



## PROTECCIÓN DE LAS MALLAS DE TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS CONTRA LA CORROSIÓN

Ing. Victor Rolando Jara González<sup>1</sup>, Ing. Raidel González Cabrera<sup>2</sup>,  
MSc. Alberto Limonte Ruiz<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Carretera a Camajuaní Km 5 ½, Santa Clara, Cuba.  
Teléfono: (53) (42) 281055

<sup>1</sup>e-mail: [jara@uclv.cu](mailto:jara@uclv.cu), [victorjara91@yahoo.com](mailto:victorjara91@yahoo.com), <sup>2</sup>e-mail: [raidelgc@nauta.cu](mailto:raidelgc@nauta.cu), <sup>3</sup>e-mail: [limonte@uclv.edu.cu](mailto:limonte@uclv.edu.cu)

**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 a tierra de subestaciones eléctricas de potencia. El método implementado fue el de protección catódica por ánodos de sacrificio, programado en MatLab creando finalmente el programa ECMaT (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 de sacrificio en sus correspondientes camas anódicas.

*Palabras Claves-* Ánodos de sacrificio, corrosión, protección catódica, sistemas de puesta a tierra.

### PROTECTION OF GROUND MESHES IN ELECTRICAL SUBSTATIONS AGAINST CORROSION

**ABSTRACT.** The ground meshes of the electrical substations are subject to the corrosive action of the soils, causing the deterioration of the same until causing them to disappear and consequently their exit from operation. Currently exist various methods for protection of this inevitable phenomenon, which affects the equipment, the operation of means of protection and staff life when the mesh is affected. This paper is realized with the aim of designing a program that allows modeling a system of cathodic protection to extend the useful life and proper functioning of the grounding meshes in power substations. The method implemented was the cathodic protection by anodes of sacrifice, programmed in MatLab, finally creating the program ECMaT (Corrosion Studies in Ground Meshes), according to acronyms in Spanish, developed in the Center of Electroenergetic Studies of the Central University "Marta Abreu" of The Villas, providing a favorable technical solution and a graphic visualization of system configuration, together with the location of the sacrificial anodes in their corresponding anodic beds.

*Key Words-* Anodes of sacrifice, cathodic protection, corrosion, grounding systems.

### 1. INTRODUCCIÓN

Un sistema de tierra es la principal protección para limitar las tensiones impuestas por descargas atmosféricas, sobretensión en las líneas, contacto no intencional con líneas de mayor tensión y estabilizar la tensión a tierra durante la operación normal. El empleo de metales en las instalaciones de puesta a tierra generalmente presenta problemas de corrosión complicados y que resulta imposible sustituir los mismos debido a las construcciones que se realizan sobre este, 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; años más tarde su alumno Michael Faraday analizó la corrosión de muestras de hierro fundido en contacto con agua de mar, concluyendo que el hierro sufría mayor corrosión en las zonas cercanas a la superficie que en las zonas más profundas con menor disponibilidad de oxígeno [1] [2]. 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 en cual la realización de cálculos repetitivos ocupa gran parte del tiempo en un proyecto de diseño [3]. Se tiene conocimiento sobre programas computacionales que facilitan el proceso de cálculo en el estudio de la corrosión de estructuras metálicas, enterradas o en contacto con la agresividad salina [3], pero no específicamente para el estudio de dicho fenómeno en los sistemas de puesta a tierra. Partiendo de la necesidad de crear un programa acorde con las exigencias técnico-económicas actuales, y a la vez ser capaz de brindar al usuario una información gráfica detallada, surge el ECMaT como herramienta computacional al servicio de proyectistas e ingenieros del sector eléctrico, el cual ofrece además de las ventajas anteriores, un hábil manejo de información, rapidez en el tiempo de respuesta y confiabilidad de los resultados. Dicho programa en la actualidad continúa en desarrollo en aras de alcanzar el grado de "programa profesional", incluyendo de manera futura un estudio predictivo del tiempo de vida de componentes de sistemas de puesta a tierra en terrenos variados, especialmente por la influencia de variables químicas que en la actualidad no se han relacionado con requerimientos eléctricos dentro de un sistema de este tipo en condiciones especiales de terreno.

