifica del conductor (ohm / pie), la cual se obtiene a partir de tipo de cable consultando la Tabla 11.

S = espaciamiento entre ánodos en un lecho anódico (pie).

L1= distancia estructura cama anódica (pie).

Para sistemas de puesta a tierra L1es constante e igual a 2.5 m.

3.3.14. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA ÁNODO-SUELO.

La resistencia total ánodo - suelo es igual a la resistencia del ánodo al relleno más la resistencia a suelo de la misma columna de relleno, lo que se expresa de la siguiente forma:

$$R_{AS} = 1.2 \cdot (R_{RT} + R_{AR}) \quad (7)$$

Dónde:

RAS= resistencia ánodo - suelo (ohm).

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

RAR= resistencia ánodo - relleno o resistencia interna del ánodo (ohm).

RRT= resistencia relleno - tierra (ohm).

La resistencia interna del ánodo sin corregir se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$R_{AR*} = R_A - R_B \quad (8)$$

Dónde:

RAR*= resistencia ánodo - relleno sin corregir (ohm).

RA= resistencia columna - ánodo (ohm).

RB= resistencia columna completa (ánodo más relleno) (ohm).

Para calcular éstas resistencias existen diferentes ecuaciones de las cuales se usará la de H. Dwight para un ánodo en posición vertical.

$$R_V = \rho \cdot (\ln(8 \cdot L / d) - 1) / (2 \cdot \pi \cdot L \cdot 30.48) \quad (9)$$

Dónde:

R_V = resistencia vertical (ohm).

ρ = resistividad del relleno en el cálculo de la resistencia columna - ánodo o resistividad del terreno en el cálculo de la resistencia columna completa (ohm - m).

L = longitud del ánodo (L_A) o longitud de la columna completa (L_B) (m).

d = diámetro del ánodo (d_A) o diámetro de la columna completa (d_B) (m).

La influencia mutua entre los ánodos ocasiona el incremento de la resistencia interna de los mismos lo que se denomina efecto de apantallamiento, el factor de apantallamiento depende de la ubicación de los ánodos dentro de la cama anódica.

Para ánodos dispuestos en forma lineal el factor se calcula con la ecuación 10 y para ánodos

$$C_F = 1 + \log((\cot(\theta_2 / 2) \cdots \cot(\theta_n / 2)) / (\log(8 \cdot L_B / d_B) - 1)) \quad (10)$$

Dónde:

C_F = factor de apantallamiento para ánodos dispuestos en forma lineal.

$$\theta_n = \cot^{-1}(L_B / (n \cdot S))$$

$$F_C = (f_n / (4 \cdot \pi \cdot \epsilon) - \theta) / (30.48 \cdot k) \quad (11)$$

Dónde:

F_C = factor de apantallamiento para ánodos dispuestos en forma curva.

$$k = 1 / \rho$$

$$\theta = \Delta / (n \cdot LB)$$

$$f_n = 0.4404 \cdot \log(n) + 1.2095$$

$$\Delta^3 = 0.0928 \cdot \log(S / LB) - 0.4034$$

$$\varepsilon = \text{radio equivalente al perímetro del circuito dado por: } \varepsilon = L1 + DT / 2$$

La resistencia ánodo - relleno corregida se calcula con la ecuación 12 para ánodos dispuestos linealmente y con la ecuación 13 para ánodos dispuestos circularmente.

$$R_{AR} = R_{AR*} \cdot C_F / n$$

$$R_{AR} = R_{AR*} + F_C$$

Ecuación

(12) y (13)

3.3.15 CÁLCULO DE LA CORRIENTE DRENADA POR LA CAMA ANÓDICA.

La corriente liberada por cada cama anódica se calcula por la siguiente

$$I_D = \Delta V / (R_{AS} + R_C)$$

fórmula:

(14)

Dónde:

I_D = corriente drenada por el lecho (A).

