

# Programa de computadora para diseñar mallas puestas a tierra en las subestaciones de potencia

*Pedro I. Ramírez Zeno*

*José L. Sierra*

Candidatos a graduación en ingeniería eléctrica, UPPR

## Sinopsis

Al presente la Autoridad de Energía Eléctrica de Puerto Rico (AEE) carece de un programa de computadora moderno, a base de los últimos métodos desarrollados para diseñar y analizar sistemas de mallas puestas a tierra en las subestaciones. Una preocupación de la AEE es que la configuración de mallas a tierra sea segura, duradera y que esté al nivel de las mejores del mundo. Por esta razón decidimos desarrollar un programa de computadoras para diseñar y analizar mallas puestas a tierra en las subestaciones, con los métodos modernos disponibles y usados en la industria en los Estados Unidos.

## Computer program to design grounding grids for power substations

### Abstract

As of today, the Puerto Rico Electric Power Authority (PREPA) does not have a modern computer program based on the latest technology to design and analyze grounding grids on power substations. One of the goals of PREPA is that the configuration of their grounding grids be safe, durable and comparable with the best in the world. For that reason we decided to develop a computer program to design and analyze grounding grids for power substations based on the latest technology used in the United States of America.

## Introducción

Las subestaciones de potencia se equipan con un arreglo de conductores desnudos colocados en la tierra para proteger al personal y el equipo. Este sistema de conductores, que se denomina malla puesta a tierra, se diseña para disipar las corrientes de falla y controlar los altos voltajes (con respecto a un punto lejano) que se generan sobre el terreno de la subestación. Esto es, si ocurre una falla dentro de los predios de la subestación hay que disipar la corriente de falla que se genera rápidamente hacia el terreno para evitar posibles daños tanto al personal como al equipo. En el proceso de disipar esta corriente de falla en el terreno, se generan altos niveles de voltaje sobre la superficie de la subestación, lo cual pone en peligro la seguridad del personal. El sistema de mallas a tierra controla estos niveles de voltajes. Para diseñar mallas puestas a tierra hay que considerar, entre otros, los siguientes aspectos:

- la resistencia del sistema de "tierra" diseñado, ya que a menor resistencia, mejor se disipa la corriente de falla
- los niveles de voltajes que puede tolerar un ser humano, de acuerdo a las características de la subestación
- los niveles de voltaje que se generan en la subestación, de acuerdo al sistema de mallas usado

## Método

Hay diferentes métodos para determinar todos los parámetros necesarios para diseñar mallas a tierra. Estos métodos se dividen en dos categorías principales: el método manual (IEEE, 1986) y el método por computadoras. Sin embargo, el método manual requiere innumerables cálculos (sumas, gráficas, tablas y otros), lo cual lo hace sumamente arduo y extenso. Por otro lado, varios investigadores de este tema han propuesto algoritmos para modelar los sistemas de mallas a tierra en computadoras. Por lo general, todos estos algoritmos se basan en lo siguiente aspectos:

- modelar todos los componentes del sistema de tierra
- formar un sistema de ecuaciones que describa la forma en que estos componentes interactúan
- resolver por la corriente de fuga que fluye de todos los componentes hacia la tierra
- calcular el potencial en cualquier punto sobre la superficie

Al presente sólo hay un algoritmo que toma en consideración todos los elementos que componen el sistema de tierra (conductores, electrodos, tuberías, placas metálicas y otros). Este algoritmo lo desarrolló el Instituto de Investigación de Potencia Eléctrica ("Electrical Power Research Institute", EPRI, por sus siglas en inglés). La Autoridad de Energía Eléctrica no puede usar este algoritmo porque no forma parte del grupo de industrias de potencia eléctrica que componen el EPRI. (Exhortamos a la Autoridad de Energía Eléctrica a entrar al EPRI para tener disponible todo el caudal de investigación y proyectos que genera anualmente esta prestigiosa institución.)