## 2. CORROSIÓN EN SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

### 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 (atmósfera, 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 [4] [5].

### 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, luego, 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, dado que al enterrar una malla el metal se encuentra inmerso en un electrolito húmedo, 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 los dos tipos de corrosión anteriormente mencionados [6]. Se debe tener en cuenta que la velocidad de disolución de un metal es directamente proporcional a la cantidad de corriente que fluye por el mismo, y la cantidad total de metal disuelto es proporcional a la cantidad de electricidad que ha circulado por él; según la ley de Faraday [7].

## 3. PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO

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 corra. Para resolver 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 [7]. Este ajuste se puede lograr por el suministro de corriente a la estructura mediante la aplicación independiente o combinación de los métodos siguientes: método de los ánodos de sacrificio y método de corriente impresa [3]. En el caso especial de esta investigación y teniendo en cuenta el uso de recursos adicionales necesarios en el método de la corriente impresa (fuente externa, rectificadores, conductores), solamente se utiliza el método de protección catódica por ánodos de sacrificio.

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 al que se debe llevar el metal para prevenir el ataque corrosivo, la resistividad del medio y el número de ánodos que se debe usar.

El método de la protección catódica es el que hace uso de los ánodos de sacrificio o galvánicos que presentan potencial, los cuales al estar dentro de un circuito cerrado entre conductor-estructura-electrolito, hacen circular una corriente de protección catódica que garantiza el sacrificio del ánodo en el sistema; este fenómeno se puede observar en la Figura 1. En resumen, la estructura a proteger toma función de cátodo conectándola a una estructura de metal menos noble, que se encuentra sumergido en un electrolito común (suelo o agua), siendo este metal el ánodo de sacrificio [8].

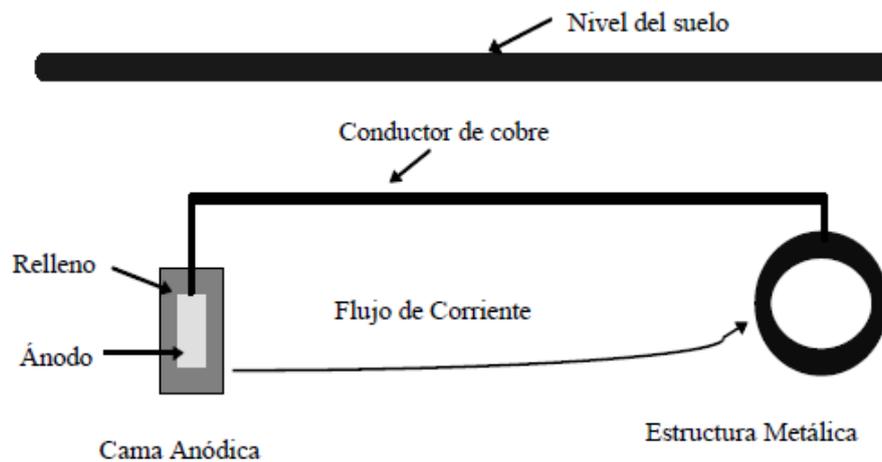


Figura 1: Protección catódica por ánodos de sacrificio [3].

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 [3]. 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 en  $A \cdot h/Kg$ ) y su eficiencia de corriente [9].

### Características fundamentales de los ánodos de sacrificio

Los materiales más comunes para la fabricación de ánodos de sacrificio son magnesio y zinc, los cuales se encuentran comercialmente en el mercado según el peso, dimensiones y formas diversas para adaptarlos a sus usos específicos. Cada uno de estos materiales tienen diferentes potenciales de oxidación y la selección de uno de ellos dependerá de las necesidades de voltaje y de la resistividad del electrolito. Teniendo el magnesio un mayor potencial que el zinc, es más utilizado en electrolitos de resistividad media y alta, en cambio los ánodos de zinc, se emplean preferiblemente en electrolitos de baja resistividad [3].

