

I-SIDEE (Seminario Internacional de Distribución de Energía Eléctrica), Belo Horizonte, Brazil, Nov. 1990.

GROUNDING GRID DESIGN FOR SUBSTATIONS AND DISTRIBUTIONS LINES

Ing. Marcos Andrade Ing. Daniel Slomovitz

U.T.E. Paraguay 2385, Montevideo, URUGUAY

Abstract. Calculating programs for the design of grounding grids are presented. They are based on the matrix method and the image calculation. The results of these programs are compared with measurements in electrolytic tanks. An analysis of the error sources for typical electrodes used in distribution networks. A new two-layer soil model is introduced. This model accepts inclination in the separation plane. A simple application of the method for selecting grounding electrodes in distribution lines is presented.

INTRODUCCION

Para un diseño y construcción seguro y económico de las instalaciones de aterramiento en redes de distribución de energía eléctrica, es necesario un exacto conocimiento de los gradientes de potencial existentes sobre la superficie del terreno.

Este objetivo sólo se puede lograr mediante la utilización de programas de cálculo que simulen de la forma más exacta posible la conformación real de los electrodos y del terreno.

El modelado del terreno admisible por los programas descritos en este trabajo, responde al modelo de 2 capas de distinta resistividad. Se incluye la posibilidad que la superficie de separación de las capas esté inclinada respecto a la superficie del terreno. En los capítulos siguientes se muestra que la metodología de utilización del conjunto de programas permite: modelar el terreno a partir de medidas de resistividad realizadas por los métodos de Wenner, Schlumberger o de enterrado de jabalinas, seleccionar la configuración de electrodos más conveniente, calculando resistencias de aterramiento y perfiles de potencial y estimar voltajes de toque, de paso y de transferencia.

PROGRAMA DE CALCULO

El método de cálculo empleado se aplica a un conjunto de electrodos de aterramiento cilíndricos, representando distintas mallas, cables conectados a ellas, conductores accidentales existentes, cañerías, etc. Debido a que las diferencias de potencial que ocurren en el terreno son muy superiores a las que se producen sobre los conductores de la malla al ser atravesados por las corrientes de falta, éstos se considerarán como una superficie equipotencial.

Para conductores enterrados en un medio homogéneo a solución general para el potencial eléctrico (P) debe satisfacer la ecuación de Laplace. Si el medio no es homogéneo debe considerarse que la resistividad del terreno es una función dependiente del punto P

considerado y en consecuencia la ecuación de campo se transforma en:

$$\nabla \times \nabla \phi(P) = 0 \quad (1)$$

Esta función debe verificar además, como condiciones de borde, que el potencial permanezca constante sobre la superficie de los electrodos

$$\phi(Q) = V \quad (2)$$

para Q en la superficie del conductor y que la densidad de corriente normal a la superficie del terreno sea nula

$$\nabla \phi \cdot \vec{n} = 0 \quad (3)$$

La corriente total inyectada al terreno será:

$$I_c = \int_{\sigma} J(Q) da \quad (4)$$

Si se simula el terreno a través de dos capas homogéneas semi-infinitas de resistividades ρ_1 y ρ_2 , separadas por un plano o semiplano que forma un ángulo Γ con el plano horizontal se puede plantear el problema de modo que el potencial escalar verifique la ecuación de Laplace en cada región, agregando la condición de borde adicional de que la componente normal sea continua en todo el plano de transición.

Para cada región se supondrá que el sistema de puesta a tierra está constituido por un conjunto de elementos conductores cilíndricos. La expresión (5) permite calcular el potencial en cualquier punto del espacio para un conductor cilíndrico inmerso en un medio infinito y homogéneo inyectando corriente de densidad constante.

El voltaje en la superficie del conductor se calculará truncando la expresión (5) para distancias menores al radio r del conductor.

$$\phi(P) = \int_{p-L}^P \frac{i}{2\pi L} [\text{arc sh}(u/m)] \quad (5)$$

Siendo m la distancia entre el punto P en que se calcula el potencial y la recta eje del conductor. El parámetro p es la distancia, sobre la recta eje del conductor, entre el origen del mismo y la proyección del punto P. El voltaje sobre el conductor calculado longitudinalmente, de esta forma, es aproximadamente constante en la zona central del mismo y presenta una disminución pronunciada hacia los extremos. Para que los conductores interconectados representen una superficie equipotencial cada conductor debe dispersar al terreno una corriente que es función del

po de terreno y de la configuración adoptada para la malla. En consecuencia para que la expresión (5) se pueda utilizar deberá dividirse cada conductor en un conjunto de segmentos, asignando a cada uno de ellos una corriente diferente y que será función de los parámetros considerados.

$$V_i = \sum R_i(P) \cdot I_i \quad (6)$$

donde $R_i(P)$ toma el mismo valor numérico que el correspondiente al potencial calculado para corriente unitaria y creado en el punto P por el segmento i -ésimo.

En general para resolver un conjunto de elementos se aplica el principio de superposición, admitiendo que el potencial en cada punto del espacio es la superposición del creado por cada elemento conductor y adaptado a su corriente de modo de mantener su superficie equipotencial.

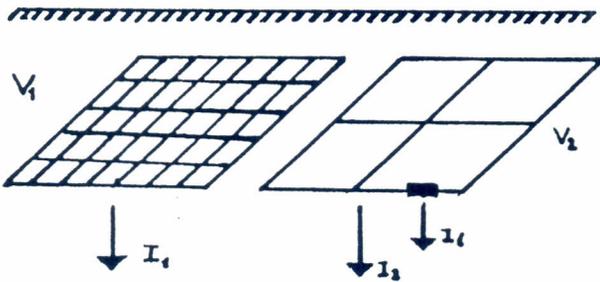


Fig. 1 Ejemplo de segmentación del sistema de puesta a tierra.