Luego de revisar toda la información disponible se decidió usar el algoritmo que presenta Hepe (1979), pero con las ecuaciones que presentan Loeloiuan, Velázquez y Mukhedkar (1985). Estas ecuaciones son el resultado de una revisión a las ecuaciones de Hepe (1979). Este algoritmo, aunque no considera el uso de electrodos verticales, es el más completo que está disponible en Puerto Rico. Es importante mencionar que, luego de un extenso estudio acerca de las mallas puestas a tierra, logramos conseguir información sobre el efecto que los electrodos verticales tienen en el sistema de "tierra". Parte de esta información se obtuvo de un artículo publicado por Thapar (1991), que señala que el uso de los electrodos verticales es insignificante si dichos electrodos miden menos de tres metros y que el no considerar el uso de electrodos de mayor longitud induce un error de alrededor de un 5% en el valor final de la resistencia del sistema. De otras investigaciones logramos entender el efecto de los electrodos verticales sobre el sistema de tierra.

### Algoritmo usado

De acuerdo a Heppel (1979), como primer paso hay que determinar la distribución de las corrientes de fuga dividiendo el sistema en segmentos de conductores rectos. Estos segmentos son los pedazos de conductores que se forman entre cada cruce (fig. 1). Luego hay que enumerar cada uno de estos segmentos, determinar su posición con respecto a los demás segmentos y determinar el tipo de segmento que es cada uno. El tipo de segmento se asigna de acuerdo a la longitud del segmento y su posición simétrica. Para cada tipo de segmento diferente hay una corriente de fuga diferente. Todos los segmentos similares aportan la misma cantidad de corriente de fuga.

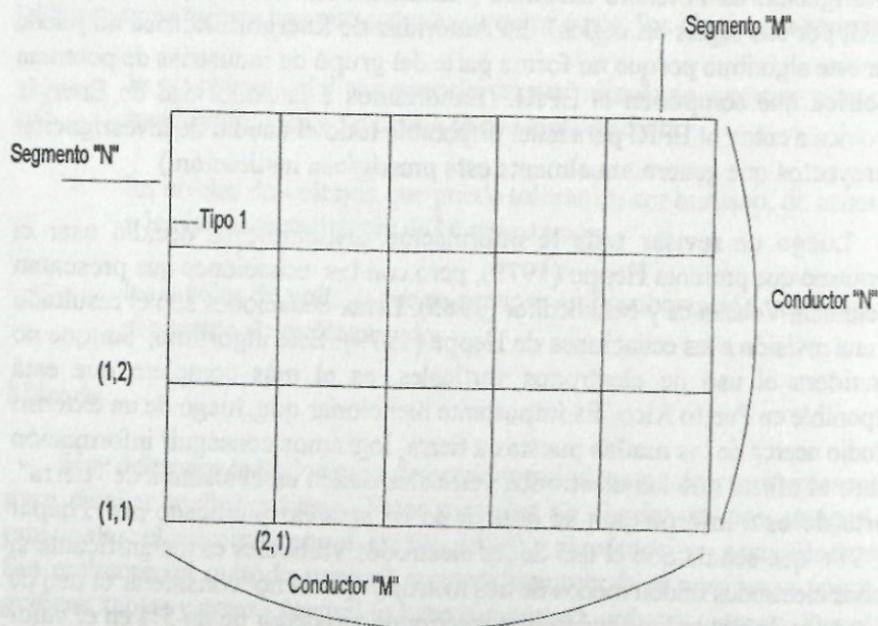


Figura 1. Ilustración del concepto de segmentos

Una vez se tiene toda la información acerca de cada segmento, se determina la resistencia mutua entre todos los segmentos del mismo tipo. La suma de dichas resistencias mutuas son los elementos de la diagonal principal de una matriz de resistencias ( $R_{11}, R_{22}, R_{33}, \dots$ ). La suma de las resistencias mutuas entre los segmentos de un tipo y los de otro tipo constituyen los restantes elementos dentro de la matriz de resistencias ( $R_{12}, R_{13}, R_{21}, R_{23}, \dots$ ). Para determinar la corriente de fuga que aporta cada tipo de segmento se multiplica el voltaje de la subestación por el inverso de la matriz de resistencias. El producto de estas corrientes de fuga y el total de segmentos de dicho tipo es la corriente de fuga total que aporta este tipo de segmento.