Los ánodos de sacrificio al instalarse, se ubican a una distancia máxima de tres metros con respecto a la estructura a proteger, ya que aportando potenciales relativamente bajos (en el orden de los mV) y por consiguiente corrientes de pequeña magnitud, se logra con esta cercanía una mayor y mejor distribución de las mismas. El uso de los ánodos de sacrificio en la protección catódica es una aplicación de la celda de corrosión producida por los metales disímiles, en donde al conectar un metal a otro situado a una posición superior a él en la serie electromotriz y quedando los dos en un mismo electrolito, como es la tierra, el metal más activo se corroe descargando corriente directa en el proceso.

Conociendo la demanda de corriente requerida para proteger una estructura, se puede diseñar un sistema de ánodos con suficiente materia para generar esta corriente en forma continua y por un número determinado de años. Los ánodos de sacrificio en la protección de estructuras metálicas se usan generalmente en aquellos casos en que se requiere relativamente pequeños incrementos de corrientes e áreas en donde la resistividad del suelo es moderada para permitir que se obtenga la corriente requerida con tan sólo una cantidad razonable de ánodos [2].

Los ánodos de magnesio particularmente, tienen una mayor capacidad de corriente teórica de salida ( $A \cdot h/Kg$ ) observándose de manera comparativa en la Tabla 1. Los ánodos de zinc requieren un alto grado de pureza (99.9%) para garantizar una corriente de protección adecuada; hacen circular una corriente de salida baja debido a que la diferencia de potencial con respecto al cobre es de 1.09 V, comparada con la del magnesio con respecto al cobre que es de 1.45 V.

Los ánodos de aluminio también expuestos en la Tabla 1, tienen características similares a las del zinc debido a que tienen un potencial parecido, pero su uso no es común especialmente porque no se encuentran en el mercado de electrodos con características y dimensiones específicas.

Tabla 1: Características de los ánodos de sacrificio convencionales [3].

	Consumo (A/año)	Drenaje (Kg/año)	Energía (A·h/Kg)	Potencial Cu-CuSO <sub>4</sub> (V)
<b>Zn</b>	11.5	90	750	-1.09
<b>Mg</b>	8.8	110	2200	-1.45
<b>Al</b>	3.1	320	1500	-1.1

**Vida del ánodo de sacrificio**

El ánodo tendrá un tiempo de vida razonable si puede mantener sus propiedades electroquímicas y su consumo suficientemente lento. El tiempo de vida puede depender de la velocidad de disolución del metal de acuerdo con la ley de Faraday [7] y la eficiencia de suministro de corriente de un ánodo con la cual éste proceso ocurre; definiéndose eficiencia de suministro como la carga de A·h real dividida por 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 volumétrica del metal anódico, la cual está influenciada por la forma y tamaño del ánodo más que por su masa, afectando directamente su resistencia dentro del electrolito. El consumo del ánodo es proporcional al total de carga liberada, 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 en esos lugares [2].

**Eficiencia de suministro de corriente en los ánodos**

Sobre los ánodos de sacrificio también se produce un proceso de autocorrosión, debido a la acción del electrolito del suelo, el cual provoca un consumo de corriente afectando la disponibilidad total de la misma. Los ánodos de magnesio tienen una eficiencia real del 50%, por tanto su corriente real es de 1100 A·h/Kg. La eficiencia real de los ánodos de zinc es del 90%, pero tiene baja corriente de salida, lo cual le pone nuevamente en desventaja respecto a los ánodos de magnesio. Para el diseño de la protección catódica se ha establecido la corriente de salida en mA, en función de la resistividad del suelo para electrodos de magnesio y para los diferentes pesos estándar existentes en el mercado. La relación peso-corriente de salida se puede apreciar en la Tabla 2.

Tabla 2: Corriente de salida en los ánodos de magnesio [10].

