

# ESTUDIO DEL POTENCIAL DE ACOPLAMIENTO ENTRE ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA CERCANOS

Ing. Javier Iñiguez I.

Ing. Paúl Ayora G.\*  
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

## ABSTRACT.

The coupling of earth electrodes installed very closed one of each other may produce hazardous potential differences when one of them dissipates a high current originated on a lightning stroke or a shortcircuit. This paper analyses the dissipation of shortcircuit currents, i.e. a 60 Hz current, considering the electromagnetic approach as a quasi static problem and it uses a computer program that solves Laplace equation by the finite differences method for two horizontal electrodes embedded in a homogeneous media (earth) and it displays the field map of equipotential lines. Furthermore, the curvilinear squares method is employed to define the lines of flux currents that are also displayed on the screen.

A commentary of the electromagnetic fields attained is made.

## RESUMEN.

El acoplamiento entre electrodos independientes de puesta a tierra cercanos puede producir diferencias de potencial peligrosas cuando uno de ellos disipa una alta corriente originada por un rayo o cortocircuito. Se analiza la disipación de corrientes (60 Hz) de cortocircuito por uno de ellos, considerándolo como un problema electromagnético cuasiestático y se aplica un programa computacional que resuelve la ecuación de Laplace por el método de diferencias finitas para dos electrodos horizontales embebidos en un medio homogéneo (tierra), despliega el mapa de campo de líneas equipotenciales, además se emplea el método de los cuadrados curvilíneos para determinar las líneas de flujo de corriente. El caso cuando el electrodo que no disipa corriente tiene un potencial fijo, también es analizado.

Finalmente se realiza un comentario de los resultados gráficos alcanzados.

Documento presentado en las XVII Jornadas de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, junio de 1997.

## INTRODUCCION.

Históricamente, los fabricantes de computadoras y otros equipos sensitivos han requerido que sus equipos sean puestos a tierra mediante un sistema de puesta a tierra aislado, separado del sistema de puesta a tierra de potencia eléctrica. Esto fue empleado para aislar las computadoras del sistema de puesta a tierra del equipo de potencia, que se lo considera y es: ruidoso, capacitivo y con corrientes de fuga abundantes.

Un fabricante de computadoras para control de procesos y sistemas de control de distribución requiere de cuatro sistemas de conexiones de puesta a tierra diferentes:[1]

- El primer sistema se "llama varillas de seguridad de puesta a tierra AC" (principales). Este es el sistema de puesta a tierra de la NEC, de EEUU.
- El segundo sistema, es de "varillas de puesta a tierra de rayos".
- El tercer sistema, es llamado "varillas de puesta a tierra de referencia de computadoras".
- El cuarto está aislado, llamado como "varillas de puesta a tierra de referencia maestro".

El flujo de corriente que emerge de un electrodo de tierra y luego se difunde por ella, al alcanzar a otros electrodos embebidos en la tierra los cambia de potencial, produciendo una diferencia de voltaje entre estos electrodos acoplados por la tierra. El presente estudio analiza los parámetros que influyen en este acoplamiento con miras a controlar (de manera estática) estas diferencias de potencial, para lo cual se desarrolló un programa computacional adecuado que permite este estudio.

## PRESENTACION GENERAL DEL PROBLEMA.

El problema general consiste en

encontrar el mapa de campo eléctrico, (denominado simplemente campo), conformado tanto por las líneas de flujo de corriente, cuanto por las líneas equipotenciales entre dos electrodos de puesta a tierra cercanos.

Cuando una corriente emerge de un electrodo de tierra (electrodo fuente) y luego se difunde, al alcanzar otro electrodo de potencial flotante (electrodo flotante) embebido en la tierra, lo cambia de potencial; este segundo electrodo se convierte en una equipotencial y a la vez esta nueva condición influye sobre el primer electrodo haciendo que en éste se produzca una redistribución de la densidad de corriente.

Lo expuesto anteriormente le convierte en un problema que en Teoría Electromagnética se conoce como "problema con condiciones mixtas", debido a que no se conoce el potencial inducido en el segundo electrodo de puesta a tierra, al mismo tiempo que se constituye en una de las condiciones de frontera para resolver el problema.

### SOLUCION DEL PROBLEMA.

Para la resolución del problema se ha escogido un corte transversal a la superficie de tierra, el cual va a constituir la región estudiada, la que debe estar en función de las dimensiones del sistema de puesta a tierra[2], según lo muestra la Fig. 1.

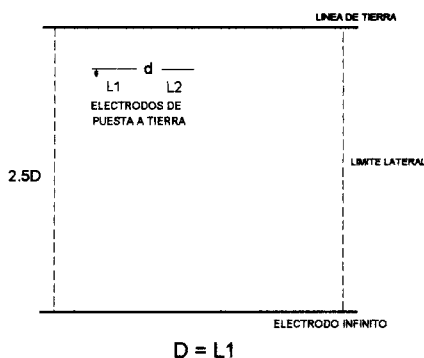


Fig. 1 Condiciones del problema

Una malla o mallas de puesta a tierra pueden ser adecuadamente representadas cada una por un disco equivalente, y para realizar un análisis bidimensional del mismo en el sector más crítico, se efectúa un corte vertical doble, formando una lámina vertical muy delgada que contiene apenas los centros de cada disco (lámina de solución). El mismo efecto se lograría si en la lámina los conductores se representan como cilindros enterrados en posición horizontal. Los valores así encontrados deberán

ser luego multiplicados por factores de escalamiento para ser aplicados a las mallas de puesta a tierra mediante el uso del respectivo disco equivalente.