ΔV = diferencia de potencial estructura - ánodo polarizado (V).

El voltaje de operación o diferencia de potencial estructura - ánodo polarizado se calcula la con la siguiente ecuación:

$$\Delta V = |E_A| - |E_m| - 0.1 \quad (15)$$

Dónde:

| EA| = valor absoluto del potencial del metal anódico (V).

| Em | = valor absoluto del potencial de la estructura (V).

0.1 = factor de polarización del ánodo.

3.3.16 CÁLCULO DEL TIEMPO DE VIDA DEL LECHO ANÓDICO.

El tiempo de vida del lecho anódico depende de su peso, de la corriente drenada y del equivalente electroquímico de la aleación de la cual está fabricado.

$$T = \eta \cdot F_U \cdot W_I \cdot \alpha_T / (8760 \cdot I_D) \quad (16)$$

Dónde:

T = tiempo de vida del lecho anódico (años).

η = eficiencia de corriente del ánodo de sacrificio (Tabla 12).

FU = factor de utilización, generalmente 0.75.

α_T = salida de corriente teórica del material anódico (A - hr / m).

8760 = número de horas en un año.

3.3.17 CÁLCULO DEL NÚMERO DE LECHOS.

Si la corriente drenada por la cama anódica es mayor que la corriente requerida debe emplearse un lecho anódico en caso contrario el número de lechos anódicos se calcula con la ecuación (16) y se aproxima al entero mayor.

$$m = I_T / I_D \quad (17)$$

Dónde:

m = número de lechos anódicos.

3.3.18. CÁLCULO DEL ESPACIAMIENTO TEÓRICO ENTRE LECHOS ANÓDICOS.

El cálculo del espaciamiento teórico entre lechos anódicos se aplica únicamente al módulo de tuberías.

$$X = L / m \quad (18)$$

Dónde:

X = espaciamiento teórico entre lechos anódicos (m).

L = longitud de la sección (m).

3.3.19 CARACTERÍSTICAS DE LA FUNCIÓN INCORPORADA EN EL PAST

La función con la metodología desarrollada fue incorporada al programa PAST desarrollado en el Centro de Estudios Electroenergéticos de la facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central de Las Villas. La figura 3.2 muestra cómo se llega en el programa PAST a través del menú a la función implementada, en la que se puede apreciar que se tiene acceso a cualquiera de los dos métodos implementados.