Peso (lb)	Corriente de salida (mA)
17	1.8x10 <sup>5</sup>
32	1.95x10 <sup>5</sup>
50	2x10 <sup>5</sup>

**Relleno anódico**

La efectividad de operación de los ánodos de sacrificio instalados directamente en tierra es baja, debido principalmente a la formación de películas provocadas por la propia 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 mantienen en estado activo (relleno anódico), disminuyendo la disolución del metal anódico y la resistencia a tierra del conjunto [11]. Según el metal que se utilice como ánodo de sacrificio, debe existir 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 3, 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 zinc o magnesio en suelos muy húmedos o pantanosos para evitar el posible arrastre del relleno, y 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” [10].

Tabla 3: Rellenos anódicos comunes [10].

Tipo	Yeso (%)	Bentonita (%)	Sulfato de sodio (%)	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )
<b>A</b>	25	75	0	3
<b>B</b>	50	50	0	3
<b>C</b>	50	50	0	3
<b>D</b>	75	20	5	0.5

#### 4. PROGRAMA PARA EL DISEÑO DE PROTECCIÓN CATÓDICA

##### Descripción del programa

Como parte del estudio de la protección de mallas de tierra en subestaciones eléctricas contra la corrosión, se ha hecho necesario el diseño de un programa que permita llegar a resultados eficientes, teniendo en cuenta que el proceso de cálculo usado puede resultar complejo y requiere de un tiempo considerable. Tanto con fines educativos en la formación de pregrado y posgrado o como material de diseño profesional en proyectos de sistemas de puesta a tierra, surge el ECMaT (Estudios de Corrosión en Mallas de Tierra), capaz de mostrar al usuario un camino a la solución ingenieril con medios gráficos y resultados técnico-económicos basados en la práctica actual. Programado en MatLab, potente software profesional, permite hacer uso de funciones, gráficos, comandos específicos, operaciones matemáticas complejas y finalmente, una interfaz gráfica totalmente amistosa con el usuario con programación simple pero robusta. El programa ECMaT se encuentra en un formato que permite ser ejecutado en computadoras con sistema operativo Windows, sin ser necesaria la instalación previa del MatLab, consideración que en ocasiones resulta relevante debido a la variación de versiones del mismo lo cual implica incompatibilidad. Como todo programa en base de Windows, también cuenta con las acciones básicas que permiten cargar y/o salvar cada estudio que se realice, total o parcialmente, destacando de igual manera el intercambio con Microsoft Office especialmente para la confección de tablas Excel.

En aras de facilitar al usuario un medio de enseñanza y diseño, se ha incluido en el programa una guía de usuario la cual explica paso a paso la forma de operar el mismo. La guía de usuario también expone consideraciones técnicas y tablas con datos auxiliares, completando un conjunto teórico-práctico capaz de lograr un mejor trabajo por parte del estudiante o del ingeniero que considere su empleo. Como muestra del planteamiento anterior, se expone la interfaz gráfica del programa en la Figura 2.



Figura 2: Interfaz gráfica principal del ECMaT [10].

Para analizar de manera general el modo de operación del ECMaT, se ha creado un diagrama de flujo mostrado en la Figura 3.