Como electrodos básicos se emplearán entonces dos conductores horizontales, paralelos a la superficie de la tierra y con una dirección axial horizontal similar.

Es menester conocer las características de los electrodos de puesta a tierra tales como: profundidad a las que se encuentran enterrados, la distancia de separación entre ellos y dimensiones de los mismos.

El estudio se realizará considerando suelo homogéneo, con su resistividad conocida.

Se debe tener presente la existencia de un electrodo infinito de potencial cero a una distancia de la superficie de tierra adecuada y que es función del tamaño del electrodo en el que ocurre la descarga de corriente de falla (o de rayo) a tierra. En el presente caso se lo toma verticalmente a una profundidad 2.5 veces el tamaño del electrodo [2] y, horizontalmente sin límites, a través del manejo matemático del problema. (ver figura 1)

El electrodo en el que ocurre la descarga de corriente hacia la tierra se le asigna un potencial referencial del 100%.

En las ecuaciones de Maxwell la variación del tiempo de los campos ( $B$  o  $H$  y  $E$  o  $D$ ) son producidos en una región en donde la carga y las fuentes de corriente están variando con el tiempo.

Cuando las variaciones de los campos en el tiempo no son muy rápidas, como en el caso de las corrientes de 60 Hz, entonces la densidad de corriente  $J$  está variando lentamente con el tiempo, y una primera aproximación para el campo  $E$  puede ser obtenida al asumir campos cuasi-estáticos.

Como consecuencia, se produce un desacoplamiento entre campo eléctrico y magnético debido a que la diferencial en el tiempo de las ecuaciones de Maxwell serán cero, con lo cual se reducen a las ecuaciones de la electrostática.

El potencial es un dato básico para obtener cualquier información que se desee acerca del campo electrostático en algún punto. La intensidad del campo eléctrico se puede

encontrar a partir del potencial por medio del operador gradiente, y la intensidad del campo eléctrico se puede utilizar para encontrar la densidad del flujo eléctrico, la divergencia de la densidad del flujo da la densidad de carga volumétrica, y se puede obtener rápidamente la densidad de carga superficial sobre cualquier conductor en el campo, evaluando la densidad de flujo en la superficie.

La meta será encontrar primero el potencial. Esto no se puede lograr por medio de una configuración de carga en un problema práctico pues no se conoce cómo están distribuidas las cargas. Como datos sólo se dispone de la posición de varios objetos conductores, sus fronteras conductoras y diferencia de potencial entre un conductor -fuente de la corriente- y la referencia situada en el infinito. En estas condiciones es válido plantear:

$$\nabla^2 \phi = 0$$

(ec. 1)

La ecuación 1 es la de Laplace y para su resolución se puede emplear el sistema de coordenadas ortogonales cartesianas y un método iterativo; en este caso se usa el método de las diferencias finitas y de esta forma se determinan las líneas equipotenciales. Aplicando el método de los cuadrados curvilíneos se encuentran las líneas de flujo de corriente y una vez obtenido el mapa de campo completo se puede determinar la resistencia entre los dos electrodos.

Conforme puede observarse más adelante (Fig. 2) un único electrodo (fuente única de la difusión de la corriente en la tierra) genera un campo condicionado solamente por los límites de frontera del problema.

La presencia del electrodo flotante distorsiona el campo inicial (Figs. 2 a 13) en mayor o menor grado dependiendo de la longitud del electrodo flotante y de su separación al primero.

El electrodo flotante, embebido en el campo del electrodo fuente, no es fuente ni sumidero de corriente, es decir su divergencia de corriente es cero. Aunque la divergencia en el volumen ocupado por el segundo electrodo es cero, la presencia de éste como un elemento equipotencial se traduce en una distorsión del campo la cual a su vez incide en una redistribución de la emisión de corriente por parte del electrodo fuente, haciendo que la

densidad de corriente -ya inicialmente heterogénea- se desuniformice aun más.

Estos condicionantes del problema son comentados más adelante.

El campo distorsionado es obtenido por una segunda solución de la ecuación de Laplace, pero ahora tomando en consideración el potencial del electrodo flotante que, pesimísticamente, se lo hace coincidir con el del punto más alejado de este electrodo respecto al electrodo fuente.

Para el análisis del problema se emplea una malla de tierra típica de la empresa eléctrica local.

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

Los resultados del programa fueron contrastados con resultados obtenidos mediante simulación analógica, encontrándose una buena concordancia.

