

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

**METODOLOGIA PARA EL DISEÑO
DE ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA**

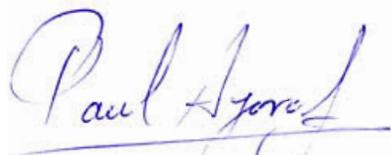
**Tesis previa a la obtención del Título de
Ingeniero en Sistemas Eléctricos de Potencia**

FAUSTO RAMIRO VALENCIA ARCOS

Quito, marzo, 1.999

CERTIFICADO

Certifico que la presente tesis ha sido desarrollada en su totalidad por el Sr. Fausto Ramiro Valencia Arcos.

A handwritten signature in blue ink, reading "Paul Ayora G.", written over a horizontal line.

Ing. Paul Ayora G.

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Paul Ayora, quien con su digna colaboración y valiosa ayuda hizo posible la culminación de este trabajo; además de que, mediante su ejemplo, hizo crecer en mí el interés por el estudio de un área tan interesante como es el Alto Voltaje.

DEDICATORIA

A mis padres, Fausto y Cecilia, quienes siempre me han apoyado y han guiado mis pasos por la senda del bien.

INTRODUCCION

Una puesta a tierra se caracteriza principalmente por dos factores:

- Resistencia
- Diferencia de potencial entre puntos de la superficie

La diferencia de potencial es importante en el diseño de grandes puestas a tierra - puestas a tierra de grandes subestaciones, de centrales de generación - en las que la corriente de falla tiene valores altos, del orden de los 10 kA o más. En estos casos, por seguridad del personal; se debe tomar en cuenta, al diseñar la puesta a tierra, que no existan gradientes de potencial peligrosos, evitando el riesgo de accidentes dentro de las instalaciones.

En el caso de tener instalaciones cuya corriente de falla sea relativamente pequeña, la característica que más se debe considerar es la resistencia de puesta a tierra. En este caso se diseñan los denominados electrodos de puesta a tierra.

La resistencia de puesta a tierra, siendo un factor tan importante en el diseño de los electrodos, es difícil de calcular. El desarrollo matemático de las puestas a tierra es muy complejo, llegando tan sólo a tener aproximaciones de su valor.

Existen métodos de cálculo de la resistencia, pero éstos, o son complejos, o el error de cálculo es muy grande. Algunos de estos métodos son estudiados por quienes se forman en la carrera de ingeniería eléctrica en sistemas eléctricos de potencia, pero son desconocidos para personas extrañas a esta profesión o especialidad, y que necesitan de una puesta a tierra: ingenieros en

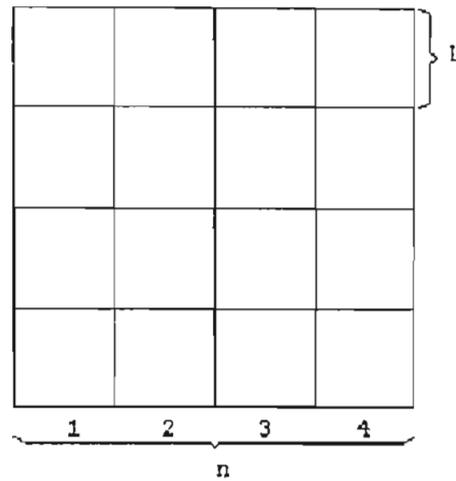
telecomunicaciones, ingenieros en control, electricistas, etc.

En este trabajo, se pretende desarrollar un método de cálculo de resistencia de puesta a tierra, que sea fácil de usar, y que tenga un buen margen de error. Además el método desarrollado debe ser comprensible para alguien que tenga conocimientos básicos de una puesta a tierra.

En primer lugar, se hace un análisis de los parámetros que influyen en la resistencia de puesta a tierra; luego se hace referencia a algunos métodos de cálculo de resistencia anteriores a esta publicación; después se presenta la deducción de una ecuación para el cálculo de resistencia de electrodos cuadrados; y se termina con la deducción de una ecuación para electrodos rectangulares.

Los datos para la comprobación de la influencia de los diferentes parámetros en la resistencia, así como para la deducción de las ecuaciones encontradas, se obtienen de la simulación de diferentes electrodos en el programa AMT, desarrollado en la tesis de Joffre Navarrete.[1]

Para todos los propósitos, se establece una malla patrón, tal como se muestra en la figura 1 en la cual L representa la longitud del lado de una celda en que se divide el electrodo, y n es el número de celdas que se encuentran en uno de sus lados. Por ejemplo, si se dice que es un electrodo $n3L4$, es un electrodo que tiene 3 celdas de 4 metros de lado cada una, es decir, es un electrodo de 12 metros por lado.

**Fig. 1**

Malla patrón, establecida para la comprobación de cálculos de resistencia de electrodos cuadrados

Para las simulaciones de electrodos cuadrados se han tomado casos, desde una hasta veinte celdas, con longitudes desde 2 hasta 20 metros; es decir, desde $n1L2$ hasta $n20L20$, con ello se tienen electrodos, de 2 a 400 metros por lado. Las simulaciones se realizan tomando una profundidad constante de 0.5 metros y una resistividad de $100 \Omega \cdot m$. Para el caso de electrodos con varillas, éstas son de $1/2''$ de diámetro con una longitud de 2 metros.

CAPITULO 1

PARAMETROS QUE INFLUYEN EN EL VALOR DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

En la presente tesis, la resistencia de puesta a tierra que físicamente corresponde a la resistencia óhmica entre el electrodo metálico enterrado en el suelo y sus alrededores, que, a su vez, constituyen el medio de difusión y disipación de la corriente eléctrica, será denominado "resistencia" simplemente, o en algunos casos, "resistencia de puesta a tierra".

Para el diseñador de la instalación de puesta a tierra puede presentarse el problema de que la resistencia de diseño, no se encuentre dentro de los valores requeridos. En estos casos, existen modificaciones que podrían hacerse para reducir (o elevar) el valor de la resistencia. Estas modificaciones deben realizarse con buen criterio teórico, ya que por simple análisis, se puede llegar a tener conclusiones erróneas que, principalmente, llevarán a realizar gastos innecesarios. Por ejemplo, si se quiere controlar la resistencia por medio del radio del conductor, los resultados -como se verá más adelante- no varían mucho, y el costo adicional será el uso de un conductor de mayor calibre.

En este capítulo se hace un análisis de la influencia que tienen los distintos parámetros en el valor de la resistencia de puesta a tierra, para tener una mejor comprensión acerca de las posibles variaciones que se pueden hacer para el mejoramiento de la resistencia.

1.1 RESISTIVIDAD

Observando distintos métodos de cálculo como: el método de Tagg, la norma 80 y la 142 de la IEEE, etc.; se concluye que la resistencia del electrodo de puesta a tierra tiene una variación directamente proporcional con la resistividad del suelo en el que está enterrado y que éste es el parámetro de mayor influencia en el valor de la resistencia.

Si la resistencia no es la deseada, se puede variar la resistividad por medio de un cambio de suelo. Pero esta solución puede resultar costosa. A veces ni siquiera se conoce con certeza la resistividad del suelo original, ya que su medición es un proceso complejo y que requiere tiempo. Además existe el problema de que se pueden llegar a tener resistividades de $50 \Omega \cdot m$ en el mejor de los casos (para suelo orgánico húmedo se tiene una resistividad de $10 \Omega \cdot m$ ^[2], pero esto requeriría un constante riego, lo que no siempre es posible), esto significa que por medio de la resistividad se puede mejorar el diseño, pero se llega a un límite físico del que no se puede pasar.

Se pueden observar valores de resistividad para diferentes suelos en el anexo A.

En los casos analizados en este trabajo, se utiliza una resistividad de $100 \Omega \cdot m$.

1.2 DIAMETRO DEL CONDUCTOR

Con el aumento del diámetro del conductor que configura el electrodo de puesta a tierra, crece la influencia del conductor dentro del suelo, lo que implica una disminución de la resistencia.

En la tabla 1.1 se presentan valores de resistencia, y su variación con el diámetro para cinco diferentes tipos de electrodos. Como puede observarse, la variación de la resistencia es mínima con respecto al diámetro; se requieren grandes cambios en éste para pequeñas variaciones en la resistencia. Lo mismo se refleja en las figuras 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 y 1.5 en las que la variación de la resistencia está representada prácticamente en forma horizontal.

Tabla 1.1

VARIACION DE LA RESISTENCIA CON RESPECTO AL DIAMETRO					
Diámetro (mm)	RESISTENCIA (ohmios)				
	n1 L2	n1 L20	n10 L6	n15 L16	n20L20
7.4	21.108	3.065	0.777	0.197	0.117
9.4	20.645	3.019	0.774	0.196	0.117
10.5	20.417	2.996	0.772	0.196	0.117
13.3	19.948	2.949	0.768	0.195	0.116
14.6	19.763	2.930	0.767	0.195	0.116
16.0	19.581	2.912	0.766	0.195	0.116
17.2	19.434	2.897	0.764	0.195	0.116

Por ejemplo, en el caso de n1 L20 (cuadrado sin divisiones de 20 m de lado), para un diámetro de 7,4 mm se tiene una resistencia de 21.108Ω. Aumentando el diámetro a 17.2 mm, es decir un 232%, la resistencia tiene un valor de 19.434Ω, ha bajado un 7.93%. Con grandes cambios de diámetro se obtienen pequeños cambios de resistencia. **En este estudio se descarta, por lo tanto, el diámetro como un parámetro que el diseñador pueda manipular para obtener mejores valores de resistencia.**

Por lo expuesto en el párrafo anterior, no será tomado en cuenta el diámetro del conductor en la deducción de la ecuación de la resistencia desarrollada