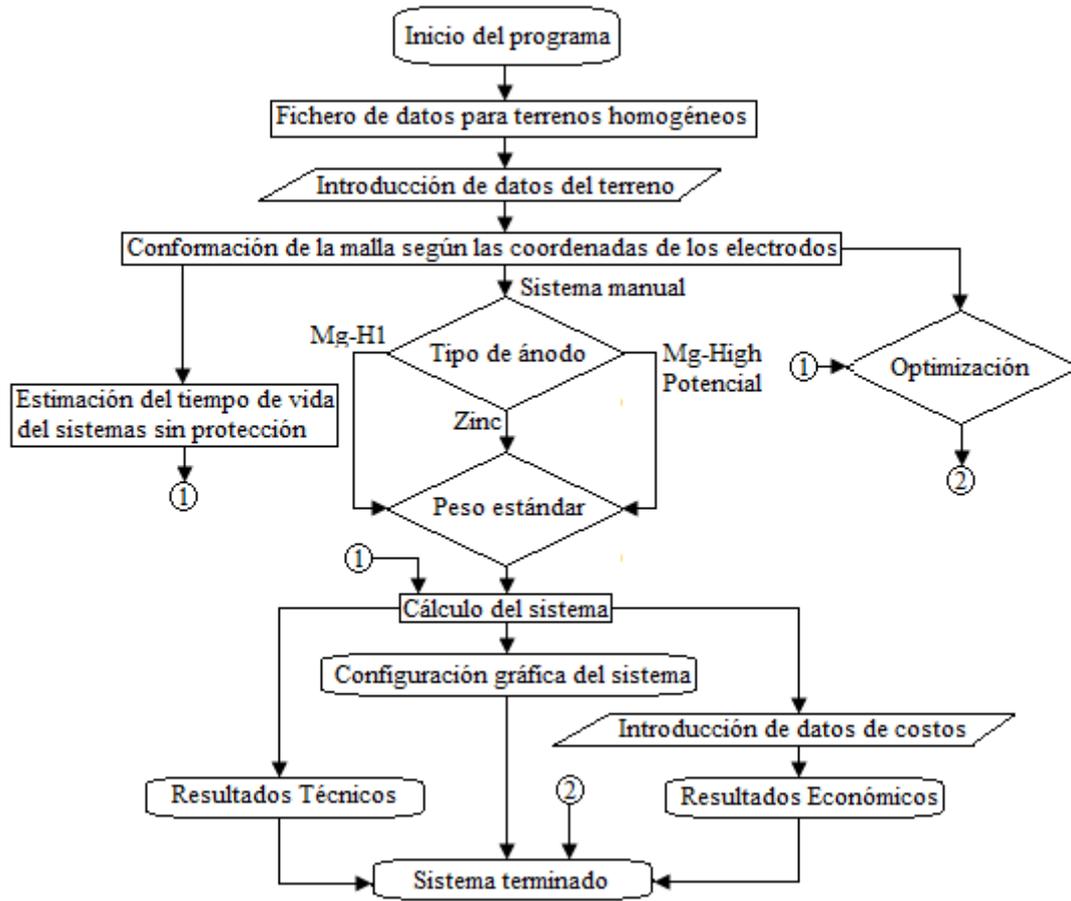


Figura 3: Diagrama de flujo general del programa [10].

### Metodología de cálculo

Para el estudio de un sistema de protección catódica mediante el ECMaT, se precisa de información técnica sobre la estructura a proteger y de los materiales a utilizar que en conjunto con las mediciones de campo (dimensiones y características de la malla, resistividad del medio, selección del material anódico, etc.), constituyen los datos fundamentales para la elaboración del diseño. Se debe tener en cuenta la especificación de la cantidad de ánodos por lecho, parámetro que introduce el usuario con el fin de perfeccionar el diseño posteriormente si es necesario. Téngase en cuenta que el programa actualmente no tiene implementado el método de estimación del tiempo de vida del sistema sin protección, elemento clave a la hora de lograr un mejor resultado óptimo (por dicha razón se incluye en el diagrama de flujo); por ahora, el ECMaT brinda al usuario la opción de establecer su propio diseño y optimizar en cuanto a costo de la instalación-tiempo de vida total de los ánodos (teniendo en cuenta la cantidad de ánodos por lecho) [10].

Matemáticamente se tienen en cuenta una serie de ecuaciones empíricas como ya se ha mencionado, las cuales proponen resultados cuantitativamente precisos y por consiguiente justifican las inversiones extras para lograr la eficiente protección del sistema. Dentro de las variables fundamentales en el diseño se emplean: tiempo de vida del lecho anódico, corriente drenada por el lecho y la cantidad de lechos a ubicarse (1)-(3).

$$T = \eta * Fu * \left( \frac{W_1 \alpha_T}{8760 * Id} \right) \quad [10] [12] (1)$$

$$I_d = \frac{\Delta V}{(R_{AS} + R_C)} \quad [3] [10] \quad (2)$$

$$m = \frac{I_t}{I_d} \quad [3] [10] \quad (3)$$

Donde:

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

$\eta$  = eficiencia de corriente del ánodo de sacrificio [3] [10].