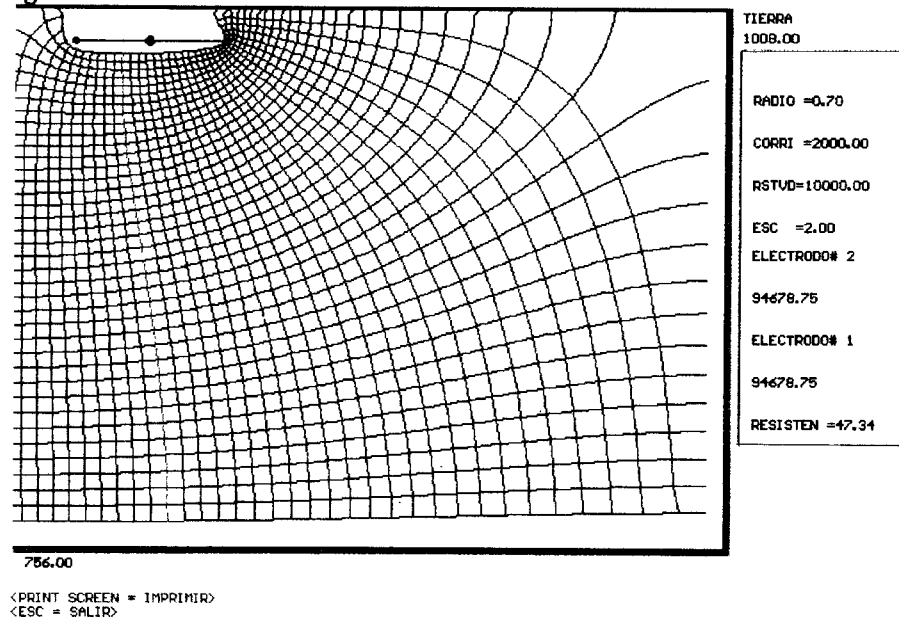
El análisis total del problema tiene limitaciones al considerar una sola lámina de solución. El proceso podría repetirse girando el plano de solución hasta cubrir los 90°, pero el resultado del sector más afectado nos da una buena idea de la situación del campo eléctrico.

Los valores de voltaje y de resistencia de puesta a tierra obtenidos por medio del programa son muy próximos a los que se pueden calcular por medio de ecuaciones particulares, y así mismo se los podría expandir hasta encontrar la solución total.

El método de segmentación aplicado al electrodo fuente (división del electrodo en pequeños segmentos iguales) para el cálculo del potencial sobre el mismo y la resistencia de puesta a tierra[2], proporcionará resultados más exactos mientras mayor sea el número de segmentos utilizados, y esto dependerá mucho de la escala con la que se trabaje, ya que el programa asume internamente el número de segmentos a utilizarse para dicho cálculo.

De las pruebas realizadas se puede concluir que, la profundidad de enterramiento es un factor determinante en la presencia de concentración de potencial sobre la superficie de tierra, agravando el voltaje de paso, ya que esta concentración aumenta cuando disminuye la profundidad de enterramiento del electrodo. (Figuras 2 y 8)

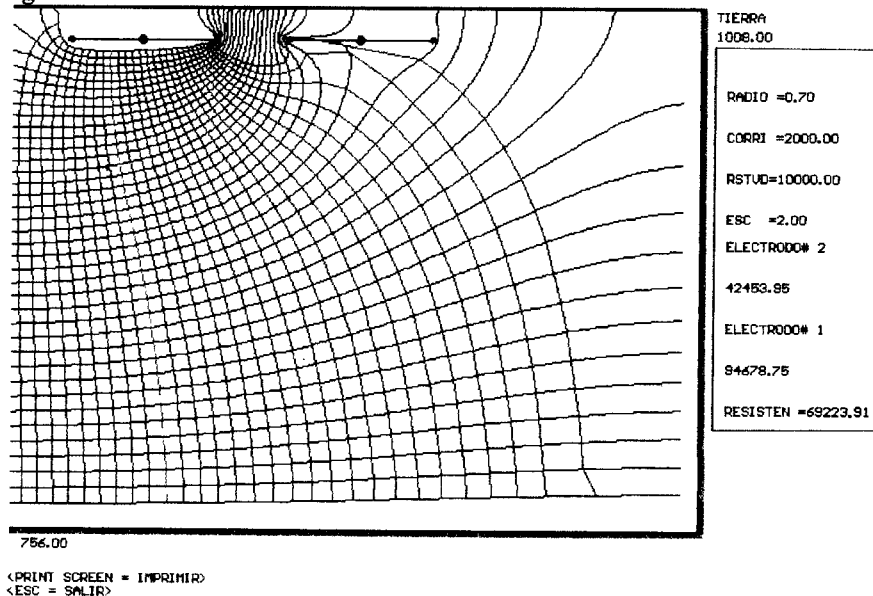
Fig. 2.



## MAPA DE CAMPO ENTRE DOS ELECTRODOS

Electrodo de puesta a tierra horizontal de longitud 2.1m a una profundidad de enterramiento de 0.5m.  
Campo extendido hacia la derecha.