Se desconocerán como incógnita las corrientes de cada segmento (ver figura 1), las que se calculan resolviendo el sistema

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n R_{ij}(Q_j) \cdot I_i - V_1 &= 0 \\ \sum_{i=1}^m R_{ij}(Q_j) \cdot I_i - V_2 &= 0 \\ \sum_{i=1}^n I_i &= I_1 \\ \sum_{i=1}^m I_i &= I_2 \end{aligned} \quad (7)$$

donde se consideran varias mallas que se estarán a diferentes potenciales V_1, V_2, \dots y disiparán al terreno corrientes I_1, I_2, \dots

Las voltajes V_1, V_2, \dots se asignarán como potenciales en el punto medio de cada segmento para el conjunto correspondiente y el cociente V/I representa en general la resistencia de puesta a tierra de cada malla. Si la distancia entre las mallas no es elevada aparecerán además valores de resistencias de acoplamiento. El dividir cada malla en varios segmentos hace que el voltaje promedio sobre el conductor de la malla sea muy aproximado al del punto medio de cada segmento. En general se obtienen diferencias entre ambos valores menores al 0.5% y variaciones en el centro del conductor menores al 1%.

En general el programa admite el modelado de varios conjuntos de sistemas de aterramiento cada uno de los cuales a voltajes diferentes. Por ejemplo es posible simular el caso de dos mallas que incluyan elementos conductores (cañerías) que atraviesan la zona de influencia de las mallas y cuya disipación de corriente al sea cero, por no estar conectadas a ninguna de ellas, etc.

El potencial calculado para conductores mediante la aplicación del sistema de ecuaciones (7) representaría un conjunto de mallas inmersas en un medio infinito y homogéneo. Para cumplir con las condiciones de borde (2) y (3) se recurre al método de imágenes. Si el medio es homogéneo basta una única imagen respecto al plano de la superficie del terreno de modo de satisfacer la condición de borde. Si se utiliza la representación de dos capas, aparecen series infinitas de imágenes. Estas dependen de la capa donde se encuentren tanto los conductores como el punto del espacio donde se calcula el potencial [1].

La solución teórica para segmentos unifilares y un terreno de dos capas horizontales es exacta pues verifica la ecuación de Laplace en ambos medios y todas las condiciones de borde.

Los errores de cálculo numérico quedan reducidos al truncamiento de las series.

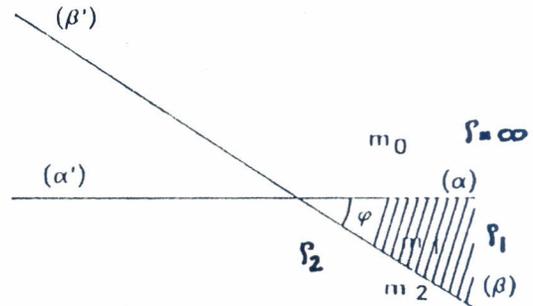


Fig. 2 Definición de la nomenclatura a utilizar

La situación cambia radicalmente cuando la separación de los dos medios consiste en un semiplano β inclinado respecto al plano α , α' de la superficie del terreno un ángulo Γ (ver figura 2). En este caso solo debemos considerar un número finito de imágenes como consecuencia de que no tendría significado físico incluir imágenes en los semiespacios donde se calculan potenciales. Tampoco es posible cumplir con las condiciones de borde en la superficie del terreno para el semiplano α' . Solo es posible encontrar soluciones exactas cuando el potencial en este semiespacio es cero, es decir considerar solamente coeficientes de reflexión $k = \pm 1$.

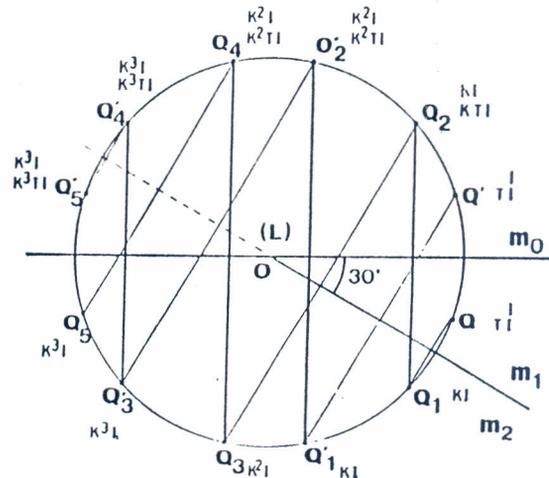


Fig. 3 Serie de imágenes

Debe considerarse además que las imágenes generadas en un número finito respondan a las condiciones de simetría establecidas por las condiciones de borde en los semiplanos α y β . Al tratarse de imágenes producidas por el producto de dos simetrías especulares respecto a los planos $\alpha-\alpha'$ y $\beta-\beta'$, resultarán en giros

de ángulo 2Γ respecto al eje o de intersección de los dos planos. Se generan, en consecuencia, dos series de imágenes que pertenecen a un círculo centrado en o formando ángulos de 2Γ entre ellas, (ver figura 3).

La simetría requerida solo puede ser obtenida si se dan las condiciones $k = 1$ y $\Gamma = \pi/m$ ó $k = -1$ y $\Gamma = \pi/2m$, con m entero positivo.

Para el resto de los ángulos a considerar y distintos coeficientes de reflexión pueden realizarse dos aproximaciones alternativas. La primera considera que cada imagen abarca una zona de influencia determinada, de la misma forma que si se tratara de imágenes luminosas a través de espejos o semi-espejos. Este método tiene el inconveniente de que para forzar a que se cumplan las condiciones de borde crea discontinuidades en todos los planos que unen el eje de giro o con cada una de las imágenes, lo cual no existe en la realidad.