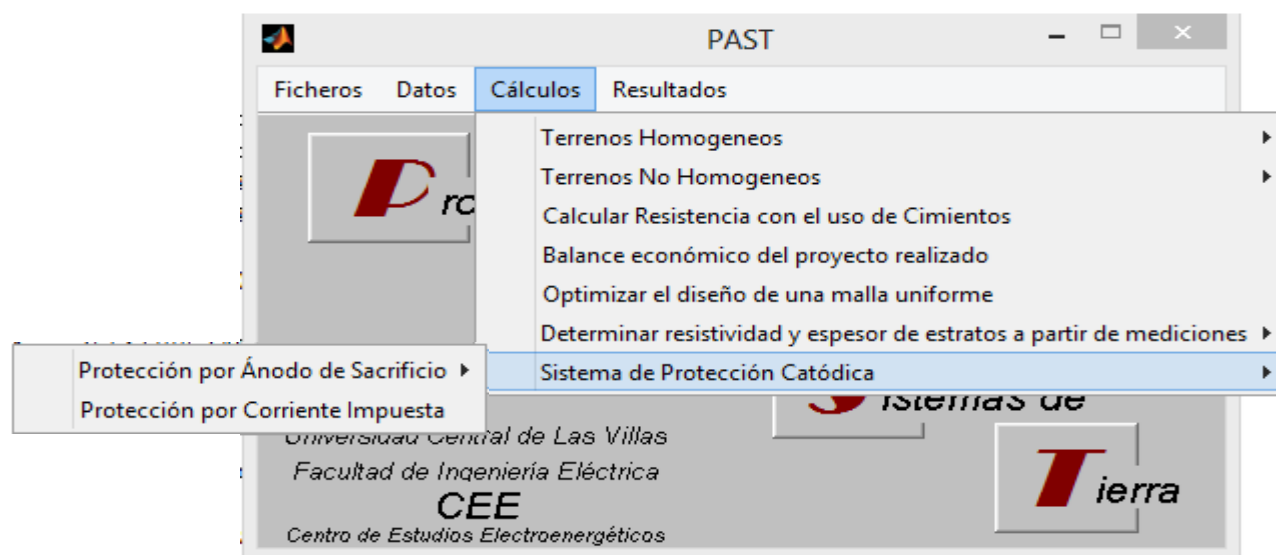


Figura 3.2. Submenú de la función de protección catódica.

La figura 3.3 muestra los posibles tipos de electrodos que pueden ser utilizados y la figura 3.4 los datos necesarios para el cálculo de los lechos anódicos por el método de protección catódica por ánodo de sacrificio.

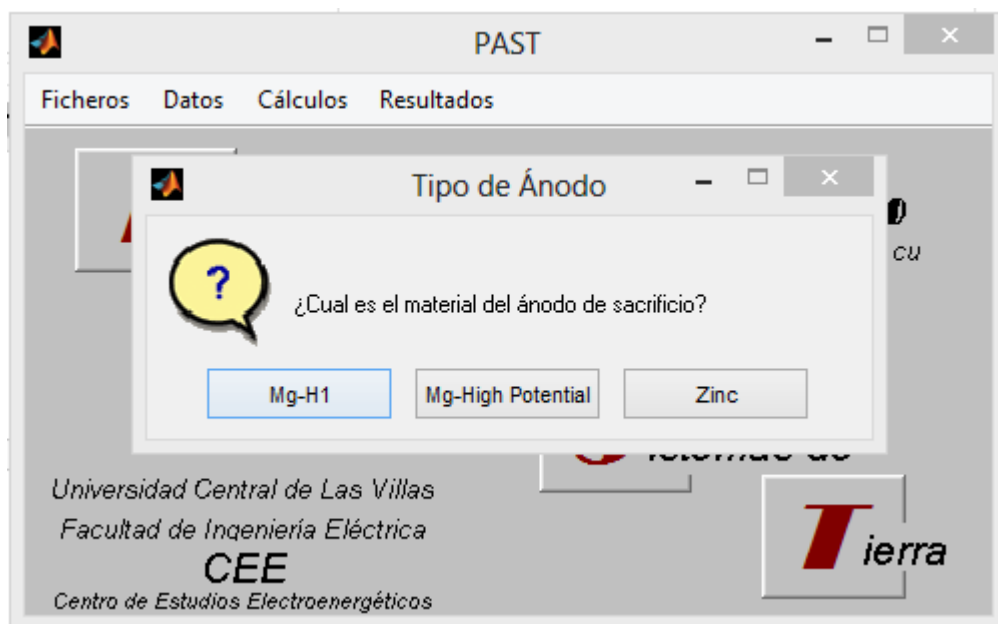


Figura 3.3. Submenú de selección del tipo de ánodo de sacrificio a utilizar.