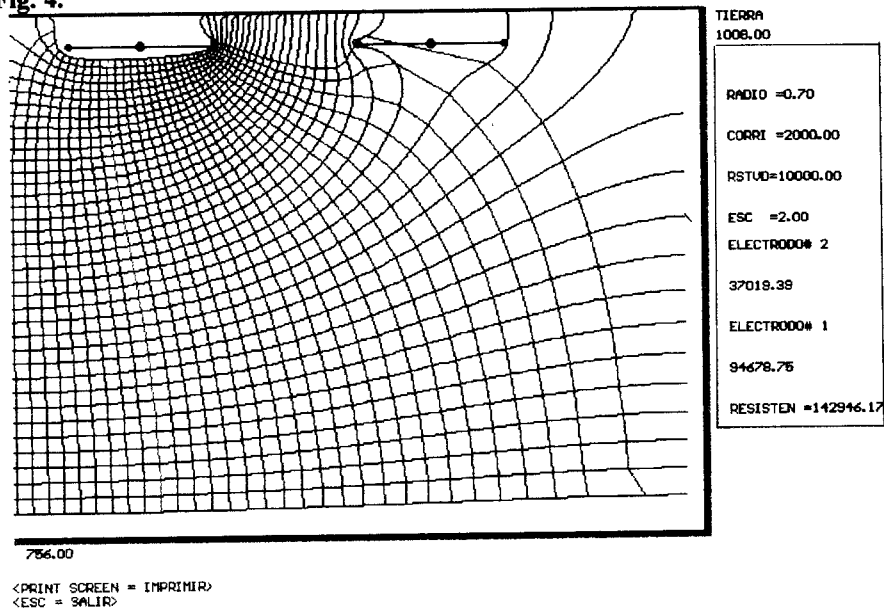
Fig. 3.



## MAPA DE CAMPO ENTRE DOS ELECTRODOS

Dos electrodos de puesta a tierra horizontales de longitud  $L=2.1\text{m}$  separados  $L/2$  a una profundidad de enterramiento de 0.5m.

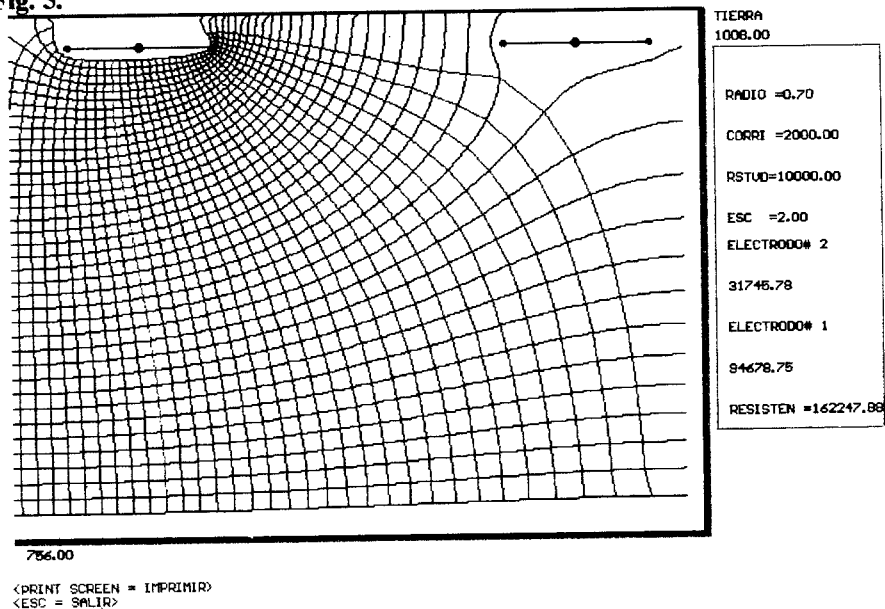
Fig. 4.



## MAPA DE CAMPO ENTRE DOS ELECTRODOS

Dos electrodos de puesta a tierra horizontales de longitud  $L=2.1\text{m}$  separados  $L$  a una profundidad de enterramiento de  $0.5\text{m}$ .

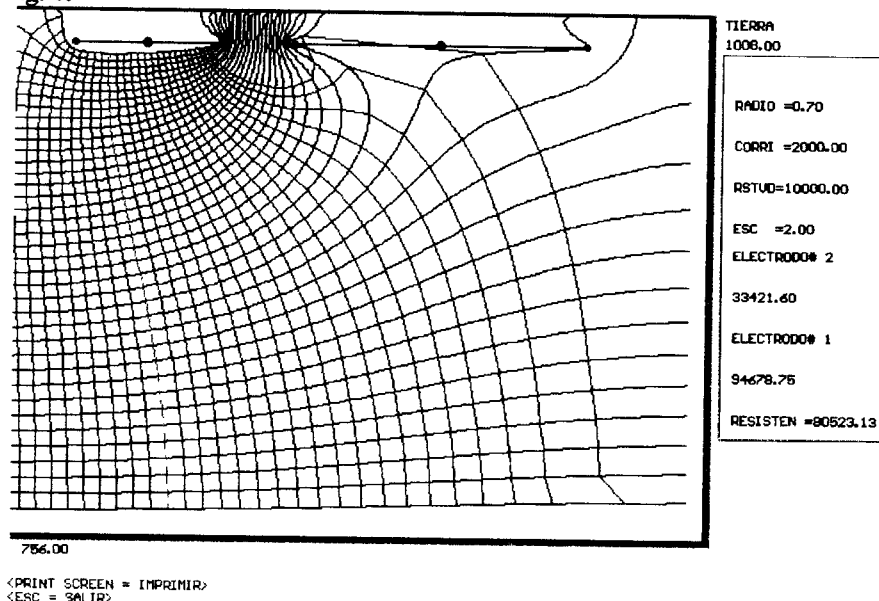
Fig. 5.