Fig. 1.1
Resistencia vs. Diámetro

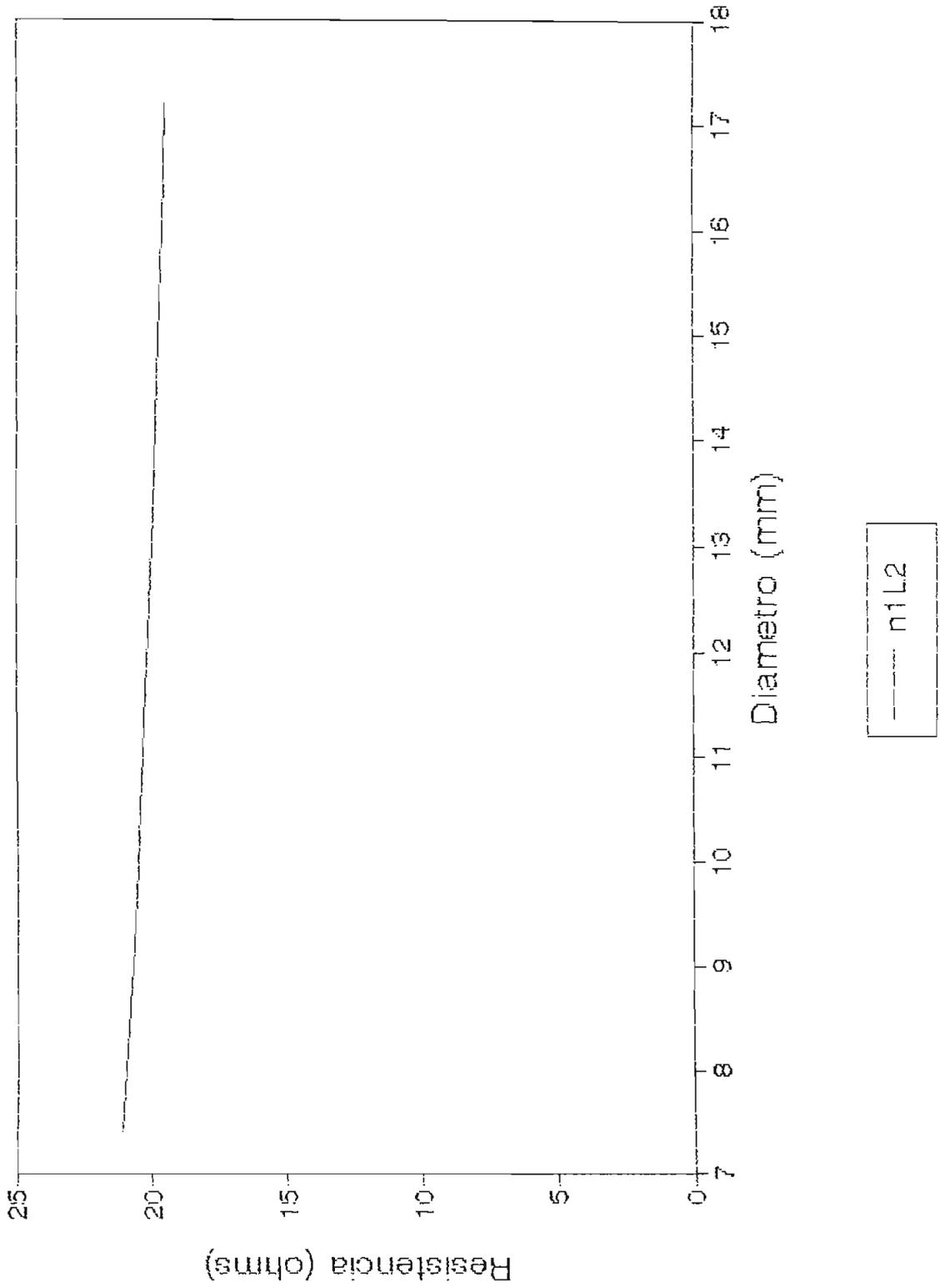


Fig. 1.2
Resistencia vs. Diámetro



Fig. 1.3
Resistencia vs. Diámetro

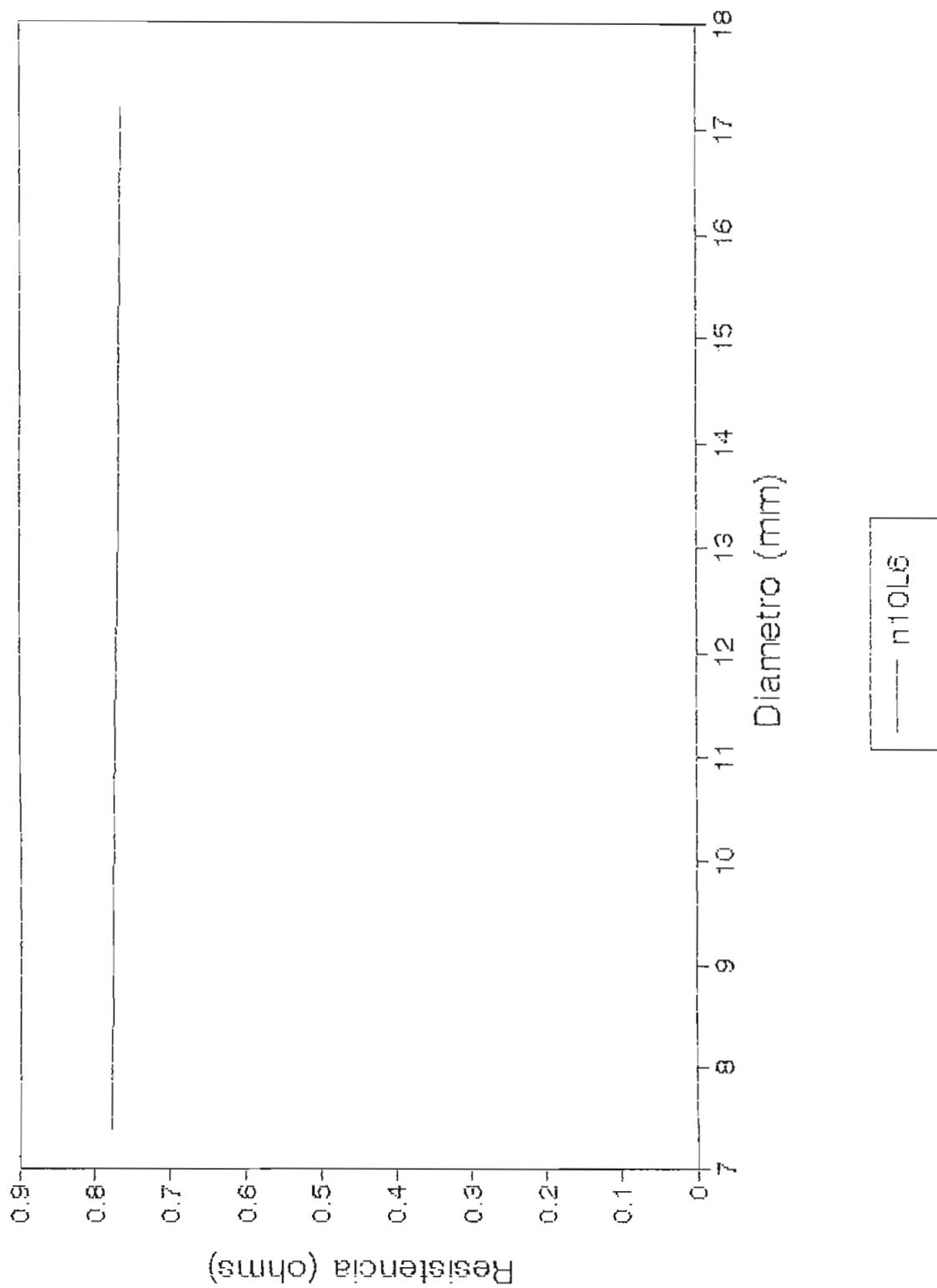


Fig. 1.4
Resistencia vs. Diámetro

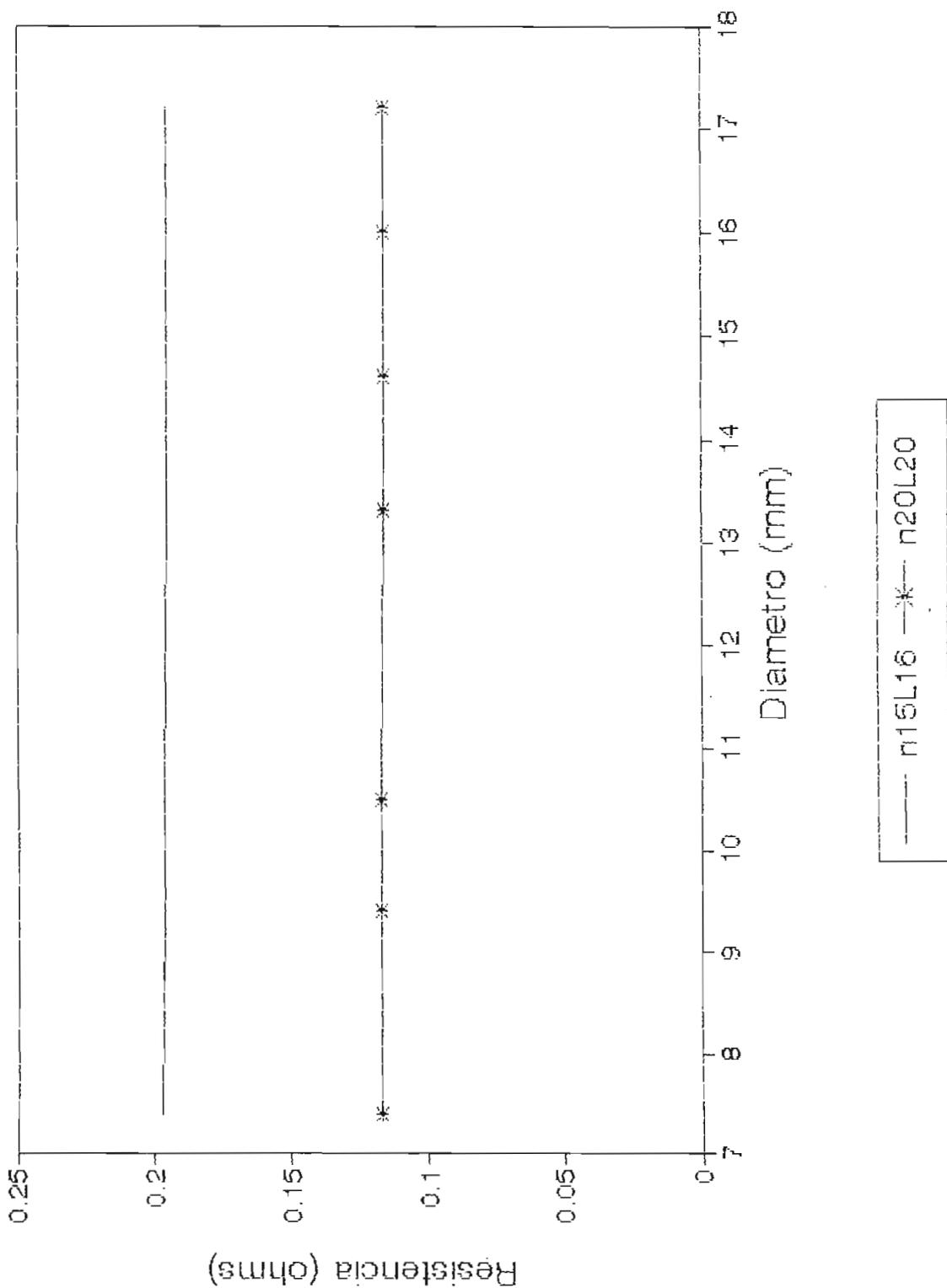
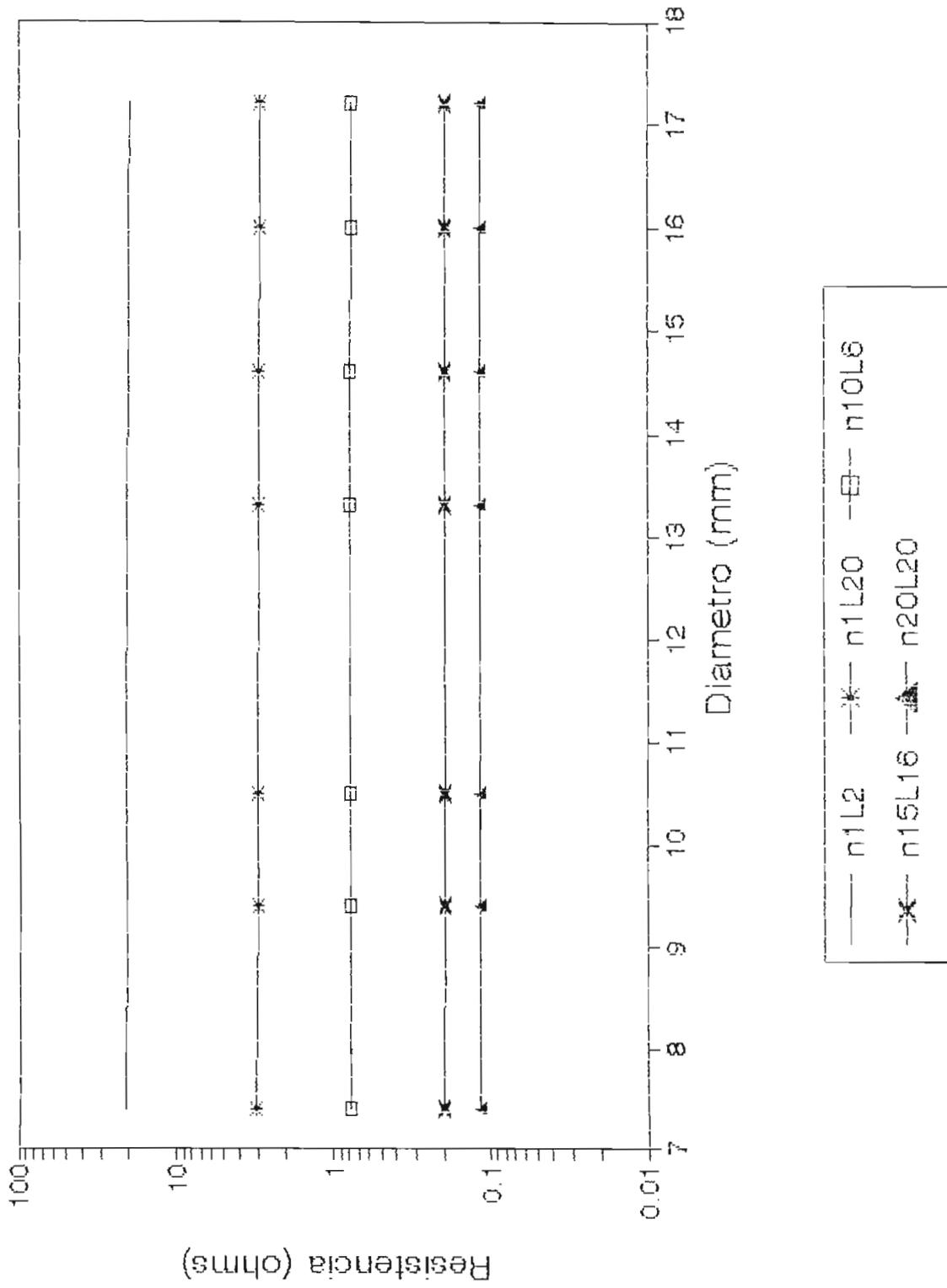


Fig. 1.5
Resistencia vs. Diámetro



en el presente trabajo, además, las corrientes que manejan los electrodos de puesta a tierra son pequeñas, y no significan mayores problemas para el mismo. Pero si se quiere profundizar un poco más en el cálculo de la sección del conductor, en el anexo B se expone una ecuación de cálculo de la misma.

Las simulaciones de electrodos de puesta a tierra, se realizaron con conductores: 2 AWG, 1/0 AWG, 2/0 AWG, 4/0 AWG, 250 MCM, 300 MCM y 350 MCM.

1.3 LONGITUD

Con longitud se refiere al valor del lado de una celda que divide al electrodo. Es el término "L" que se indica en la figura 1.

Observando la tabla 1.2 se concluye que la variación de la resistencia con L es amplia, inclusive para electrodos grandes con baja resistencia. Esto se puede ver con mayor claridad en los gráficos 1.6, 1.7, 1.8 y 1.9, en los que se nota una sensibilidad marcada de la resistencia con respecto a L.

Se concluye, por lo tanto, que si el diseñador quiere disminuir el valor de la resistencia, tiene que aumentar L, y la resistencia disminuirá rápidamente.