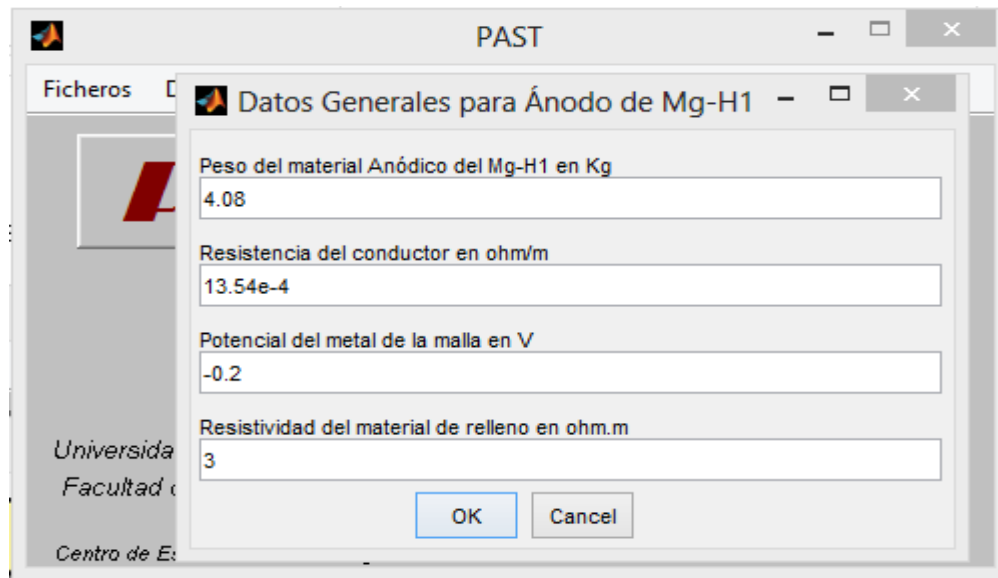


Figura 3.4. Datos necesarios para realizar los cálculos, en este caso para ánodo de Mg-H1.

Las figura 3.5 muestra la distribución de los lechos anódicos al