$F_U$  = factor de utilización, generalmente 0.75 [3].

$W_I$  = peso del material anódico total por lecho (lb) [3]. Teniendo en cuenta el número de ánodos por lecho anódico.

$\alpha_T$  = salida de corriente por el material anódico (A-h/m).

8760 = número de horas en un año.

$I_d$  = corriente drenada por el lecho (A).

$R_{AS}$  = resistencia ánodo - suelo (ohm).

$R_C$  = resistencia total del conductor eléctrico (ohm).

$\Delta V$  = diferencia de potencial estructura - ánodo polarizado (V).

$$\Delta V = |E_A| - |E_M| - 0.1 \quad [3] [10] \quad (4)$$

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

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

0.1 = factor de polarización del ánodo [3].

$m$  = número de lechos anódicos [10].

$I_t$  = corriente total (A).

$$I_t = A * DC \quad [3] \quad (5)$$

$A$  = área a proteger (m<sup>2</sup>).

$DC$  = densidad de corriente de protección (A/m<sup>2</sup>).

$$DC = 73.73 - 13.35 \log \rho \quad [3] \quad (6)$$

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 (Mg-H1, Mg-*High Potencial* o Zinc) cuyas características se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Características de los ánodos de sacrificio [3] [10].

Características	Mg-H1	Mg- <i>High Potencial</i>	Zinc
Potencial (Cu/CuSO <sub>4</sub> )	-1.55	-1.75	-1.10
Eficiencia de corriente (%)	25 - 50	50	90
Salida de corriente (A-h/m)	250 - 500	500	335
Pérdida de peso real (lb/A-año)	35 - 17.5	17.5	26.2

Teniendo en cuenta que el presente estudio se hace con fines prácticos reales, es necesario tomar valores reales estándar de la geometría de ánodos de sacrificio comerciales; es este caso se hace referencia nuevamente al caso de ánodos de magnesio. En la Tabla 5 se observan valores de longitud y diámetro de dicho ánodo.

Tabla 5: Dimensiones estándar en ánodos de magnesio [3] [10].

Peso (Kg)	Diámetro	Longitud	Diámetro de la columna	Longitud de la columna*
4.09	0.085	0.355	0.202	0.659
5.45	0.114	0.304	0.202	0.608
7.72	0.114	0.43	0.202	0.734
14.5	0.142	0.519	0.228	0.823
22.7	0.2	0.405	0.279	0.709
27.2	0.128	1.52	0.215	0.215

\*Incluyendo el relleno dentro del lecho. Todos los valores de la tabla en (m).

### Ejemplo de estudio realizado

Se pretende proteger una malla de tierra de una subestación inmersa en un terreno con una resistividad de 120 Ω/m con 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 de cobre (11x11), con dimensiones 100 x 100 m. Los ánodos de sacrificio seleccionados son del tipo Mg-H1 con peso 7.72 Kg; cama anódica de yeso tipo A y conductor de cobre No. 14 AWG. Para la realización de este estudio no se incluyen electrodos verticales, los cuales constituyen medios pocos eficientes con respecto al uso de electrodos horizontales en el logro de potenciales permisibles y resistencia de puesta a tierra deseada; este criterio solamente se expresa como aclaración, puesto que no constituye objetivo en el presente estudio.

La representación gráfica obtenida por el programa se muestra en dos variantes mediante la Figura 4; la primera variante (a la izquierda), muestra el sistema de protección con un solo ánodo por cama anódica, mientras que la segunda variante (a la derecha), muestra el sistema de protección con dos ánodos por cama anódica (espaciados a 0.2 m).

Con el esquema gráfico del sistema de protección, el usuario puede calcular el tiempo de vida de la instalación atendiendo a la selección de ánodos y materiales que hizo previamente. Los resultados técnicos y económicos de este estudio se aprecian en la Tabla 6 a modo de resumen, en la cual se señala la diferencia entre los tiempos de vida y cantidad de camas anódicas usadas para cada variante.