Fig. 1.6
Resistencia vs. Longitud

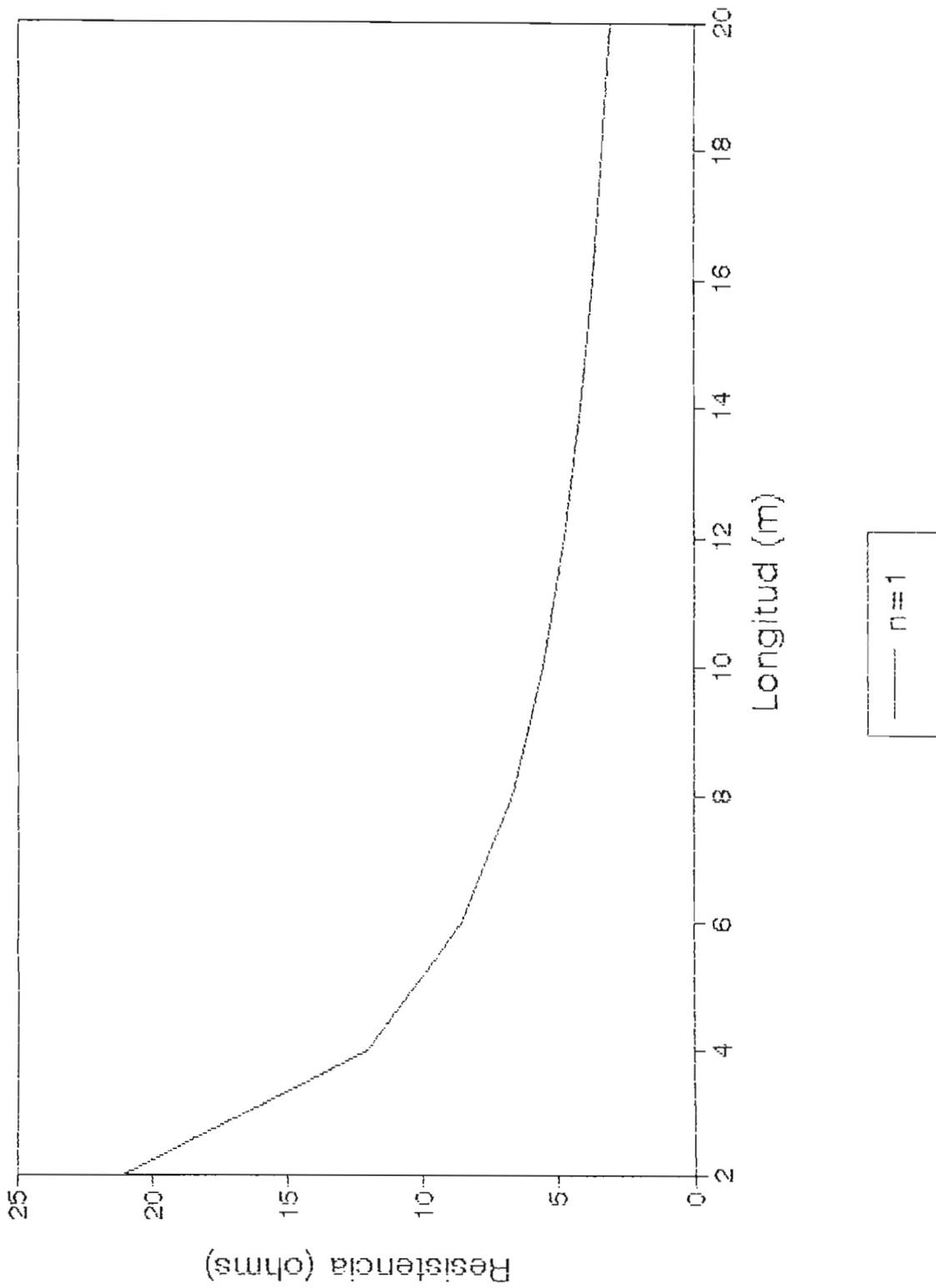


Fig. 1.7
Resistencia vs. Longitud

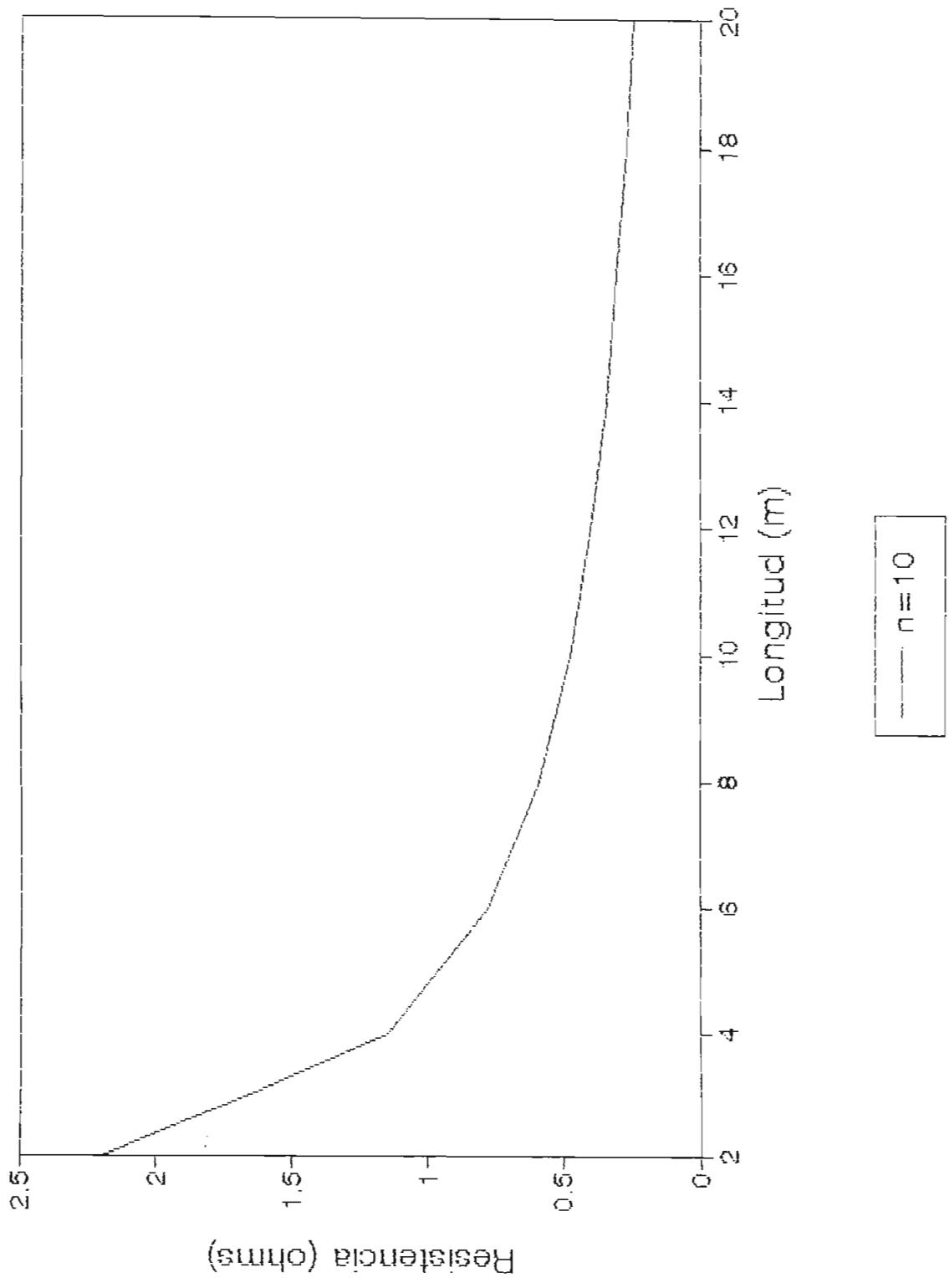


Fig. 1.8
Resistencia vs. Longitud

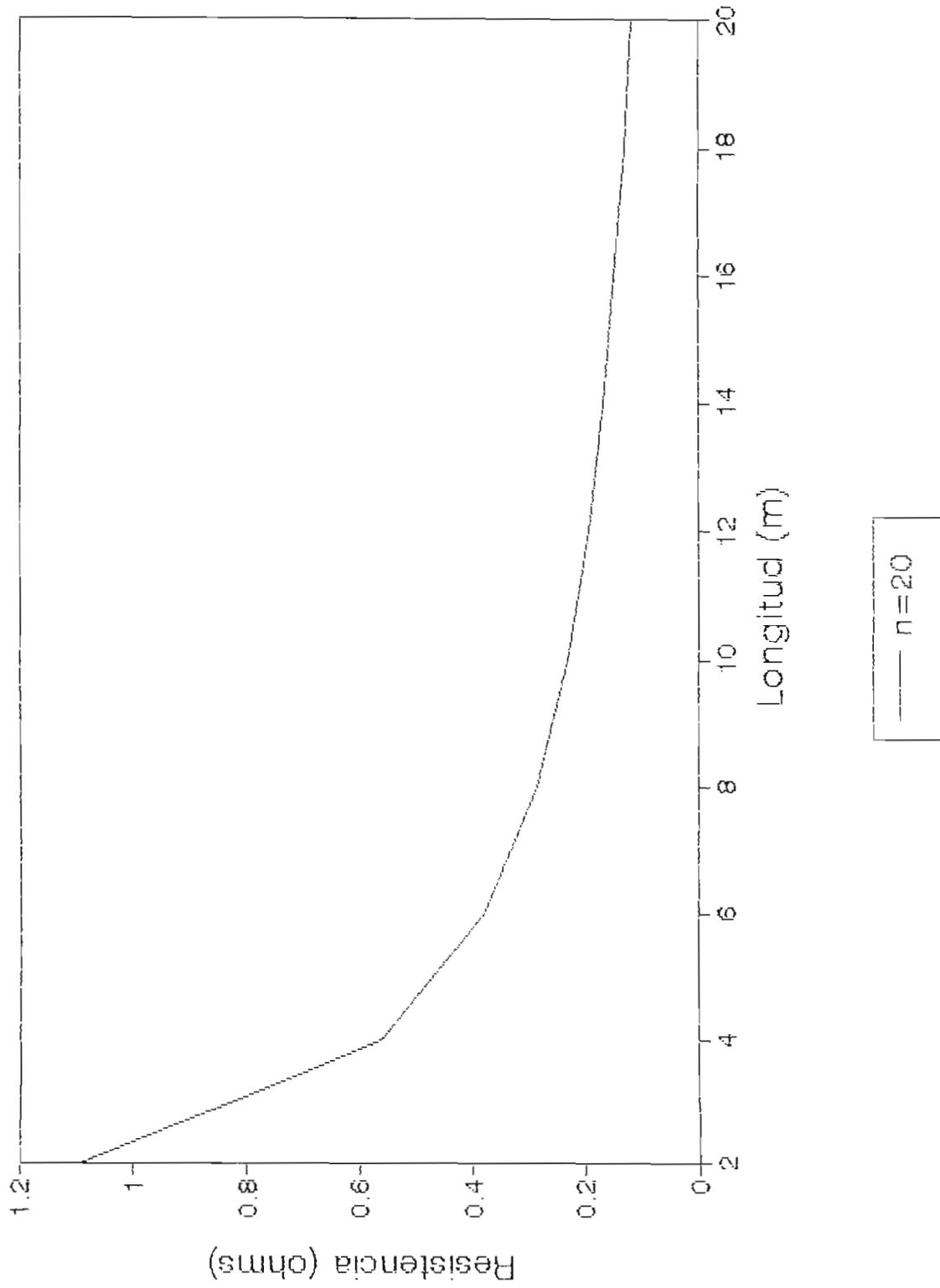


Fig. 1.9
Resistencia vs. Longitud

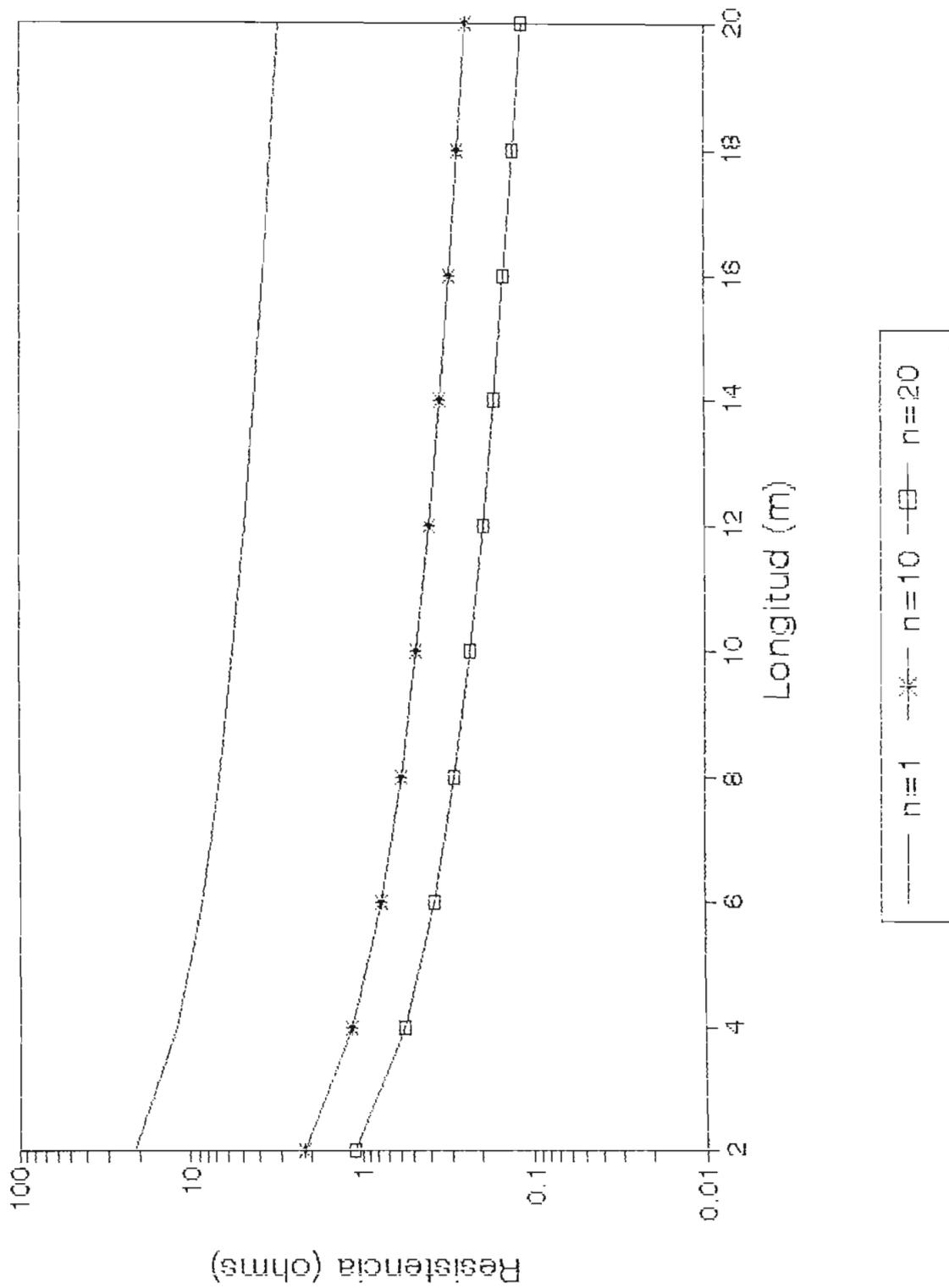


Tabla 1.2

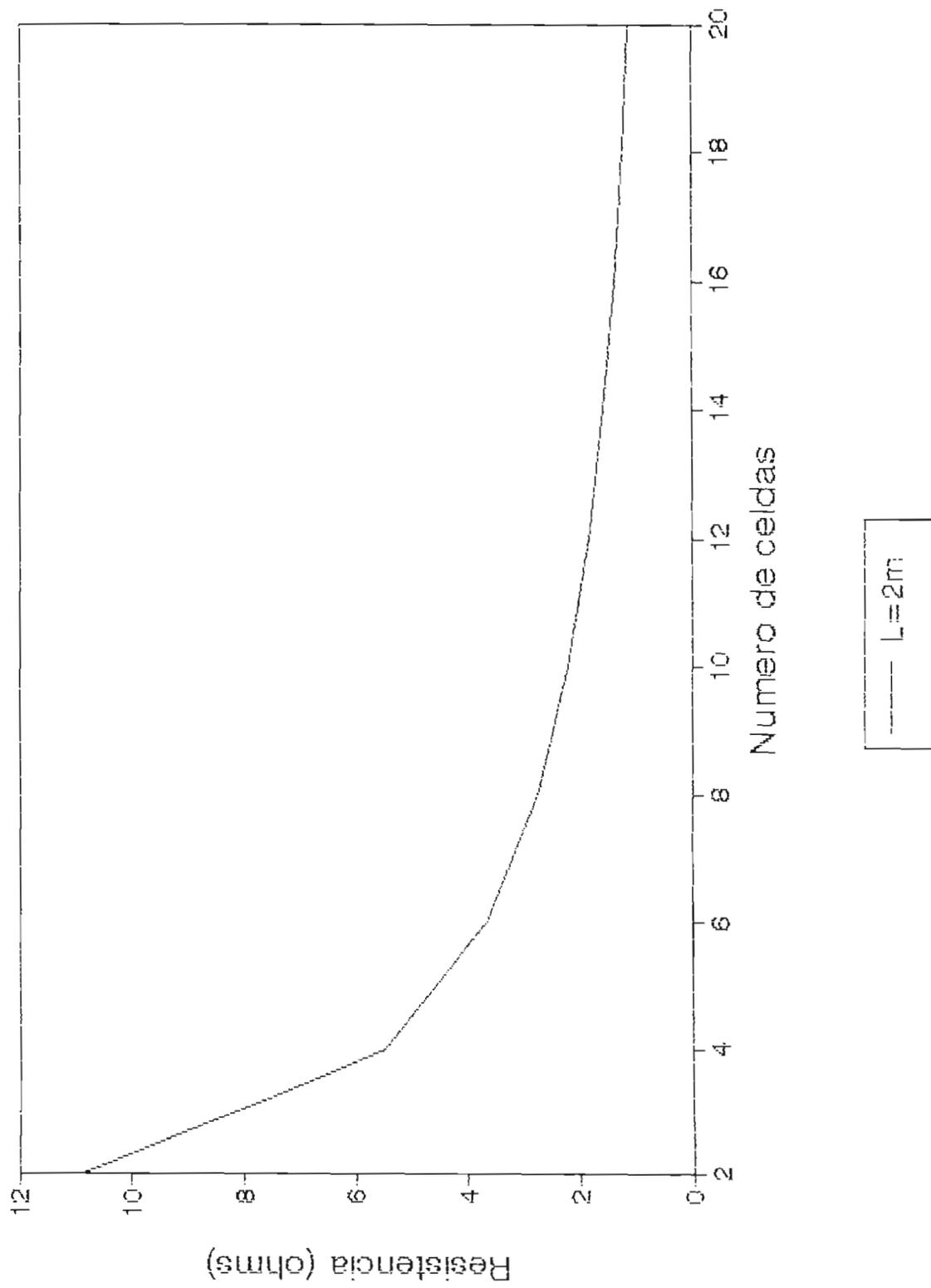
VARIACION DE LA RESISTENCIA CON L			
L (m)	RESISTENCIA (ohmios)		
	n=1	n=10	n=20
2	21.108	2.201	1.098
4	12.027	1.144	0.562
6	8.581	0.777	0.379
8	6.732	0.590	0.286
10	5.568	0.476	0.230
12	4.764	0.400	0.193
14	4.173	0.345	0.166
16	3.719	0.303	0.146
18	3.359	0.270	0.129
20	3.065	0.244	0.117

1.4 NUMERO DE CELDAS

Al decir número de celdas, se refiere al número "n" de cuadros en que se encuentra dividido un lado del electrodo, tal como se indica en la fig. 1.

En la tabla 1.3 se observa que la variación de la resistencia con respecto a n es similar a la que se tenía con respecto a L, es decir, existe una variación muy significativa. Lo mismo se puede observar en los gráficos 1.10, 1.11, 1.12 y 1.13; a pequeños cambios de n corresponden grandes variaciones de resistencia.