La segunda aproximación, usada en este trabajo consiste en usar ángulos $\Gamma = \pi/2m$ que cumplen las condiciones de borde, a excepción de la correspondiente a la frontera α' .

Cada una de las imágenes resultantes estarán afectadas de los respectivos factores dependientes del coeficiente de reflexión k , tal como se muestra en la figura 3.

La función diferencia $D(P)$ entre el potencial escalar que es solución exacta del problema planteado y el valor que se obtiene por aplicación del método de imágenes, puede acotarse por el potencial creado por elementos puntuales ubicados en el semiplano α' . Las corrientes inyectadas dependen de la ubicación de los electrodos reales respecto a la intersección de los dos planos siendo inversamente proporcional a esta distancia.

En consecuencia para electrodos situados muy próximos a la recta o es de esperar errores mayores en el valor de la resistencia o en el cálculo de los potenciales. Esto es porque la influencia de los valores $D(P)$ se afectarán en forma inversa a la distancia de los electrodos a la intersección de los planos y significará un factor de menor orden comparada con los potenciales creados por los propios electrodos los potenciales calculados en la superficie del terreno sobre la malla podrán calcularse como una aproximación del mismo orden que la efectuada si se considera un plano horizontal de discontinuidad.

SIMULACION CON CUBAS ELECTROLITICAS

La utilización de cubas electrolíticas para simular sistemas de puestas a tierra fue ampliamente difundida desde hace mucho tiempo [2]. Con la introducción de la computadora se han desarrollado programas de cálculo que facilitan enormemente esta tarea de simulación. Sin embargo, es muy difícil evaluar la exactitud de los resultados de estos programas. Principalmente esto es debido a la dificultad de realizar medidas precisas en mallas reales y conocer exactamente el terreno en áreas y a profundidades mucho mayores que las dimensiones de la malla.

Por esto, el relevamiento de modelos a escala en cubas electrolíticas se propone como método para evaluar y mejorar programas digitales de cálculo. Para que esta evaluación sea útil, es necesario imitar los errores del método analógico. Seguidamente se estudian las distintas fuentes de error de este método.

TAMANO Y FORMA DE LA CUBA

medida que nos alejamos de la malla, las superficies equipotenciales tienden a convertirse en semiesferas

cuyo centro es el centro de la malla. En la referencia [3] se muestra que basta con alejarse unas 3 veces el radio de la malla para que la superficie equipotencial sea prácticamente una semiesfera. Por esto cubas relativamente reducidas pueden ser usadas sin que aparezcan errores apreciables. Sin embargo, debe considerarse que el potencial en el límite de la cuba es muy distinto al potencial en el infinito. Esto afecta al valor de la resistencia de puesta a tierra y también a los potenciales en la superficie. Esto último se debe al procedimiento usual de expresar estos potenciales como porcentaje del voltaje de la malla. Es obvio que dicho porcentaje será nulo en el límite de la cuba, lo cual es muy distinto a la situación real. Este error es tanto mayor, cuanto menor sea el tamaño de la cuba y cuanto más lejos de la malla se mida. Es fácilmente eliminado si se incluye la resistencia faltante entre el límite de la cuba y una distancia infinita. Basta con estimarla mediante un cálculo aproximado.

Varios trabajos proponen que la cuba adopte forma semiesférica. Con esto se pretende evitar problemas de borde. Si bien esto es cierto para medios homogéneos, no lo es para suelos estratificados. En el trabajo [4] se muestran curvas de las superficies equipotenciales para suelos de 2 capas horizontales. La forma de estas superficies varía con la profundidad de la segunda capa y también con el coeficiente de reflexión. Por tanto, la complejidad de fabricar cubas semiesféricas no se justifica para el modelado de suelos de 2 capas y menos aun si el plano de separación es inclinado. En la cuba usada en este trabajo, solo el fondo es conductor. El radio de la misma es 5 veces el radio de la malla. En estas condiciones fue estudiada la influencia de la conductividad de las paredes. Que las paredes sean de material aislante o conductor (unido al fondo) influye menos del 0.5% hasta un radio de 2 veces el radio de la malla.

SISTEMA DE MEDIDA

Este sistema comprende un generador, un amperímetro y un voltímetro. El circuito, ampliamente conocido, se muestra en la figura 4.

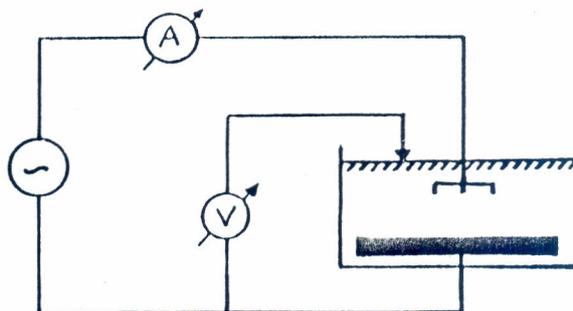


Fig. 4 Circuito de medida con cubas electrolíticas.

Pese a la simplicidad existen múltiples fuentes de error. Para evitar problemas de polarización se usan fuentes de corriente alterna, generalmente de frecuencia industrial. Esta frecuencia es muy baja y aparecen errores debidos a la polarización de los electrodos, principalmente si se usan mallas de alambre muy fino. Frecuencias del orden de 1000 Hz (tal como se usa en este trabajo) eliminan este problema.

El voltímetro se conecta generalmente como en la figura 4, con uno de sus bornes a tierra. En este caso pequeños errores del instrumento se traducen en grandes errores del voltaje de toque o de paso. Esto es porque estos voltajes se calculan como diferencia

ntre el valor indicado por el voltímetro y el voltaje de malla. Es imprescindible contar con instrumentos con errores menores a 0.2% para evitar estos problemas.