derredor de la malla de tierra (elementos en negro) y la figura 3.6 las características técnicas del sistema de protección.

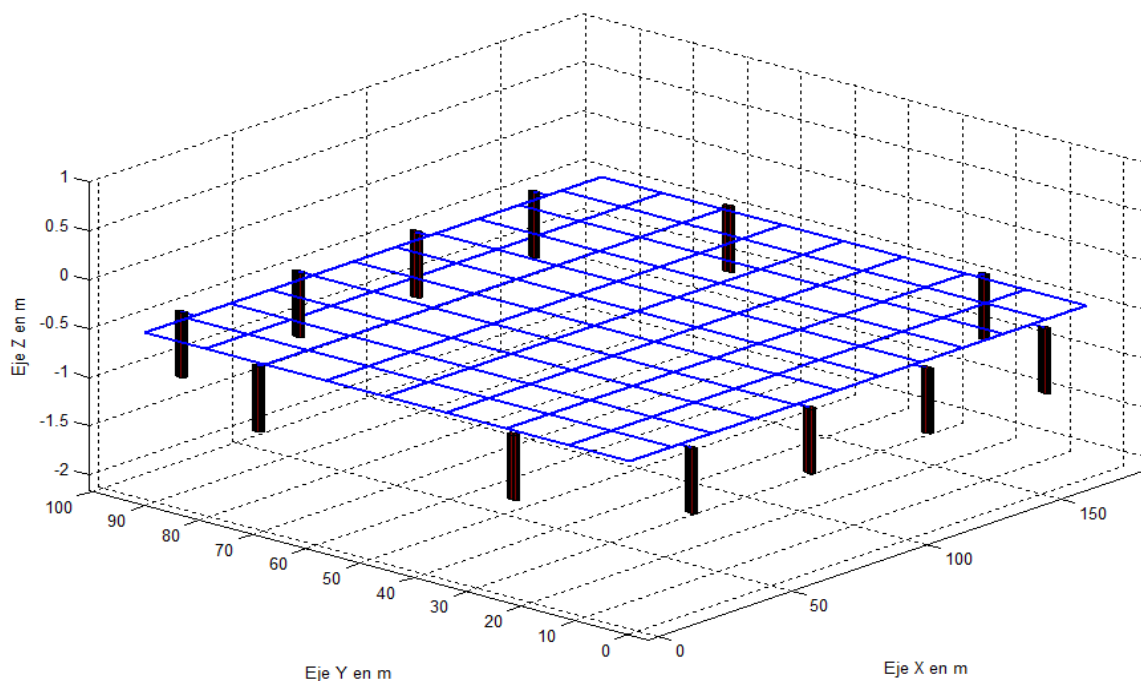
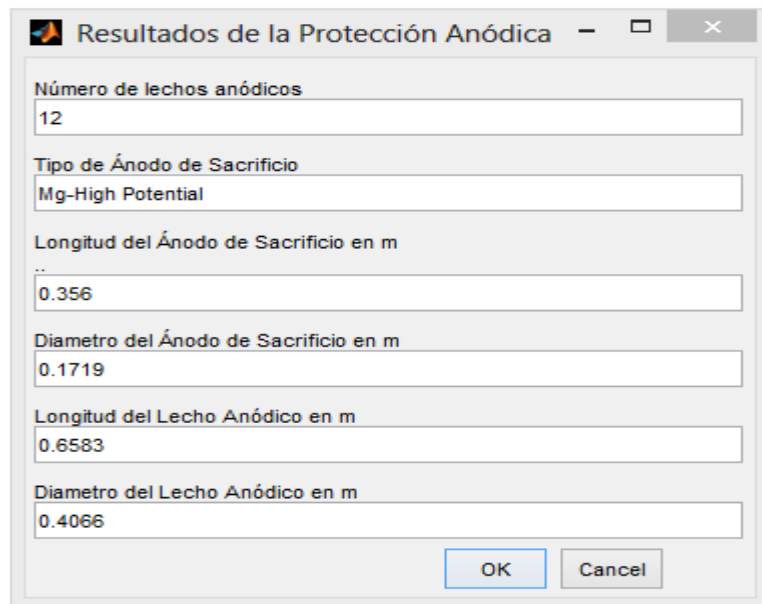