La corriente total que aporta el sistema es la suma de todas las corrientes de fuga de cada segmento. La resistencia del sistema de mallas a tierra es equivalente a la división del voltaje de la subestación entre la corriente total. Para determinar el voltaje respecto a un punto lejano se usa el teorema de superposición. Este voltaje se determina con las ecuaciones que presenta Heppe (1979), considerando la aportación de todos los segmentos del sistema. Todos estos pasos se logran estableciendo y desarrollando ecuaciones, procedimientos y subrutinas según se estime necesario. Los procedimientos desarrollados se explican en la secciones que siguen.

#### *Enumerar y definir cada segmento*

Para comenzar con la enumeración y definición de los segmentos hay que dar dimensiones a las variables de las posiciones de los segmentos. Se estableció un sistema cartesiano imaginario, el cual se encuentra en un plano paralelo al plano de la malla, con origen en el lado inferior izquierdo de la misma. En este plano imaginario, a los segmentos que se encuentran paralelos al eje de "Y" se les llama "N" y los segmentos paralelos al eje de "X" se denominan "M". Para numerar estos segmentos hay que suplirle al programa el número total de segmentos "N" y "M". Para esto se desarrollaron las siguientes ecuaciones:

$$\text{SEGN} = N * (M - 1) \quad (1)$$

$$\text{SEGM} = M * (N - 1) \quad (2)$$

donde SEGN y SEGM representan las sumas de todos los segmentos N y M, respectivamente. Una vez se tiene el número de segmentos totales hay que establecer la posición y el tipo de cada segmento y el número total de ecuaciones a resolver. Para establecer la posición de cada segmento con relación al plano imaginario se establece un ciclo que determina la posición inicial y final de todos los segmentos "N"; de igual manera se establece un ciclo para determinar la posición de todos los segmentos "M".

Luego de numerar cada segmento y establecer su posición, sólo resta determinar el tipo de cada segmento de acuerdo a su posición. Para lograr esto hay que saber el número total de tipos de segmentos diferentes en la malla. Como no todas las mallas tienen el mismo número de segmentos diferentes, esto se determina de acuerdo a la topografía de la malla utilizando las relaciones de líneas diferentes, segmentos diferentes por líneas y el total de ecuaciones a resolver. Toda la información referente a los segmentos de la malla se escriben en el archivo de datos denominado SEGMENT.DAT.

La subrutina DIFSEG, que se usa para determinar toda la información referente a los segmentos que componen la malla, calcula lo siguiente:

- el número total de segmentos
- la posición final e inicial de cada segmento
- el tipo de cada segmento

Estos datos se usan luego para determinar la resistencia propia de la malla con las ecuaciones de resistencia mutuas entre los conductores.

#### *Determinar corrientes de fuga.*

La segunda fase del método por computadoras se basa en determinar las corrientes de fuga que aportan todos los segmentos de un mismo tipo. Como todos los segmentos de un mismo tipo aportan a la misma corriente de fuga,

esta corriente se determina usando las resistencias mutuas y propias entre los segmentos de un mismo tipo. El método de Hepe (1979) proporciona unas ecuaciones que son el producto de una revisión de las tres principales fórmulas desarrolladas hasta el momento [(Loelouian, Velazquez y Mudhedkar, 1985), (Hepe, 1979) y Kouteynikoff)].

El programa que desarrollamos establece un ciclo que compara y determina las resistencias entre el primer segmento del tipo que está en la memoria de la computadora y todos los demás segmentos del mismo tipo dentro del archivo. De acuerdo a la orientación (paralela ó perpendicular) que haya entre este primer segmento y todos los demás segmentos del mismo tipo, se aplica la ecuación correspondiente. Con estos valores se establece una matriz de resistencias. Utilizando el voltaje de la subestación y aplicando el método de Gauss se determinan las corrientes de fuga. Estas corrientes de fuga se almacenan en un archivo y luego se usan para determinar los voltajes de contacto y de pisada.