La impedancia de entrada del instrumento representa otro problema. Es necesario que la punta sensora posea dimensiones pequeñas para efectuar buenas medidas. Puntas de 1 mm de diámetro presentan impedancias del orden de 10 kΩ. Son, por tanto, necesarios voltímetros con impedancias de 10 MΩ. Las cubas generan voltajes electroquímicos de corriente continua del orden de 0.5 V. La influencia de estos debe evitarse usando voltímetros que solo respondan a corriente alterna.

Aun con todos estos cuidados es posible llegar a errores en el voltaje de toque del orden del 10%, cuando éste es del 90% del voltaje de malla.

CUBA UTILIZADA

En este trabajo se usó una cuba en forma de cubo de 0.5 m de lado. El modelo de 2 capas se simuló con una capa de agar [4] y una capa superficial de agua. La estructura permite girar a la cuba, de manera de obtener diferentes ángulos en el plano de separación de capas. Un medidor permanente de la resistividad del agar permite detectar variaciones con la temperatura y con el envejecimiento.

Un registrador analógico X-Y de corriente continua, automáticamente dibuja las curvas de voltaje de superficie. Para esto el sensor se mueve sobre una guía recta y un potenciómetro registra su posición enviando la señal al canal X. Un convertidor de corriente alterna a continua, envía su salida al canal Y.

ANÁLISIS DE PRECISIÓN DEL MÉTODO

Las aproximaciones consideradas para la aplicación del programa son las siguientes:

- 1) Todo el sistema de puesta a tierra se encuentra en el mismo tipo de terreno, sea homogéneo o formado por dos capas.
- 2) Cada conductor se representa por un conjunto de elementos que inyectan al terreno una corriente de densidad longitudinal constante.
- 3) La corriente inyectada por el conductor presenta simetría cilíndrica respecto al eje del conductor.
- 4) Verificación parcial de las condiciones de borde al modelar el terreno por dos capas inclinadas.

Los resultados obtenidos usando la metodología descrita, se han comparado con otros programas que utilizan un análisis similar, con métodos analíticos para los casos en que existen soluciones de este tipo y con los resultados del método de modelos en cuba electrolítica.

Existen programas de cálculo que utilizan planteos similares, que han sido ampliamente utilizados y que en particular han servido de base para la confección de la norma IEEE80 [5]. En su aplicación han sido reportadas situaciones particulares. Por ejemplo cuando se incluyen jabalinas profundas, aparecen potenciales en la superficie del terreno que superan los potenciales de malla [6]. Fundamentalmente estas situaciones anómalas ocurren cuando se calculan potenciales sobre los conductores.

Estos resultados dependen fuertemente del número de elementos en que se divide cada conductor. Sin embargo al aumentar la segmentación de los conductores los resultados convergen rápidamente. Este comportamiento responde a la hipótesis formulada en 2), ya que se obtiene una mejor aproximación para la

densidad lineal de corriente dispersada por cada conductor. El grado de segmentación necesaria depende de la relación de distancias entre la longitud del conductor y la separación entre éste y los conductores o imágenes más próximas.

Si la segmentación aumenta en exceso aparece un nuevo tipo de error debido a que el largo del segmento se aproxima a su diámetro. Sin embargo la mayoría de las estimaciones de errores para programas se estiman en base a comparaciones con los propios valores límites de convergencia de éste.

Comparaciones realizadas para suelos homogéneos entre los resultados del presente programa y de otros similares [7] en general arrojan diferencias que están dentro de los errores de apreciación de los gráficos publicados.

Para la comparación de resultados realizada con los valores obtenidos de la simulación en cuba electrolítica fueron seleccionadas configuraciones similares a las que se utilizan en construcciones prácticas para red de distribución.

Se realizaron diversas mediciones, variando las configuraciones, la profundidad de enterrado y el diámetro de los conductores.

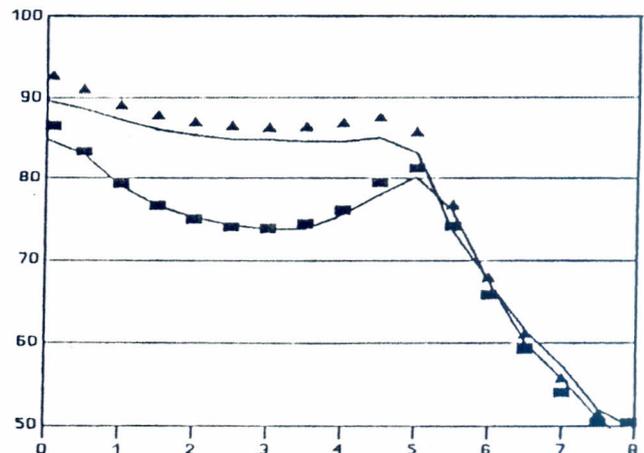


Fig. 5 Resultados de cálculo (marcas) y simulación por cubas (línea continua) para suelo homogéneo.

La figura 5 muestra los resultados del programa (por puntos) y los medidos en cuba electrolíticas (línea continua) para perfiles sobre el conductor central y el centro de la malla. La grilla utilizada es de cuatro mallas, 10 x 10 cm, profundidad 5 mm y diámetro del conductor de 0.3 mm.

En particular el diámetro de los conductores se hizo variar desde 0.1 mm hasta 5 mm.

Los valores de resistencia a tierra medidos y calculados fueron siempre menores a 3%, siendo en algunos casos menores a 1%. Los potenciales sobre la superficie del terreno también presentaron en todos los casos diferencias absolutas menores a 3%, del voltaje de malla, resultando en determinadas configuraciones prácticamente inapreciables.

Sin embargo estas diferencias se pueden traducir en errores importantes en el voltaje de toque. Esto ocurre cuando el potencial de toque es muy pequeño, por ejemplo sobre los conductores.