## MAPA DE CAMPO ENTRE DOS ELECTRODOS

Dos electrodos de puesta a tierra horizontales de longitud  $L=2.1\text{m}$  separados  $2L$  a una profundidad de enterramiento de  $0.5\text{m}$ .

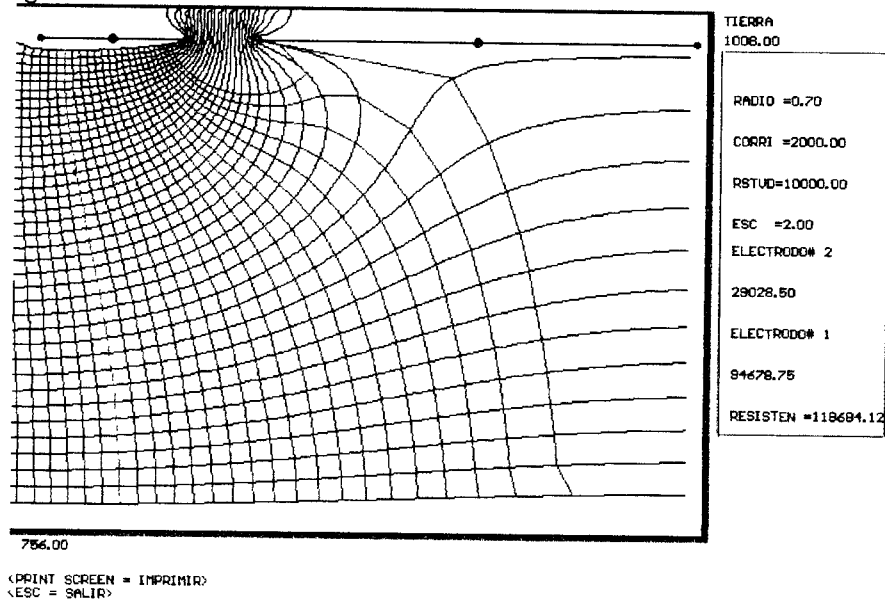
Fig. 6.



## MAPA DE CAMPO ENTRE DOS ELECTRODOS

Dos electrodos de puesta a tierra horizontales de longitudes  $L1=2.1\text{m}$  y  $L2=2*L1$  separados  $(L1)/2$  a una profundidad de enterramiento de  $0.5\text{m}$ .

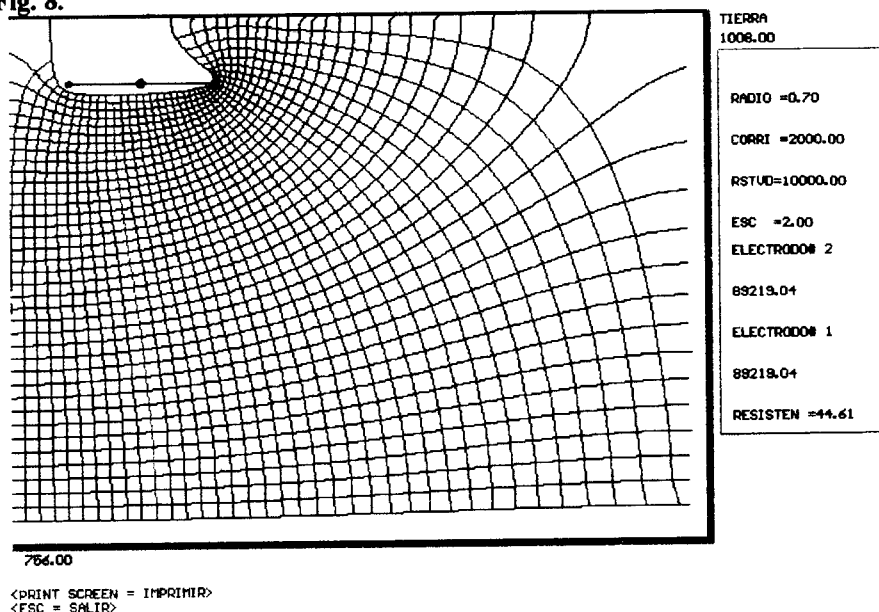
Fig. 7.



## MAPA DE CAMPO ENTRE DOS ELECTRODOS

Dos electrodos de puesta a tierra horizontales de longitudes  $L1=2.1\text{m}$  y  $L2=3*L1$  separados  $(L1)/2$  a una profundidad de enterramiento de  $0.5\text{m}$ .