El voltaje de contacto es es la diferencia en voltaje entre el voltaje máximo que puede obtener el tendido eléctrico relativo a una distancia de un punto lejano puesto a tierra cuando ocurre una anomalía en el sistema y el voltaje de la superficie cuando una persona que está de pie toca algún equipo de la subestación con las manos. El voltaje de pisada es la diferencia en voltaje de la superficie que experimenta una persona cuando sus pies están separados un metro en la superficie de la subestación.

Una vez se tienen los valores de las corrientes de fuga, se determina la corriente total que aportan todos los conductores de la malla. La corriente total es el producto del total de segmentos y la corriente de fuga. Con la corriente de fuga y el voltaje de la subestación se determina la resistencia propia del sistema de malla a tierra

$$R_{\text{malla}} = \frac{V_{\text{subestación}}}{I_{\text{total}}} \quad (3)$$

## Ramírez y Sierra/Programa diseñar mallas a tierra subestaciones

La subrutina GGRES permite determinar las resistencias propias y mutuas entre los segmentos que componen la malla, las corrientes de fuga de todos los diferentes tipos de segmentos y la resistencia propia del sistema de malla a tierra.

### *Voltajes en las mallas.*

Para calcular los voltajes en las mallas se desarrolló la subrutina MVOLT, que establece un ciclo para abrir y leer el archivo SEGMENT.DAT, que contiene la información de todos los segmentos. Cada vez que lee la información de un segmento, la subrutina determina la distancia que hay entre el punto donde se desea el voltaje de la malla y el segmento. Con el tipo de segmento, la subrutina lee del archivo SEGMENT1.DAT la corriente de fuga para ese segmento y con las distancias ya determinadas se aplican las ecuaciones (Heppe, 1979) para voltajes de superficie. Una vez el programa termina de leer todos los segmentos, el voltaje acumulado es el voltaje de superficie para ese punto específico. El voltaje de malla se consigue restándole ese voltaje de superficie al voltaje de la subestación; en otras palabras:

$$V_{\text{contacto}} = V_{\text{subestación}} - V_{\text{superficie}} \quad (4)$$

### *Voltajes de pisada.*

El voltaje de pisada se consigue con la subrutina SVOLT, la cual calcula las diferencias de voltaje entre dos puntos a un metro de distancia en la dirección de X y en la dirección de Y. Estas diferencias se denominaron  $dv/dx$  y  $dv/dy$ . El voltaje de pisada se consiguió con la siguiente ecuación:

$$V_{\text{step}} = \sqrt{\left(\frac{dv}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dv}{dy}\right)^2} \quad (5)$$

El voltaje de pisada máximo se acumula en una variable. Al concluir el ciclo, el voltaje máximo hasta el momento es el voltaje de pisada. El programa establece un ciclo que fija a una posición de X mientras aumenta la posición de Y. Estas posiciones de X y de Y se pasan a la subrutina MVOLT, que determina el voltaje de superficie. De igual manera se establece un ciclo para aumentar la posición de X. Una vez se finalizan ambos ciclos, se determina el voltaje de pisada como el voltaje máximo encontrado.

### *Tolerancia*

Luego de calcular los voltajes de contacto y de pisada, hay que obtener los valores tolerables para estos voltajes. Para conseguir estos valores hay que considerar lo siguiente:

- la corriente de falla máxima
- la resistividad del terreno y del material de la superficie
- el radio de los conductores
- la profundidad del tendido eléctrico
- el tiempo aproximado en el cual se espera eliminar la avería

Con los datos provistos por el usuario el programa determina los valores tolerables de voltaje de contacto y de pisada para cada malla.