Figura 3.5. Distribución de los lechos anódicos al derredor de la malla tierra.



The image shows a software window titled "Resultados de la Protección Anódica". It contains several input fields with the following values:

Parameter	Value
Número de lechos anódicos	12
Tipo de Ánodo de Sacrificio	Mg-High Potential
Longitud del Ánodo de Sacrificio en m	0.356
Diametro del Ánodo de Sacrificio en m	0.1719
Longitud del Lecho Anódico en m	0.6583
Diametro del Lecho Anódico en m	0.4066

At the bottom right of the window are two buttons: "OK" and "Cancel".

Figura 3.6 Características técnicas del sistema de protección obtenido.

3.3.20 EJEMPLOS DE CÁLCULO

Para mostrar la funcionalidad de la metodología de cálculo se pretende proteger una malla de tierra de una subestación inmersa en terreno biestratificado con resistividad en el primer estrato de $200 \Omega \cdot m$, espesor de 1 m y resistividad del segundo estrato de $50 \Omega \cdot m$. La malla está constituido por 4 electrodos verticales de 3 m de longitud, diámetro 0.02m y electrodos horizontales de un total de 2610 m de longitud, de diámetro de 0.01326 m. La figura 3.7 muestra la distribución de los electrodos en la malla a proteger.

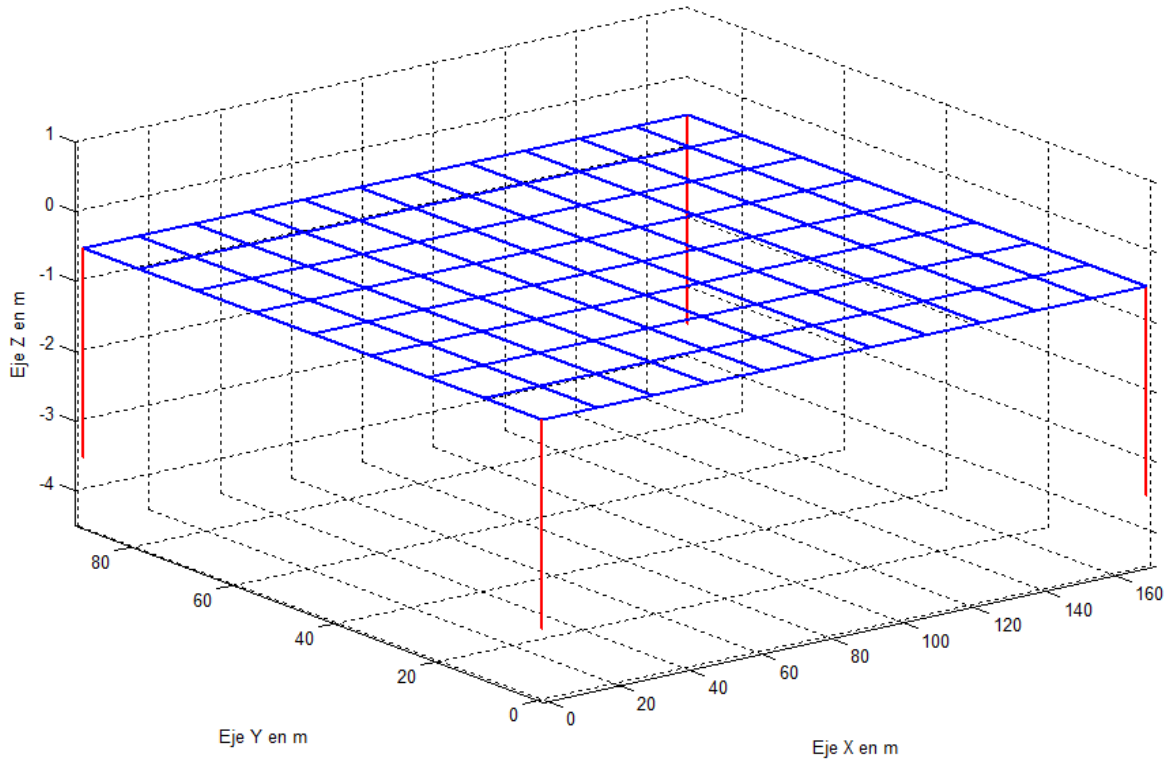
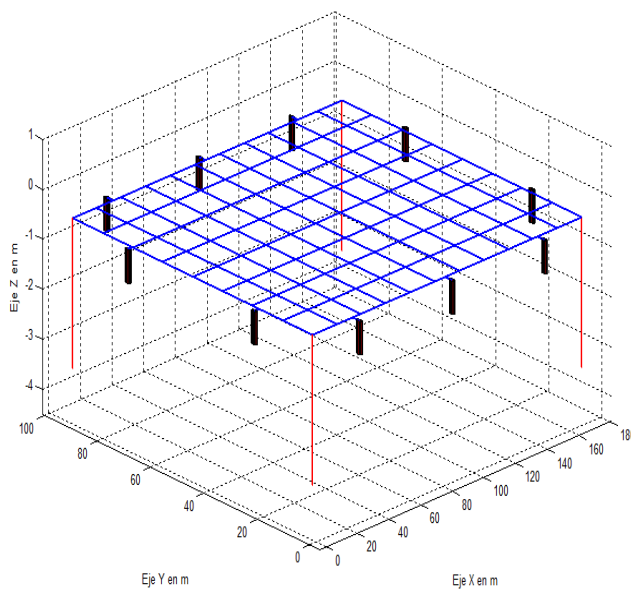


Figura 3.7. Distribución de los electrodos de la malla a proteger.

Las figuras 3.8 y 3.9 muestran los resultados para ánodos de Mg-H1 y Zinc respectivamente.