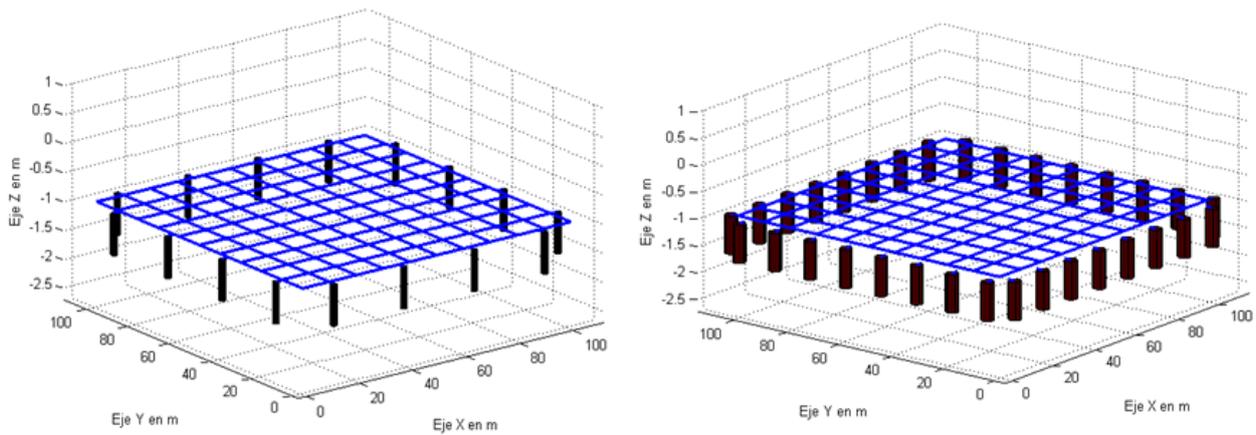


Figura 4: Distribución de los electrodos en la malla a proteger (variante 1 y 2).

Tabla 6: Resumen de resultados obtenidos.

	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>
<b>Tipo de ánodo</b>	Mg-H1	Mg-H1
<b>Número de camas anódicas</b>	16	32
<b>Espaciamiento entre camas (m)</b>	28	14.45
<b>Tiempo de vida total de las camas anódicas (años)</b>	3	<b>7</b>
<b>Corriente drenada por lecho (A)</b>	0.2396	0.1183
<b>Costo del sistema sin protección (\$CUC)</b>	14 104	
<b>Costo de la protección catódica (\$CUC)</b>	2 476.2	7540.56
<b>Incremento de la inversión (%)</b>	17	<b>53</b>

\*Valores de costos por unidades según [2] [13] adaptadas al CUC. Comparaciones de métodos en [10].

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

El resultado principal de la investigación, además de obtener un programa que permite el diseño de la protección catódica por ánodos de sacrificio contra la corrosión en subestaciones eléctricas, consiste en comprobar cuan eficiente es el método planteado usando ecuaciones empíricas adaptadas a sistemas de puesta a tierra reales. Retomando el objetivo del método: alargar el tiempo de vida de la instalación teniendo en cuenta un equilibrio económico, y empleando el ECMA<sub>T</sub>, se puede afirmar que el estudio resultó favorable, demostrado mediante las comparaciones finales de resultados en las cuales se observa que aunque exista la necesidad de incluir en el diseño del sistema mayor cantidad de materiales, elevando el costo del mismo, alargaría su tiempo de vida con respecto a no hacer uso de ellos. Es apreciable la diferencia del costo de construcción en un sistema sin protección el cual tendría un tiempo de vida limitado, con respecto al costo de un sistema protegido, siendo más elevado este último, pero se justifica por lograr un tiempo de vida muy superior que el desprotegido, implicando no tener que volver a reconstruir el sistema en caso de daños parciales o totales, especialmente teniendo en cuenta que la mayoría de los sistemas de puesta a tierra se encuentran bajo estructuras edificadas lo cual hace prácticamente imposible su sustitución. Es tarea del ingeniero que proyecta el sistema hacer un balance eficiente, porque aun teniendo herramientas computacionales las cuales dotan de mayor certeza al trabajo, existen variables geológicas y ambientales que no se pueden generalizar para todo proyecto, y por consiguiente no pueden ser tratadas por dichos medios diseñados para casos específicos.