Fig. 1.10
Resistencia vs. número de celdas



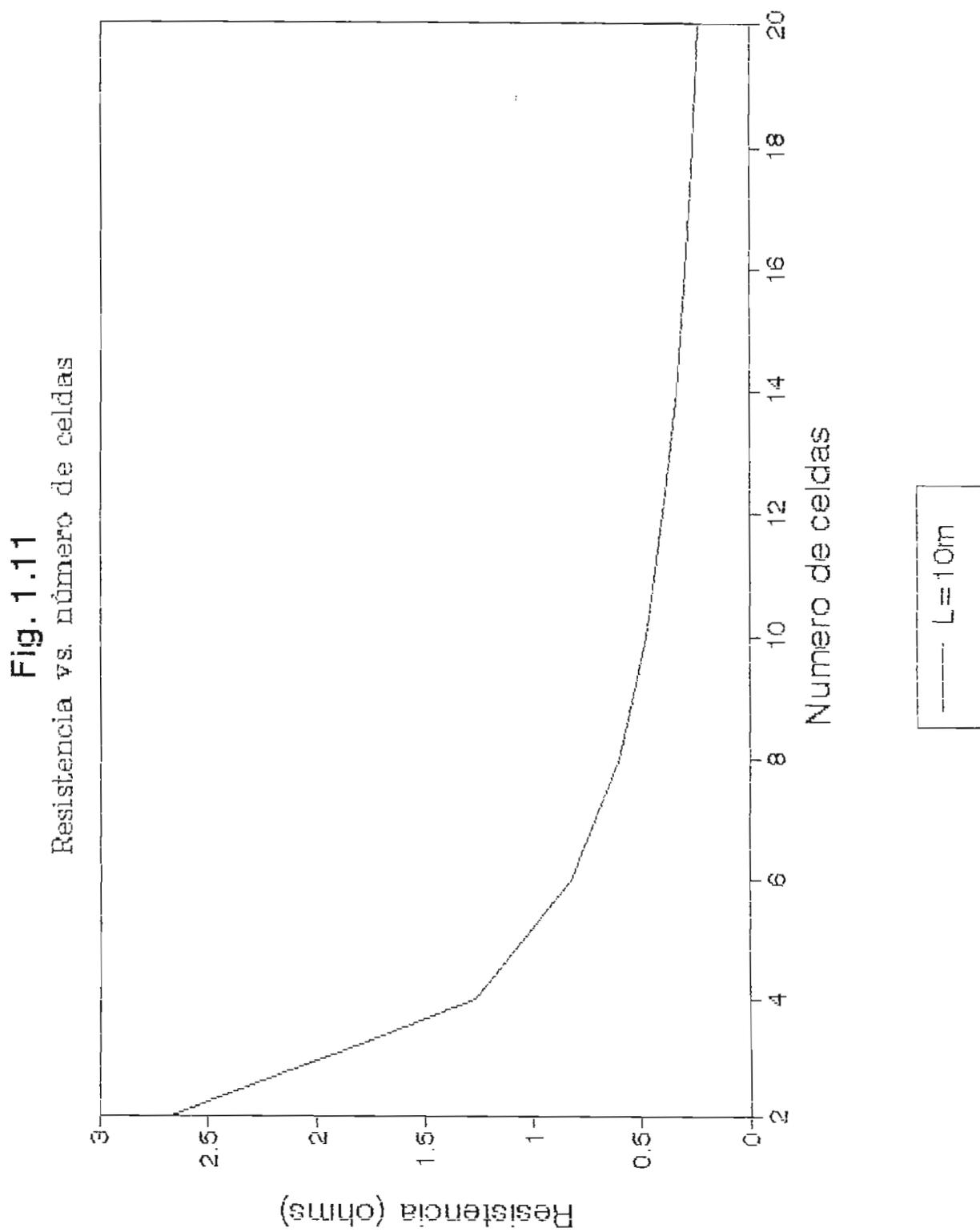


Fig. 1.12
Resistencia vs. número de celdas

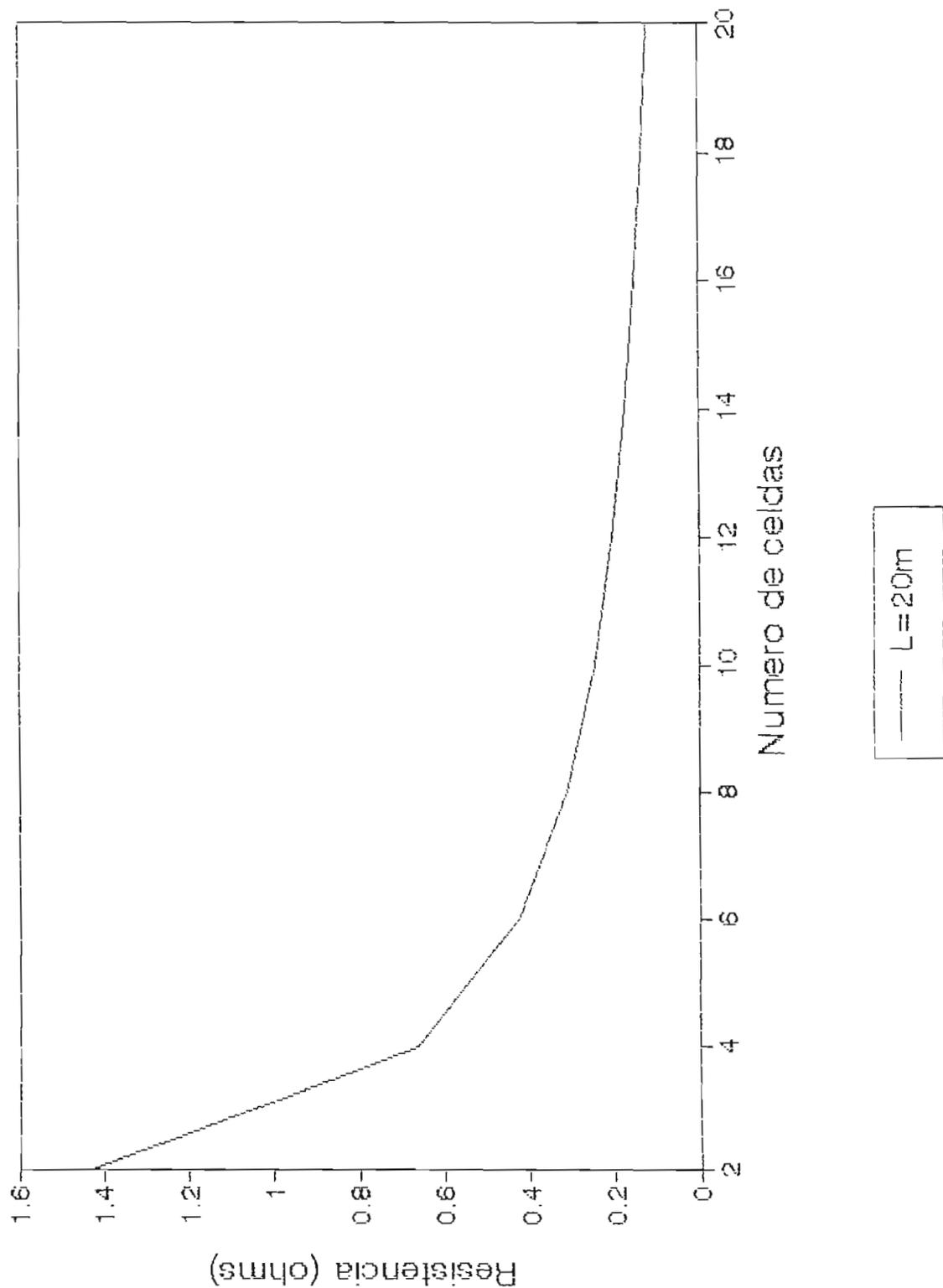


Fig. 1.13
Resistencia vs. número de celdas

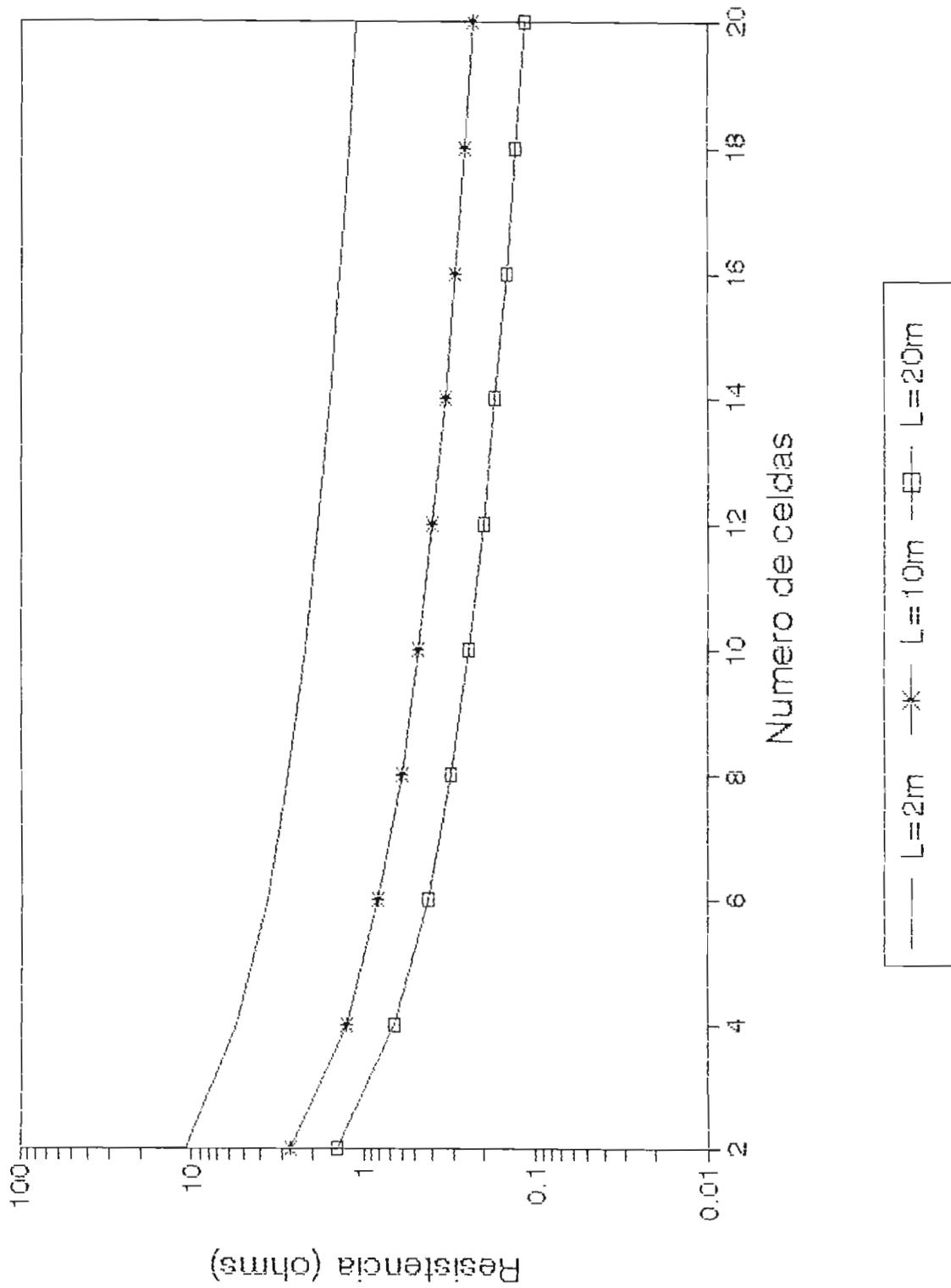


Tabla 1.3

VARIACION DE LA RESISTENCIA CON n			
n	RESISTENCIA (ohmios)		
	L=2	L=10	L=20
2	10.854	2.675	1.432
4	5.476	1.265	0.664
6	3.668	0.819	0.425
8	2.752	0.603	0.311
10	2.201	0.476	0.244
12	1.834	0.396	0.201
14	1.571	0.334	0.171
16	1.374	0.291	0.148
18	1.221	0.257	0.131
20	1.098	0.230	0.117

El número de celdas, según lo analizado, se presenta como otra solución -además de L- para poder obtener la resistencia requerida.

1.5 PROFUNDIDAD DE ENTIERRO

Otro parámetro que podría presentarse como opción para variar la resistencia del electrodo es la profundidad a la que está enterrado éste.

En la tabla 4 se pueden observar resultados de la simulación de cinco electrodos diferentes a cuatro distintas profundidades. Si se analiza, el caso más extremo, n1L2, se observa que, para disminuir la resistencia aproximadamente 3Ω , un 6,7%, la profundidad ha tenido que cuadruplicarse. El caso es más visible en el otro extremo, n20L10, en el que la resistencia disminuye apenas 1,7%, al cuadruplicar la profundidad. Este análisis es suficiente para concluir que la profundidad no es un

parámetro que modifique significativamente el valor de la resistencia, y que no debería ser tomado como opción para hacer variaciones al diseño, razón por la cual no será tomado en cuenta en la deducción del presente método de cálculo. La poca influencia de la profundidad sobre el valor de la resistencia se nota más en las figuras 1.14, 1.15, 1.16, 1.17 y 1.18.

Tabla 1.4

VARIACION DE LA RESISTENCIA CON LA PROFUNDIDAD					
S (m)	RESISTENCIA (ohmios)				
	n1L2	n1L20	n10L2	n16L14	n20L10
0.2	23.169	3.251	2.271	0.212	0.233
0.4	21.623	3.111	2.221	0.210	0.231
0.6	20.691	3.023	2.183	0.209	0.231
0.8	20.031	2.969	2.151	0.208	0.229

La profundidad es un parámetro significativo para el voltaje de paso, ya que la concentración de potencial sobre la superficie de la tierra aumenta cuando disminuye la profundidad de enterramiento del electrodo⁽³⁾; pero el voltaje de paso es un factor que se toma en cuenta en el diseño de grandes puestas a tierra, y ésto no compete a este estudio.

Los resultados que se analizan más adelante corresponden a una profundidad de 0.5 m

1.6 VARILLAS EN EL PERIMETRO

En los resultados de las simulaciones, es interesante observar que la presencia de varillas es significativa para electrodos de pequeñas dimensiones -de hasta 20 metros de longitud total por lado-, en los que la

resistencia sí tiene una clara disminución. Por ejemplo para el caso de un electrodo sin divisiones, de 2 metros de lado ($n1b2$), la resistencia sin varillas es de 21.108 Ω , y con varillas es de 12.988 Ω , reduciéndose un 38%. Pero para el caso de un electrodo dividido en 20 celdas, de 20 metros cada una ($n20b20$), la resistencia sin varillas es de 0.117 Ω , y con varillas es de 0.117 Ω , la resistencia es la misma hasta las milésimas de ohmio; concluyendo que la presencia de varillas en el perímetro, para este caso, resulta intrascendente.