Si se considera el voltaje de toque máximo el error varía desde 4% para diámetros de 0.3 mm a 10% para diámetros de 1.33 mm, profundidades de 5 mm y largos de cada conductor de 50 mm que fueron los que presentaron diferencias mayores.

El error en el voltaje máximo de toque baja a valores menores al 1% cuando la configuración es tal que éstos alcanzan un 40% del potencial de malla.

Para suelos no homogéneos, constituidos por dos

capas con separación horizontal las diferencias en los valores de resistencias medidos y calculados se mantuvieron dentro de un 3 %. Para potenciales sobre la superficie del terreno las diferencias máximas, que ocurrieron sobre los conductores alcanzaron un 5 % en valor absoluto.

Para coeficientes de reflexión negativos las diferencias en los potenciales de toque fueron porcentualmente menores al 10 % en el peor caso (figura 6), la malla es similar a la de la figura 5, pero utilizando un conductor de 1.33 mm, profundidad de la capa de discontinuidad de 2 cm y k aproximadamente -0.5 .

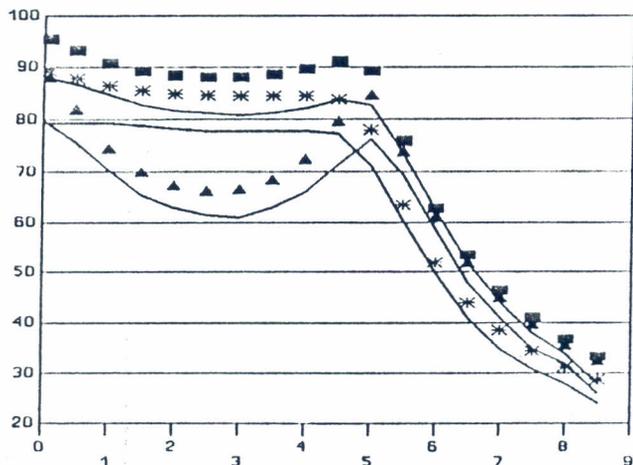


Fig. 6. Modelo de dos capas, coeficiente de reflexión negativo.

Para coeficientes de reflexión positivos las diferencias absolutas permanecen en el mismo orden que en el caso anterior, pero como los voltajes máximos de toque disminuyen al tender a aplanarse el perfil de potenciales sobre la malla, las diferencias porcentuales aumentan considerablemente llegando a valores del orden de 40 % (ver figura 7), para una configuración similar a la de la figura anterior y k igual a 0.5.

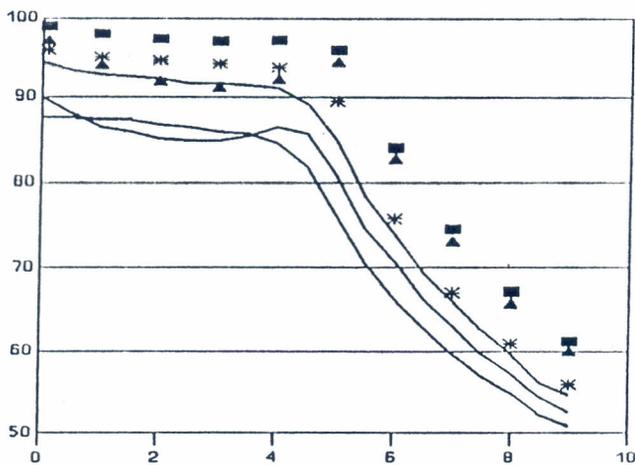


Fig. 7. Modelo de dos capas, coeficiente de reflexión positivo.

La magnitud de los errores provenientes de la hipótesis realizada para planos inclinados se verificaron comparando en primera instancia los resultados obtenidos para electrodos puntuales.

Se comparan los resultados con los obtenidos por K. Maeda [8] mediante procedimiento de cálculo armónico y que son teóricamente exactos. En las figuras 8, 9 y 10 se han indicado por puntos sobre estas curvas los valores obtenidos del programa.

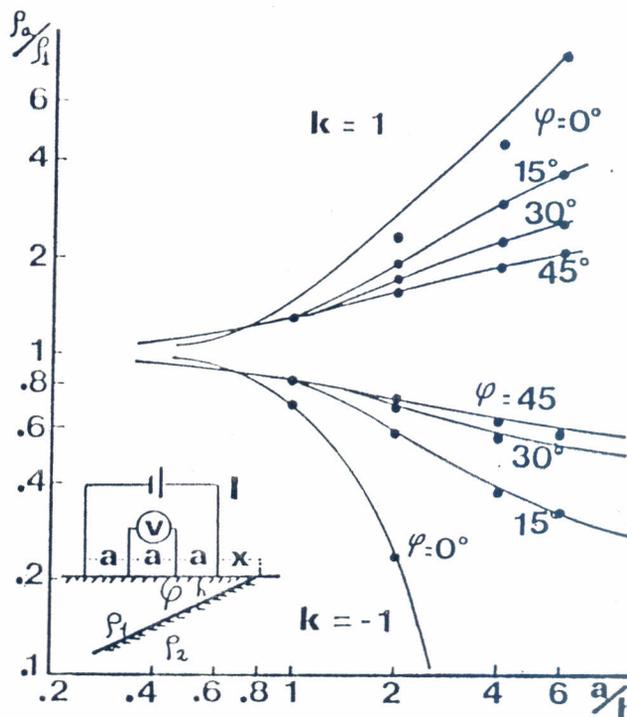


Fig. 8. Comparación de resultados para dos electrodos perpendiculares a la recta o.