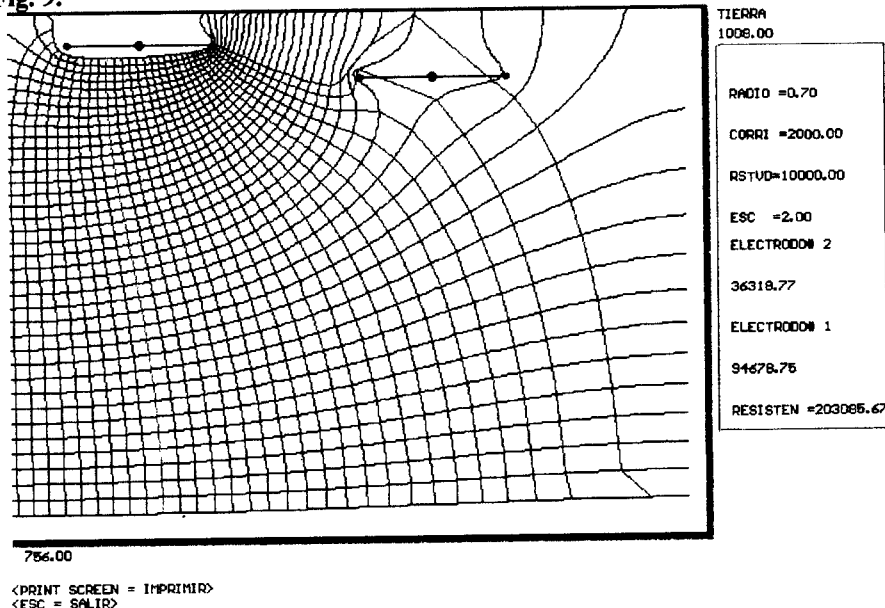
Fig. 8.



## MAPA DE CAMPO ENTRE DOS ELECTRODOS

Electrodo de puesta a tierra horizontal de longitud 2.1m a una profundidad de enterramiento de 1m.  
Campo extendido hacia la derecha.

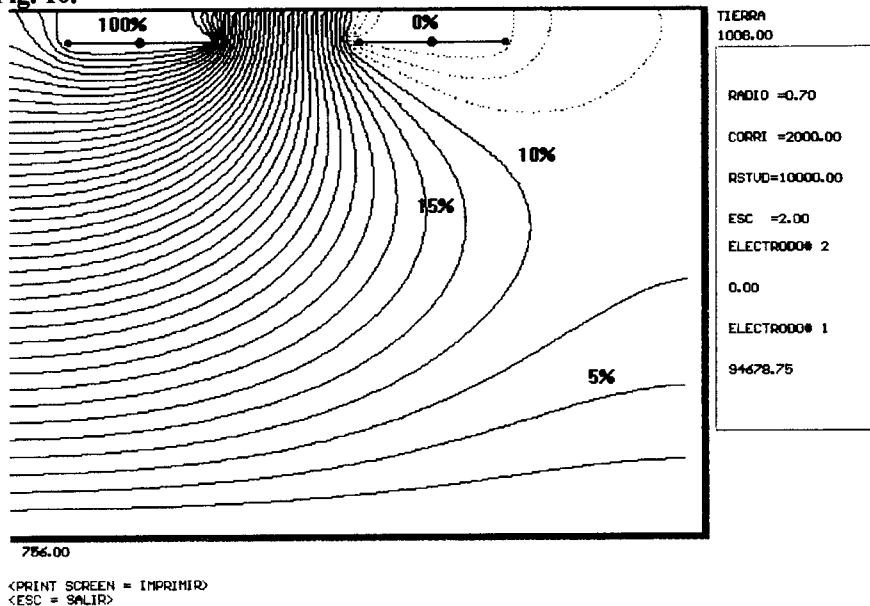
Fig. 9.



## MAPA DE CAMPO ENTRE DOS ELECTRODOS

Dos electrodos de puesta a tierra horizontales de longitud  $L=2.1m$  separados  $L$  a profundidades de enterramiento de 0.5m y 1m.

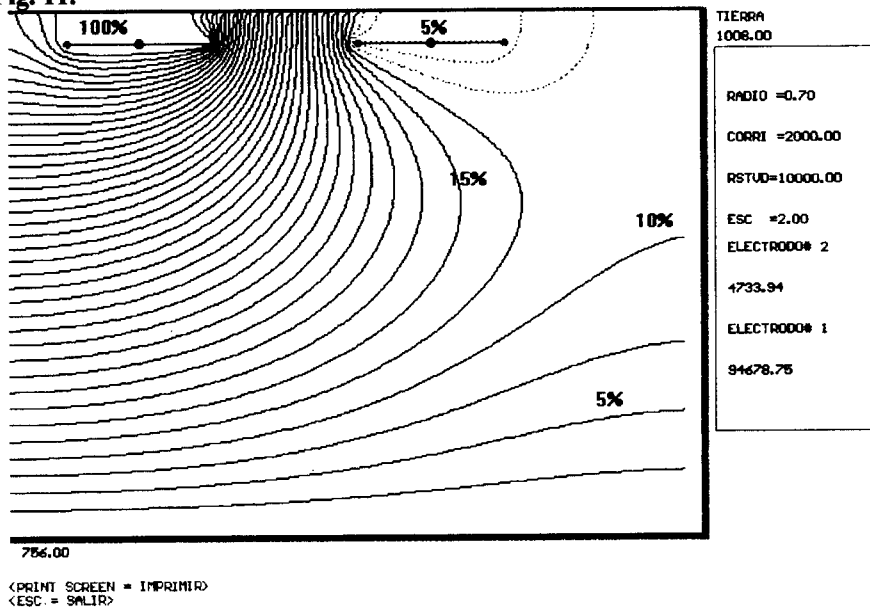
Fig. 10.



## EQUIPOTENCIALES ENTRE DOS ELECTRODOS

Dos electrodos de puesta a tierra horizontales de longitud  $L=2.1\text{m}$  separados  $L$  a una profundidad de enterramiento de  $0.5\text{m}$  con un potencial transferido al segundo electrodo de  $0\%$ .