Fig. 1.14
Resistencia vs. Profundidad

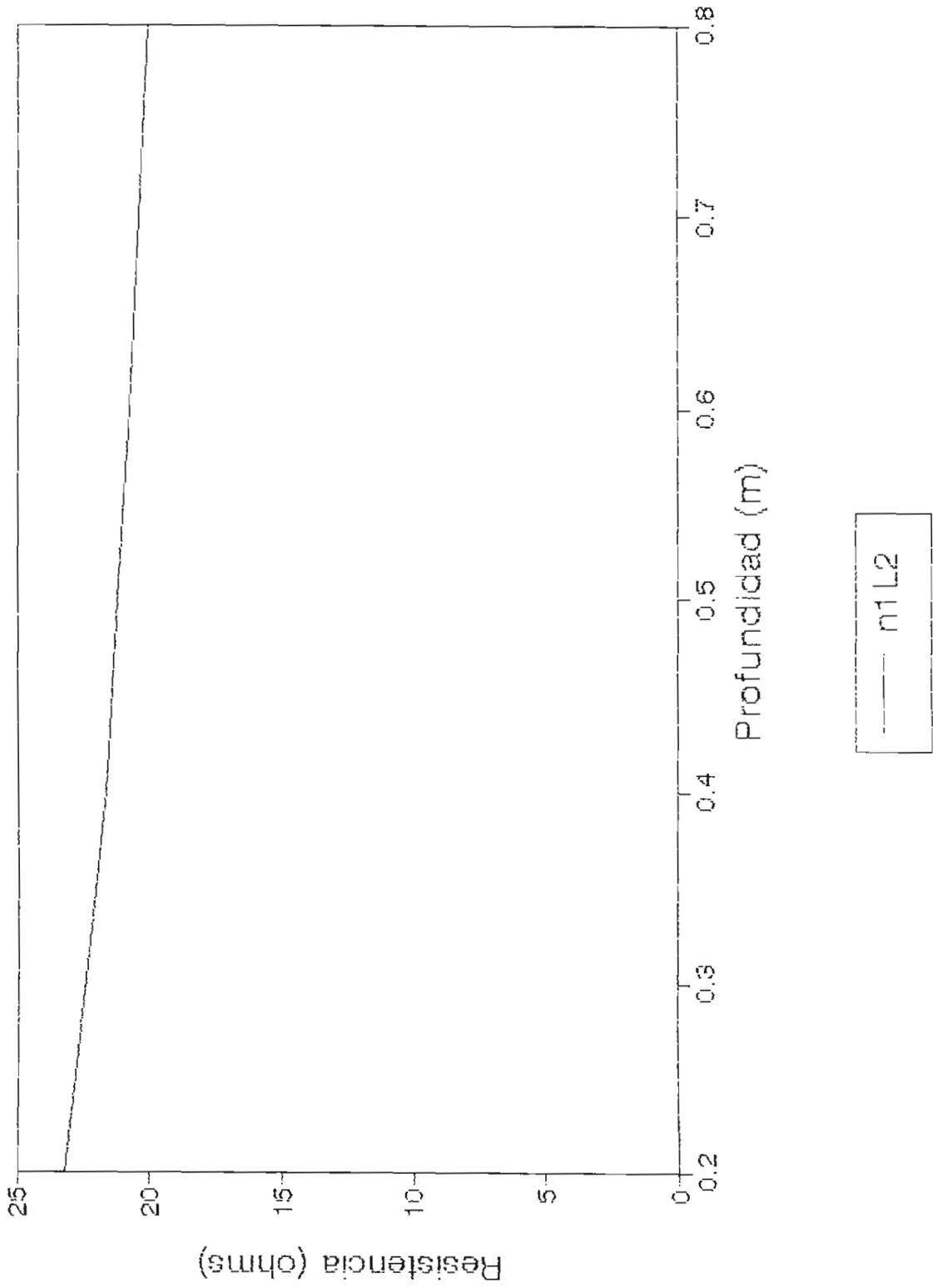


Fig. 1.15
Resistencia vs. Profundidad

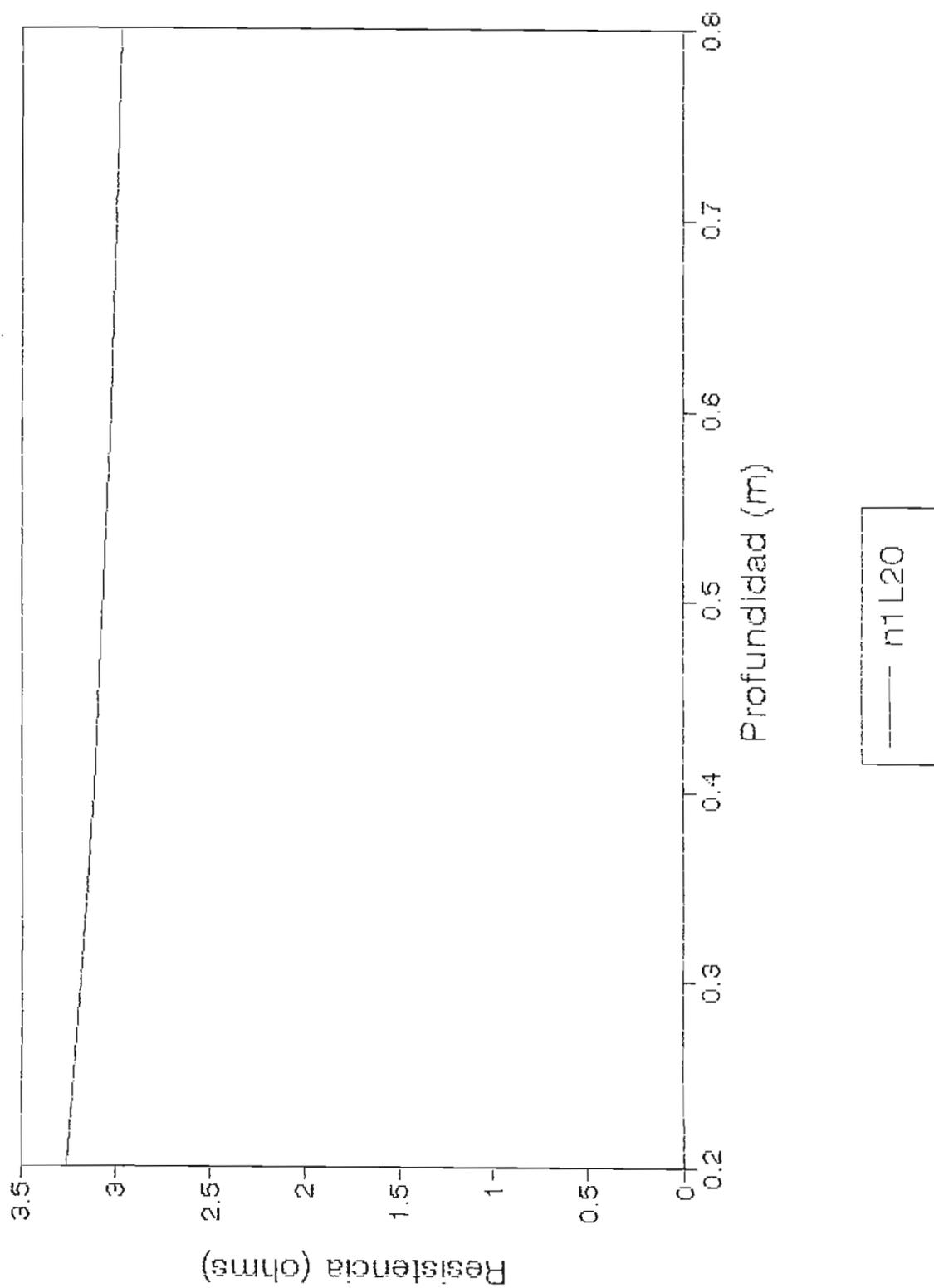
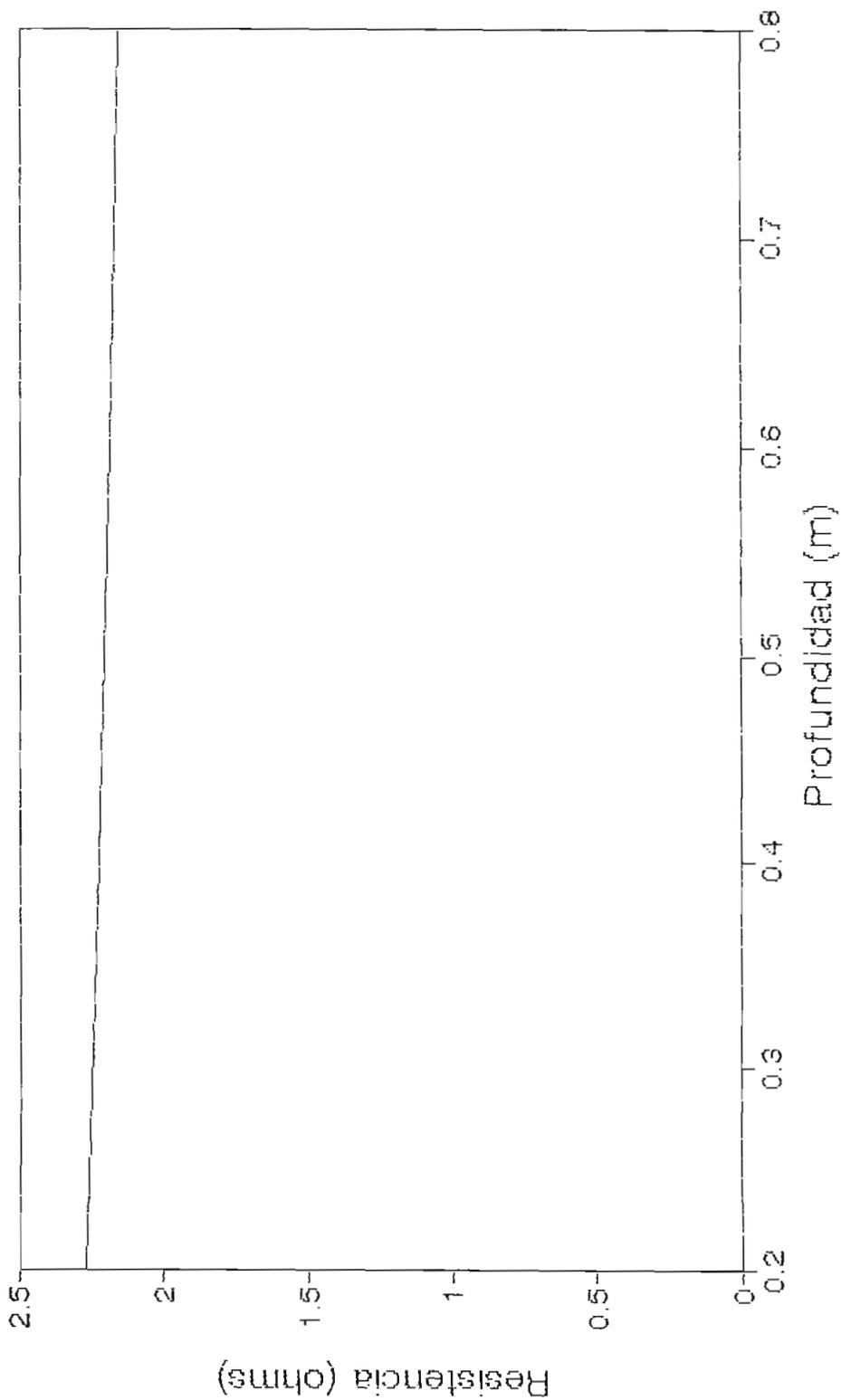