Tal como se indicó en la comparación previa los resultados calculados sobre una recta perpendicular a la línea de discontinuidad son muy coincidentes, dentro de los rangos de apreciación que permiten las gráficas, aún para distancias al electrodo de 20 veces la distancia a la frontera. En la dirección paralela el error es mayor, siendo del orden del 15% para electrodos separados seis veces

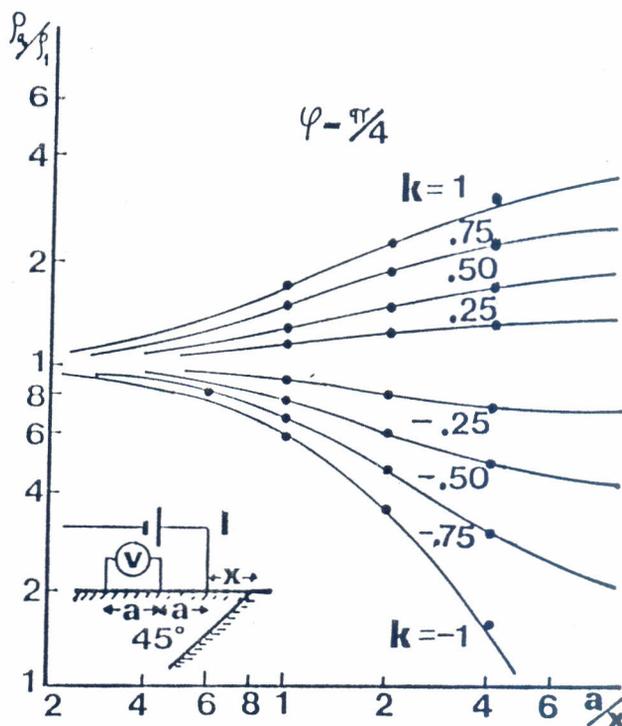


Fig. 9. Comparación de resultados para un electrodo. Perfil perpendicular a la recta o.

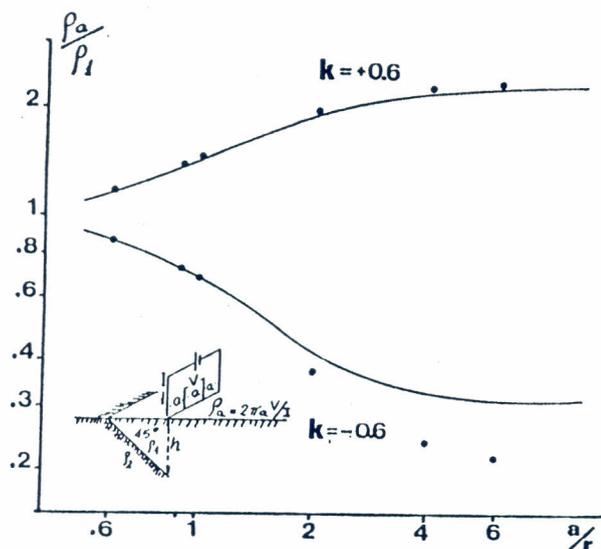


Fig. 10 Comparación de resultados para dos electrodos situados en una línea paralela a la recta o.

la distancia a la frontera ($a/x=2$) y aumenta considerablemente como está previsto para distancias grandes del electrodo, para un coeficiente de reflexión de -0.6 . Debe considerarse que se ha elegido una situación de alto valor esperado de error tanto por el coeficiente de reflexión seleccionado como por el ángulo Γ .

Con la razonable aproximación de los resultados obtenidos se ha aplicado el método para cálculo en mallas más complejas, y se han comparado los resultados con los obtenidos a través del ensayo de modelos, encontrándose que las diferencias son del mismo orden que las que aparecen para casos en que el método de cálculo no presenta esta condición de borde particular.

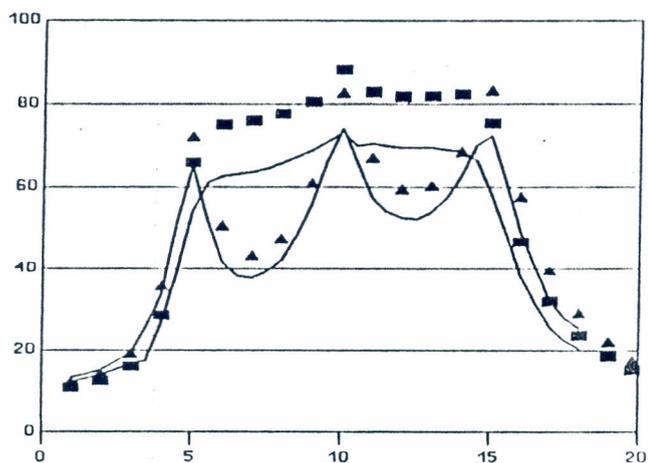


Fig. 11 Comparación entre programa y cuba para planos inclinados.

La figura 11 muestra los potenciales obtenidos por ambos métodos para un caso determinado, donde de acuerdo al diámetro del conductor empleado el error encontrado ha sido en general el mayor y para un

coeficiente de reflexión negativo, que es el que ha mostrado algunas discrepancias en el caso de electrodos puntuales. El valor elevado del coeficiente de reflexión se ha seleccionado en el ejemplo ilustrado por presentar una mayor asimetría.

La comparación de resultados entre el programa y las medidas en la cuba electrolítica muestran para éste caso diferencias similares a las obtenidas para suelo no homogéneo con dos capas horizontales, es decir diferencias absolutas menores al 5 % y en el voltaje máximo de toque diferencias porcentuales menores al 10 %, por lo que puede concluirse que los errores derivados de las aproximaciones realizadas en este caso particular por diferencias en las condiciones de borde no introducen diferencias adicionales al programa.

Las redes de distribución de energía eléctrica pueden abarcar un conjunto importante de subestaciones con mallas de puesta a tierra interconectadas, sea a través de las pantallas de la red de cables subterráneos, sea eventualmente a través de conductores de guardia de líneas aéreas. En tales situaciones es usual el modelado individual de cada malla a través de modelos desacoplados.