Fig. 11.

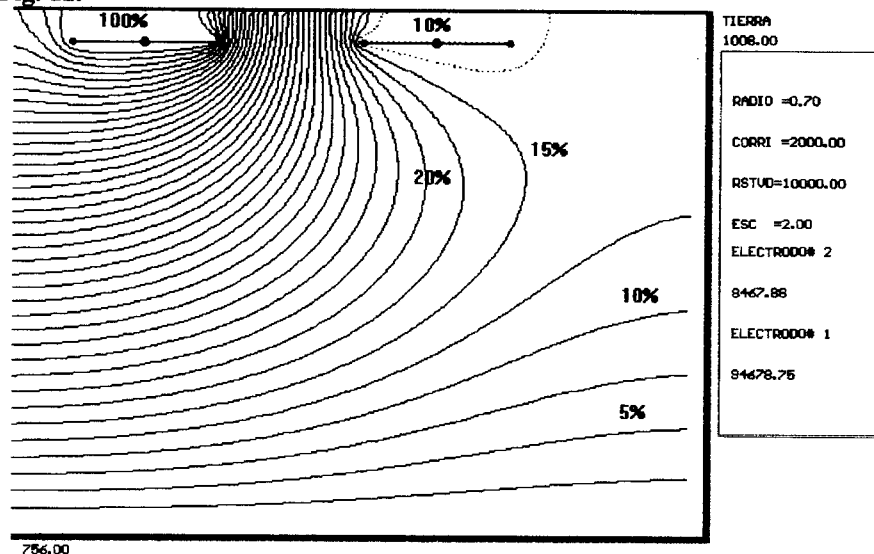


## EQUIPOTENCIALES ENTRE DOS ELECTRODOS

Dos electrodos de puesta a tierra horizontales de longitud  $L=2.1\text{m}$  separados  $L$  a una profundidad de enterramiento de  $0.5\text{m}$  con un potencial transferido al segundo electrodo de  $5\%$ .



Fig. 12.

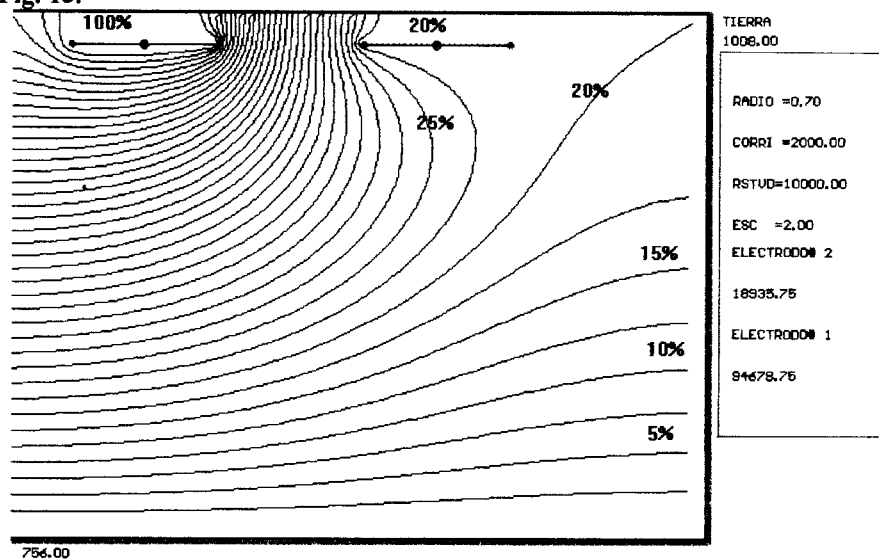


<PRINT SCREEN = IMPRIMIR>  
<ESC = SALIR>

## EQUIPOTENCIALES ENTRE DOS ELECTRODOS

Dos electrodos de puesta a tierra horizontales de longitud  $L=2.1\text{m}$  separados  $L$  a una profundidad de enterramiento de  $0.5\text{m}$  con un potencial transferido al segundo electrodo de  $10\%$ .

Fig. 13.



<PRINT SCREEN = IMPRIMIR>  
<ESC = SALIR>

## EQUIPOTENCIALES ENTRE DOS ELECTRODOS

Dos electrodos de puesta a tierra horizontales de longitud  $L=2.1\text{m}$  separados  $L$  a una profundidad de enterramiento de  $0.5\text{m}$  con un potencial transferido al segundo electrodo de  $20\%$ .

Por medio del programa se pudo conocer que -para las condiciones analizadas- el efecto del potencial inducido en el electrodo flotante sobre la redistribución de la densidad de corriente en el primer electrodo, es muy pequeña y puede ser despreciado en el análisis, por lo cual la solución de la ecuación de Laplace es suficiente para resolver el problema planteado.

Los resultados (aunque no dan la solución total del problema) indican que la "atenuación" del voltaje inducido en el electrodo flotante, por efecto de la separación, es alta y que una pequeña separación al electrodo fuente puede ser suficiente para considerar desacoplados o independientes a los dos electrodos, esto contradice la práctica recomendada por ciertas normas. Véase las figuras 3, 4 y 5 y note que una separación  $L/2$  (fig. 3) origina un potencial inducido del 45%, en tanto que si se cuadruplica esta separación (fig. 5) este voltaje se reduce solo al 32%.