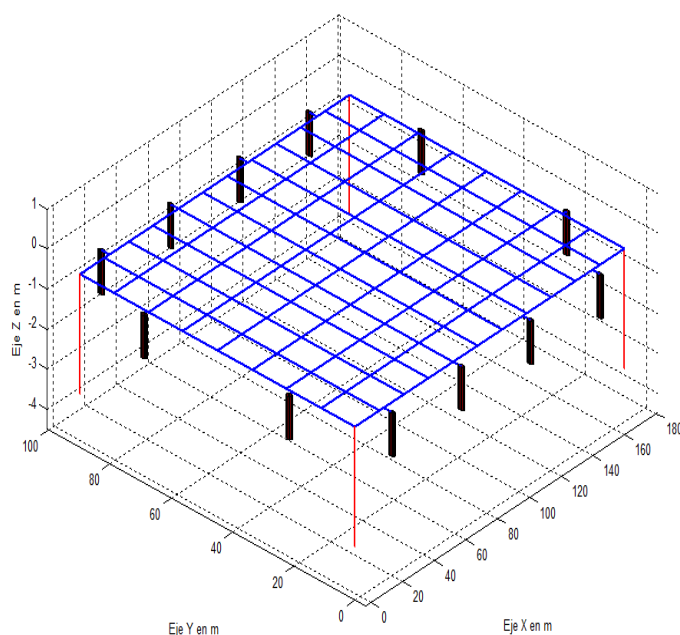


Resultados de la Protección Anódica

Número de lechos anódicos	10
Tipo de Ánodo de Sacrificio	Mg-H1
Longitud del Ánodo de Sacrificio en m	0.356
Dámetro del Ánodo de Sacrificio en m	0.1719
Longitud del Lecho Anódico en m	0.6583
Dámetro del Lecho Anódico en m	0.4066

OK Cancel

Figura 3.8 y 3.9 Resultados para ánodos de Mg-H1.



Resultados de la Protección Anódica

Número de lechos anódicos
12

Tipo de Ánodo de Sacrificio
Zinc

Longitud del Ánodo de Sacrificio en m
0.762

Diametro del Ánodo de Sacrificio en m
0.08046

Longitud del Lecho Anódico en m
1.0668

Diametro del Lecho Anódico en m
0.4066

OK Cancel

Figura 15. Resultados para ánodos de Zinc.

CONCLUSIONES

- ✓ El método de protección catódica por ánodo de sacrificio es el más económico y fácil de implementar.
- ✓ La protección catódica garantiza una mayor longevidad de las instalaciones de puesta a tierra.
- ✓ Este tipo de protección resulta costoso, por lo que su implementación requiere de un análisis técnico-económico.

RECOMENDACIONES

- ✓ Continuar trabajando en el tema e implementar en el PAST el método de protección catódica por corriente impresa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGULLEIRO, I. 2006. Técnicas modernas para la medición de sistemas de puesta a tierra en zonas urbanas.
- CEFRACOR 2004. Recommendations for the compability of grounding and cathodic protection
- FARAGAUSS 2007. Cálculo de Protección Catódica
- GIUDICE, C. A. 2008. Protección Catódica con Anodos Galvánicos.
- GROUP, K. T. 2011. Electiral Grounding Criteria
- GUMMOW, R. A. 2001. AC Grounding Effects on Cathodic Protection Performance. In Pipeline Stations
- J., A. A. D. T. S. 2001. Desing and installation of impressed current cathodic Protection System to operating marine structures.
- LAMBERT, P. 2004. Cathodic Protection solutions for steel- framed heritage buildings.
- MARINE, S. B. 2005. Bonding and Cathodic protection of vessels
- MORENO, A. D. V. 2006. Protección Catódica de concreto reforzado usando ánodos de sacrificios discretos
- REYNA, A. 2007. Corrosión de Electrodo de puesta a tierra.
- RODRÍGUEZ, J. C. 2005. Programa para el Diseño de Sistemas de Protección Catódica con Anodos de Sacrifiicos