## 6. CONCLUSIONES

El estudio de sistemas de puesta a tierra teniendo en cuenta variables químicas, implica un análisis de la corrosión producto de las mismas, el cual se facilitaría mediante el empleo de métodos computacionales como el ECMaT, que resultan de importancia relevante en el diseño del sistema. En la medida que avance la investigación, se desarrollará el algoritmo del ECMaT con el objetivo de realizar estudios predictivos del tiempo de vida en sistemas de puesta a tierra sin protección, logrando una mejor optimización económica también realizada por el mismo. Se recomienda dar seguimiento a este último criterio, ya que contribuye de manera futura inmediata al desarrollo de proyectos eléctricos insertados en la construcción.

## RECONOCIMIENTOS

Los autores quisieran agradecer de manera especial al Comité Científico del CONGRESO ALTAE 2017 por aportar nuevas soluciones al mundo de la ciencia en la Ingeniería Eléctrica, alcanzando cada día metas superiores en un mundo de cambios y expuesto a nuevas tecnologías, las cuales es nuestro deber poner en práctica de manera factible por el bien de la humanidad.

Al Profesor Titular, Dr. C. Ángel Cecilio Valcárcel Rojas por ser fuente de inspiración en jóvenes que lo tienen como ejemplo en el campo de la investigación, de la profesión docente y de la vida.

## REFERENCIAS

- [1]. MORGAN, J. H. *Cathodic Protection. Its Theory and Practice in the Prevention of Corrosion*. London, 1959. 3 p.
- [2]. OJEDA GIL, Victoriano Antonio. "Avances en la medida de la protección catódica de estructuras metálicas enterradas mediante métodos de desconexión cíclica". Director: Dr. José María Bastidas Rull. Tesis de doctorado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, UNED, Madrid, 2016.
- [3]. CANTOR RODRÍGUEZ, Jorge; PINZÓN CASALLAS, Nelson Aníbal. "Programa para el diseño de sistemas de protección catódica con ánodos de sacrificio". Director: Ing. Gustavo Vila Casado. Tesis en opción al Título de Ingeniero Químico, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1995.
- [4]. IDROVO NARANJO, M. P. "Estudio de corrosión en mallas de tierra". EPN, Quito, 2001.
- [5]. PEABODY, A. W. *Control of pipeline corrosion*. NACE, Houston, 1980.
- [6]. VILA, Gustavo. *Corrosión y control de corrosión*. Bogotá: Publicaciones Universidad Nacional de Colombia, 1990.
- [7]. MORGAN, J. H. *Cathodic Protection*. NACE (Segunda Edición), Houston, 1987.
- [8]. LAMBERT, P. "Cathodic Protection Solutions for Steel-Framed Heritage Buildings". Repair Bull. 2004.
- [9]. GIUDICE, Carlos A. "Protección catódica con ánodos galvánicos". Universidad Tecnológica Nacional, La Plata, 2002.
- [10]. GONZÁLEZ CABRERA, Raidel. "Protección de las mallas de tierra en subestaciones eléctricas contra la corrosión". Director: Ing. Víctor Rolando Jara González. Tesis en opción al Título de Ingeniero Eléctrico, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, 2017.
- [11]. SANTOS ABREU, Yenisey. "Protección contra corrosión en sistemas de puesta a tierra". Director: Dr. C. Ángel Valcárcel Rojas. Tesis en opción al Título de Ingeniero Eléctrico, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, 2014.
- [12]. SAFIULIN, Adgan; De LA CAMPA, Jorge; SÁNCHEZ, Cleto. "Protección catódica para estructuras metálicas utilizando ánodos de sacrificio". *Revista Tecnológica*, 1974, vol 2.
- [13]. COPEXTEL. Empresa de Servicios Técnicos especializados. [ref. 27 de septiembre 2017]. Disponible en Web: <https://www.copextel.com.cu/aplicaciones-energeticas>