APLICACION DEL METODO A REDES DE DISTRIBUCION

REDES DE MEDIA TENSION AEREAS

En instalaciones de media tensión suelen presentar corrientes de defecto fase tierra de magnitud considerable, fundamentalmente para redes cuyo neutro está vinculado a tierra sólidamente o a través de impedancias de bajo valor. Una situación similar ocurre para redes de neutro aislado sin protecciones de sobrecorriente direccionales, en cuyo caso los defectos entre fases a través de faltas a tierra suelen ser comunes.

Frecuentemente estas redes atraviesan zonas densamente pobladas y pueden constituirse en probable causa de accidentes.

Al tratarse de pequeñas instalaciones, tanto en extensión física, como en potencia, se recurre comúnmente a ejecuciones que contienen como único elemento de aterramiento una jabalina convencional de dos o tres metros de longitud, lo que suele ser totalmente insuficiente. En otros casos se usan construcciones complejas y costosas instalando electrodos a gran profundidad, que buscan atravesar napas de agua, con el objeto de obtener valores de resistencia de puesta a tierra sumamente bajos.

Estos diseños no consideran los valores reales de

resistencias de aterramiento y los potenciales de paso y toque correspondientes.

Sin embargo aún utilizando estudios detallados existen rangos de relatividad donde se hace sumamente difícil poder lograr un diseño seguro y económico.

Se han analizado varias configuraciones de electrodos a los efectos de realizar un estudio comparativo que muestre la eficiencia de cada diseño a través de los potenciales de toque y paso que generan, comparados con los respectivos costos, los que se han formulado tomando como precio base el de la instalación de una jabalina de 2 metros de largo instalada a medio metro de profundidad.

TIPO	PROFUNDIDAD												
	H = 0.5				H = 1				H = 1.5				
	R	Vp	Vt	C\$	R	Vp	Vt	C\$	R	Vp	Vt	C\$	
1		11.4	17.8	51	4.7	10.8	10	52	4.8	10	6.7	54	5.2
2		7.3	17	46	5.3	6.9	9.7	48	5.7	6.7	6.5	50	6.4
3		24.2	24.4	42	2.1	22.3	13.4	54	2.3	21.4	8.5	6.2	2.7
4		14.4	23.7	28	5.6	13.5	14.2	30	5.7	13	9.43	49	6.1
5		17.5	22.7	38	1.6	16.3	13.3	46	1.7	15.6	9	53	2.2
6		12.1	27.2	26	5.6	11.3	13.9	34	5.7	10.8	9.7	42	6.2
7		6.1	16	47	8.9	5.8	9.6	51	9	5.6	7	53	9.2
8		11.5	19	52	5.3	8	12	57	5.5	7.7	8.9	60	6
9		8.5	17.1	5.2	6.5	8.1	12.4	53	6.8	7.8	5.2	58	7
10		5.5	20	34	9	5.2	11.7	35	9.5	5.1	6.4	38	10.6

Fig. 12 Resistencias de aterramiento, voltajes de paso y toque en porcentaje y relación de costos respecto al de una jabalina para distintas configuraciones de electrodos típicos

La figura 12 muestra valores de resistencia de puesta a tierra y tensiones de paso y toque expresados en porcentaje de la tensión de malla para varias configuraciones de electrodos.

Algunos tipos constructivos pueden estar limitados por la disponibilidad de espacio para ejecutar la construcción.

La utilización de una jabalina próxima al conductor de conexión con el equipamiento es importante por consideraciones de dispersión de corrientes de impulso.

La utilización de tratamientos del terreno como forma de disminuir los valores de resistencias es ventajoso en terrenos muy áridos o rocosos, en éstos casos el modelado por programa se simula por un aumento equivalente del diámetro del conductor.

Las figuras 13 y 14 muestran la relación entre el tiempo de soportabilidad de la corriente de falla para una persona de 70 kg según las especificaciones de la norma IEEE80 en función de la resistividad del terreno, simultáneamente se representan las corrientes de defecto fase-tierra determinadas para estas fallas para una tensión de red de 15 kV. Se han parametrizado en la corriente límite para la red. Para corrientes límites de 500 y 1000 A se ha considerado resistencia de neutro a los efectos de limitar la corriente, para 5000 A la limitación es establecida por las impedancias propias del circuito. Estas curvas permiten determinar para los electrodos considerados los valores de corriente y tiempo máximos para los cuales debe actuar la protección para la resistividad del terreno existente.

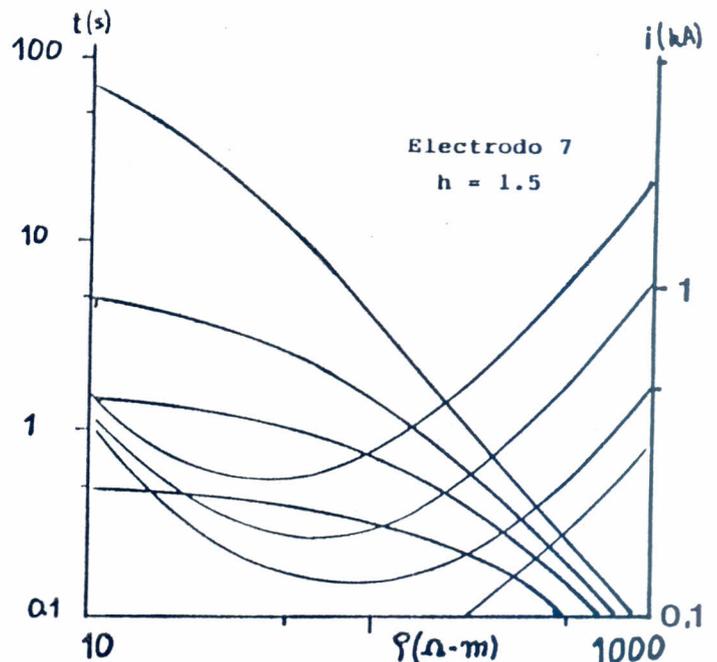


Fig. 13 Relación entre resistividad, corriente y tiempo para un electrodo determinado.