### *Gráficas de perfil de voltaje*

El programa se desarrolló con la capacidad para mostrar gráficas de perfiles de voltajes a lo largo de la malla en las direcciones horizontal, vertical, y diagonal. Mediante el uso de la subrutina MVOLT y de acuerdo a la orientación que escoja el usuario, se establece un ciclo para aumentar las posiciones de X o Y, según sea el caso. Los voltajes calculados se almacenan en la memoria de la computadora y se envían a la subrutina VPROF, la cual

## Ramírez y Sierra/Programa diseñar mallas a tierra subestaciones

determina el voltaje máximo y mínimo de la serie. La subrutina VPROF también establece los límites de la pantalla de gráfica y dibuja estos voltajes en la pantalla.

### Resultados obtenidos con el uso del programa GGDES

El programa para diseño de mallas a tierra GGDES determina la siguiente información en cada corrida:

- la resistencia del sistema de "tierra"
- los voltajes tolerables de contacto y de pisada
- los voltajes de contacto y de pisada máximos dentro del área del "grid"
- el potencial máximo dentro de la subestación (GPR)
- la longitud total de los conductores utilizados en la malla
- el número total de conexiones usadas en la malla
- las gráficas de perfil de voltaje
- la capacidad para generar los datos necesarios para construir las gráficas de perfil de voltaje sobre la malla, en tres dimensiones

### Conclusiones

El objetivo principal de este proyecto fue desarrollar un programa de computadoras para diseñar mallas puestas a tierra que la Autoridad de Energía Eléctrica pueda usar. La AEE estudia la posibilidad de utilizar nuestro programa.

Sin embargo, entendemos que nuestro programa se puede mejorar en el futuro con las siguientes adiciones:

- conseguir un algoritmo que considere los electrodos verticales
- desarrollar otro programa que se pueda interconectar a GGDES que analice las diferentes capas del terreno para determinar un valor medio de resistividad utilizando los modelos de iteración

Alentamos a futuros estudiantes a continuar con esta interesante investigación incorporando al programa GGDES estas adiciones.

#### Referencias

Heppe, R., 1979, "Computation of Potential at Surface Above an Energized Grid or other Electrode, Allowing for Non-Uniform Current Distribution", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No. 6, Nov-Dec.

IEEE, 1986, " IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", IEEE Standard 80

Loeloiuan, M., Velázquez, R., Mukhedkar, D., 1985, "Review of Analytical Methods for Calculating the Performance of Large Grounding Electrodes Part II: Numerical Results", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 11, November.

Thapar B., 1991, "Evaluation of Ground Resistance of a Grounding Grid of any Shape", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 2, April

## Apéndice I

### Ejemplo del análisis de una malla a tierra utilizando el programa GGDES

El siguiente ejemplo demuestra la utilidad de nuestro programa para analizar y diseñar mallas puestas a tierra. El ejemplo se basa en el análisis de un tendido eléctrico con las siguientes características:

- cubre un área de 100 \* 100 metros
- cuatro conductores norte-sur y cinco conductores este-oeste
- resistividad del terreno de 100 Q-m
- corriente máxima de falla de 15,000 amperios
- tiempo que dura la falla de 0.15 segundos
- voltaje máximo de la subestación de 38,000 voltios

La malla a analizarse tiene las siguientes características:

- el tendido estará a una profundidad de 1.5 (m) bajo la superficie del terreno
- la gravilla a utilizar sobre la superficie del terreno es "clean limestone" cuya resistividad aproximada es de 2912 Q-m
- la capa de gravilla será de 6" de profundidad.

A continuación se resumen los resultados obtenidos en el ejemplo.

Parámetro	Resultado
Voltaje de contacto permitido	1,321 voltios
Voltaje de pisada permitido	4,384 voltios
voltaje de contacto máximo	2,694 voltios
voltaje de pisada máximo	6,464 voltios
resistencia del sistema de "tierra"	0.511 ohmios - metro
largo total de conductor utilizado	900 metros
total de uniones	20