Como era previsible, la separación entre electrodos es un factor importante tanto en la concentración de campo entre ellos, como del voltaje inducido en el electrodo flotante. Esta primera influencia se traduce en voltajes de paso en la superficie mayores cuanto más cercanos se encuentren los dos electrodos, véase las figuras 3, 4 y 5.

La influencia del tamaño del electrodo flotante, que transfiere un potencial lejano y lo concentra en las cercanías del electrodo fuente, es muy observable en las figuras 3, 6 y 7.

El voltaje inducido en el electrodo flotante es influenciado simultáneamente por la separación entre electrodos y el tamaño del flotante. Nótese el efecto final en los voltajes de paso al comparar las figuras 3, 4 y 5, y 3, 6 y 7, en el primer caso el efecto único de la separación es el dominante, en tanto que en el segundo lo es el tamaño.

En los márgenes usuales de instalación de los electrodos, la diferencia en la profundidad de enterramiento entre ellos no es importante. (Véase figuras 4 y 9)

Cuando el electrodo flotante deja de ser tal y se fija su voltaje (véase figuras 10, 11, 12 y 13) la concentración del campo aumenta, compare las figuras 10 con 11, 10 con 12, 10 con 13 y 10 con 4 en las que los potenciales de los electrodos flotantes varían del 0%, 5%, 10%, 20% y 37% respectivamente. Nótese que la separación del electrodo flotante puede producir

un efecto del mismo orden que el fijar el potencial de este segundo electrodo, así compárese las figuras 3 y 10, en las que los voltajes de paso son más críticos agudizándose en la fig. 3, aunque el segundo electrodo sea de potencial flotante (y que llega a un 37%); el caso extremo sería por supuesto el de electrodos muy cercanos y el segundo electrodo con un potencial fijo.

El uso de descargadores empleados como ecualizadores de voltaje conectados entre electrodos independientes se justifica sólo por mediciones de potencial en el terreno.

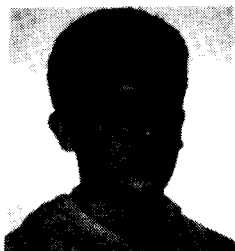
Al asumir laplaciano el campo, la importancia numérica de la resistividad del suelo en el acoplamiento no es determinante, pero si lo es para el cálculo de potencial en voltios o de resistencia.

El acoplamiento por tierra entre electrodos considerados independientes, aunque puede ser reducido, indica que el empleo de tierras independientes para computadores o con otros fines similares se justifica suficientemente.

## BIBLIOGRAFIA.

- [1] Zipse Donald W, "Grounding for Process Control Computers and Distributed Control Systems: The National Electrical Code and Present Grounding Practice", IEEE Trans. Ind. Appl, vol 1A-23, No- 3, may - jun 1987, pp 417 - 421.
- [2] Iñiguez Javier, "Estudio del Potencial de Acoplamiento entre Electrodos de Puesta a Tierra Cercanos", Tesis de Grado EPN, Quito, 1997.
- [ 3 ] Dawalibi F, Mukhedkar D, Bensted D, "Measured and Computed Current Densities in Buried Ground Conductors", IEEE Transactions, Vol PAS - 100, No 8, August 1981, pp 4083 - 4090.
- [ 4 ] Seely Samuel, "Introduction to Electromagnetic Fields", 1958.
- [ 5 ] Jhonk Carl T.A, "Teoría Electromagnética", 1990.
- [6] Ayora G. Paúl A, "Apuntes de Alto Voltaje II", EPN, Quito, 1993.
- [7] IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Comercial Power Systems, IEEE Standard 142 - 1991.
- [ 8 ] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding , IEEE Standard 80 - 1986 .
- [ 9 ] IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment, IEEE Standard 1100 - 1992.

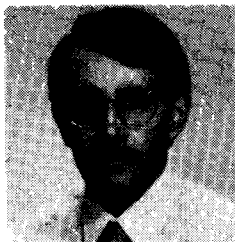
**ING. JAVIER IÑIGUEZ I.** Nació en Azogues,



Ecuador, en 1966. Obtuvo el título de bachiller en Humanidades especialización Físico - Matemáticas en el colegio Julio María Matovelle "La Salle" de Azogues en 1984.

Sus estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional, obteniendo el Título de Ingeniero en Sistemas Eléctricos de Potencia en 1997.

**ING. PAUL AYORA G.\*** Nacido en Azogues,



Ecuador, 1946, se recibió de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional de Quito en 1971 y recibió el Master of Science en High Voltage Engineering en la Universidad de Manchester, Inglaterra en 1977.

Ha ejercido la cátedra en la Escuela Politécnica Nacional por el lapso de 25 años, actualmente es profesor principal en las cátedras de Diseño en Alto Voltaje y Teoría Electromagnética y está dedicado a la investigación en las áreas de Alto Voltaje y Materiales de Ingeniería.

---

\* En esta ocasión el autor ha seleccionado el tema de este trabajo para presentarlo en las XVII Jornadas de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional, con ocasión de conmemorar sus 25 años de cátedra en esta prestigiosa institución.