ELECTRIFICACION RURAL CON RETORNO POR TIERRA

Desde hace varios años los sistemas de electrificación rural con retorno por tierra han ido teniendo un auge creciente. En este sistema de distribución la puesta a tierra de las instalaciones adquiere aún una mayor relevancia como consecuencia de que además de

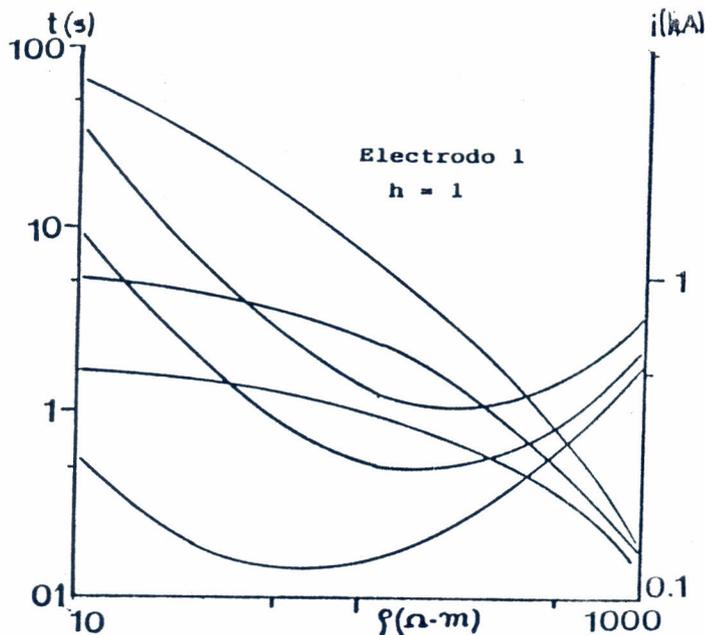


Fig. 14 Relación entre resistividad, corriente y tiempo para un electrodo determinado.

cumplir los objetivos usuales se constituye en una de las vías de conducción de la energía eléctrica.

El hecho de que exista circulación permanente de corriente de frecuencia industrial a través de las mismas hace que deban considerarse especialmente a los efectos de prever la realización de mantenimiento periódico supervisando una adecuada regularidad en los valores de resistencias de aterramiento. Si bien el diseño se efectúa calculando exactamente las tensiones de paso y toque, sin considerar más que límites superiores en los valores de las resistencias, muchas veces elevados, dependiendo de la resistividad del terreno, es suficiente realizar medidas posteriores exclusivamente de los valores de resistencias, las que además presentan mayor simplicidad.

En la mayoría de los casos, tomando las precauciones necesarias a los efectos de aislar adecuadamente los conductores que conectan la puesta a tierra y los equipos puede diseñarse la instalación de modo de considerar exclusivamente potenciales de paso, ya que generalmente son bastante menores que los de toque. Ésta a pesar de ser una regla general no puede adoptarse en todos los casos, con el consiguiente aumento en los requerimientos de la instalación.

CONCLUSIONES

Se han analizado los errores provenientes del procedimiento de cálculo numérico basados en el método matricial. A pesar de existir diferencias importantes en las diferencias de potenciales sobre los conductores, los voltajes de toque máximos para suelos homogéneos presentan una exactitud apreciable y hacen que el método sea perfectamente aplicable. Una situación similar ocurre para suelos de dos capas con coeficientes de reflexión negativos, aún para el caso de dos capas inclinadas, situación que no ha sido reportada anteriormente.

Para el caso de coeficientes de reflexión positivos pueden aparecer errores muy importantes, arrojando valores del orden del 50 % de los medidos, situación que es preocupante porque utilizando los valores

calculados no se está del lado de la seguridad, es éste un punto que necesita ser investigada con mayor detalle.

Para suelos homogéneos se presenta la aplicación del método para redes de distribución, donde se muestra la importancia de incluir la resistencia de la puesta a tierra en el cálculo de la corriente de defecto como forma de no sobredimensionar las instalaciones. Se incluyen ejemplos de aplicación para electrodos particulares.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer al Sr. Alfredo Spaggiari del Laboratorio de U.T.E., por su amplia colaboración en el trabajo con cubas electrolíticas.

REFERENCIAS

- [1] K.A.Ewy-H.A.Smolleck, "A graphical explanation of the resistance and surface-potential calculations for grounding systems in two-layer earth", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol PAS 103 pp 632-639 march 1984.
- [2] H.R. Amstrong, "Grounding Electrode Characteristics from Model Tests", AIEE, pp 1302-1306, Dec. 1953.
- [3] T. Taveira, R Goncalves, "Estudo de desempenho de malhas de aterramento através de modelos em escala reduzida", Ser ERLAC (CIGRE) 23-04, 1989.
- [4] R. Caldecott, D. G. Katsin, "Scale model studies of station grids", IEEE PAS vol 102, pp. 558-566, march 1983.
- [5] ANSI/IEEE std 80-1986.
- [6] E. Joy, R. Wilson, "Accuracy study of the ground grid analysis algorithm", IEEE PWRD-1 No3, July 1986 pp. 97-102.
- [7] F. Dawalibi, D. Mukhedkar, "Parametric Analysis of Grounding Grids", IEEE PAS-98 sept/oct 1979 pp. 1659-1668
- [8] K. Maeda, "Apparent resistivity for dipping beds", Geophysics, vol 20, No 1, pp 123-147.