Fig. 1.16
Resistencia vs. Profundidad



n10L2

Fig. 1.17
Resistencia vs. Profundidad

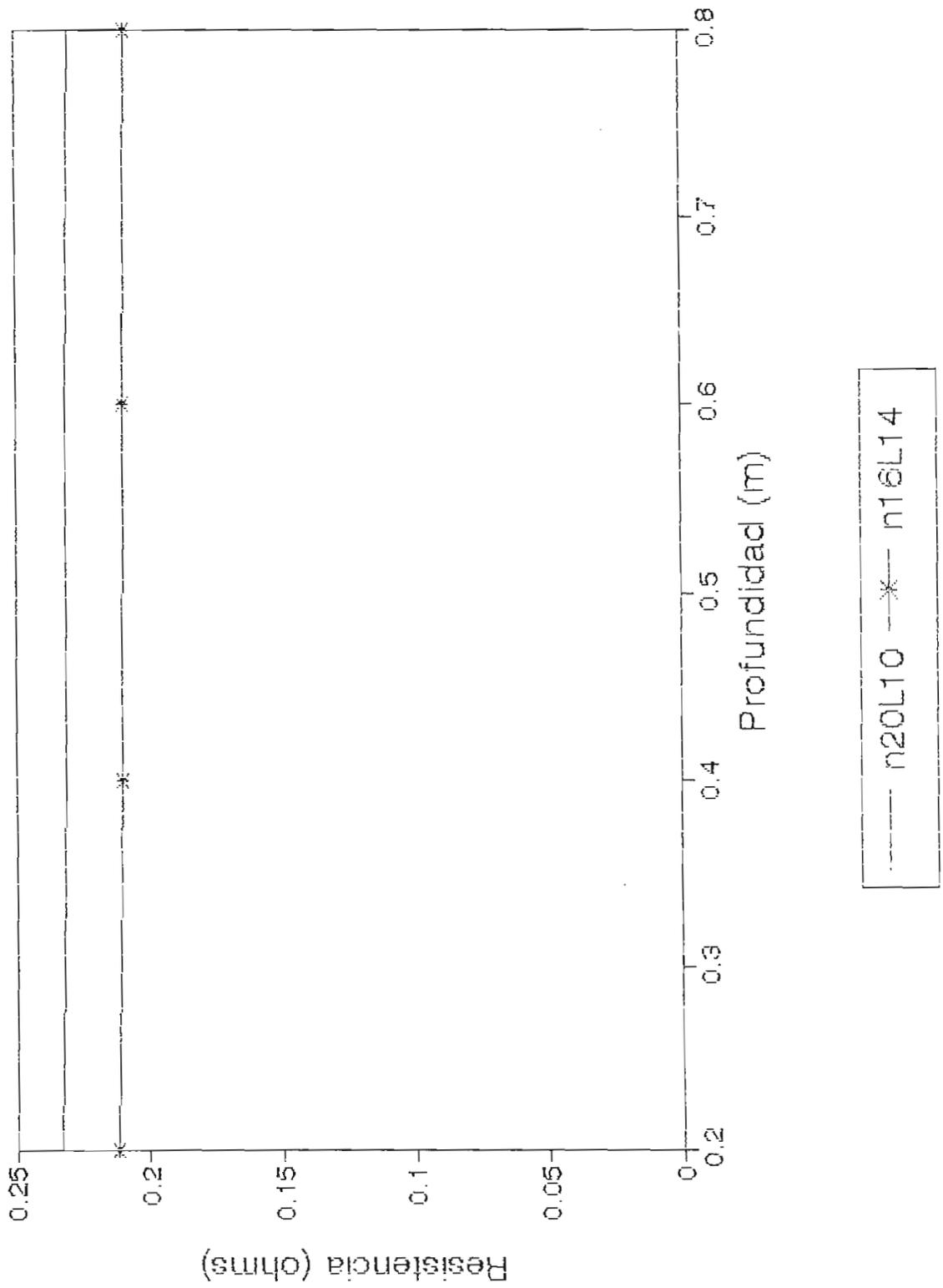
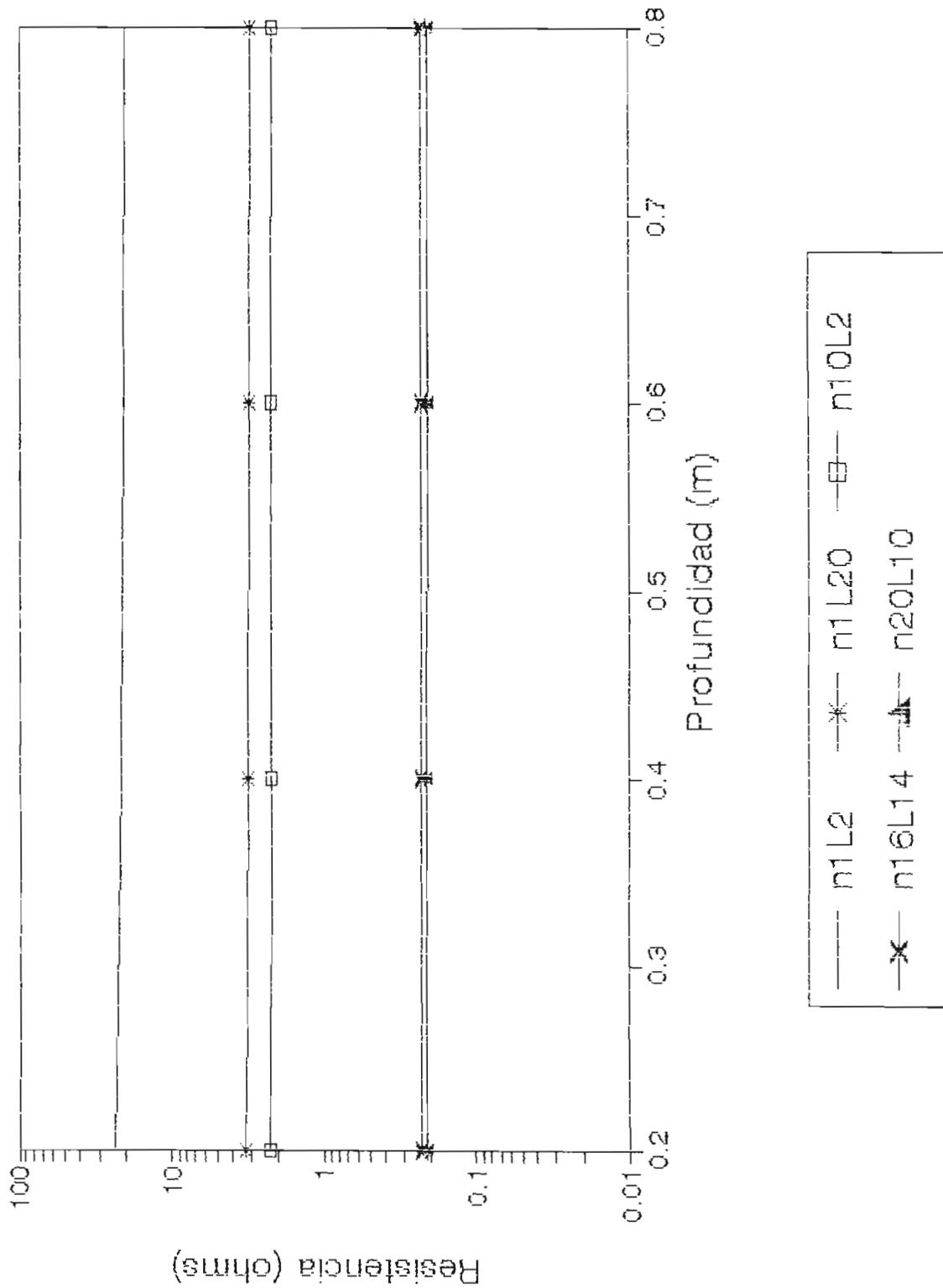


Fig. 1.18
Resistencia vs. Profundidad



CAPITULO 2

METODOS DE CALCULO DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

Existen varios métodos de cálculo de resistencia de puesta a tierra. La elección de qué método ha de utilizarse depende: de su complejidad, del tipo de electrodo que se va a diseñar, del tiempo que se tenga, y de los datos que se dispongan al momento del diseño.

En este capítulo, se presenta un compendio de algunos métodos que se encuentran a disposición del diseñador para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra; y, en donde es posible, su evaluación, comparados con los resultados de la simulación realizada mediante el programa AMT (apéndice A).

2.1 NORMA 80 DE LA IEEE (4)

La norma 80 es una publicación de la IEEE que da un método de diseño de grandes puestas a tierra. Específicamente, da el diseño de puestas a tierra de subestaciones.

Si bien es cierto, el diseño de grandes puestas a tierra no es tema de este estudio, en dicha norma existen métodos de cálculo de resistencia que podrían servir como referencia, y como comparación, con el método desarrollado en este trabajo.

Un primer método que da la norma 80 es la **ecuación simplificada**. Esta ecuación considera que la resistencia de una puesta a tierra depende, principalmente, del área que ésta cubre y aproxima la puesta a tierra a un disco de metal cuya ecuación es:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}}$$

[1]

donde

R_g = Resistencia del electrodo de puesta a tierra en Ω

ρ = Resistividad del suelo en Ω·m

A = Area ocupada por el electrodo en m²

La ecuación 1 no hace diferencia entre electrodos divididos en celdas y los que no lo son. Si se aplica esta ecuación, los electrodos con la misma área ocupada tendrán igual resistencia sin importar el número de divisiones que tengan. Se introduce un nuevo término para esquivar este inconveniente tal como se observa a continuación:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} - \frac{\rho}{L'}$$

[2]

donde L' representa la longitud total de conductor enterrado.

El nuevo término introducido en la ecuación 2, proviene de que una puesta a tierra, en tanto más conductor enterrado tenga, más se aproximará a tener las características de un disco, por lo tanto, como se observa en la ecuación 2, al aumentar L', el término añadido disminuye su influencia, y la ecuación se aproxima a la de un electrodo formado por un disco. Se exponen los resultados en la tabla B.1 del apéndice B. Se observa que el error es grande, y aumenta al aumentar el área y la longitud de conductor enterrado, lo que contradice el criterio con el que la ecuación 2 fue deducida.

Otro método que da la norma 80 es la **aproximación de Sverak**. Esta ecuación, toma en cuenta la profundidad a la que se encuentra enterrado el electrodo que, según la norma, es la principal dificultad de la ecuación 2, aunque, como se vio en el capítulo anterior, la sensibilidad de la resistencia con respecto a la profundidad es pequeña.

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L'} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + s\sqrt{20/A}} \right) \right]$$

[3]

donde s es la profundidad a la que está enterrado el electrodo.

La comparación entre la ecuación 3 y los resultados de la simulación pueden ser observados en la tabla B.2. Se puede ver que esta ecuación tiene errores considerables, pero para el caso de diseño de puestas a tierra de subestaciones el problema no es grave, ya que el error existente es por exceso, es decir, la resistencia, en la práctica, será menor que la resistencia encontrada con la ecuación 3.

Comparando los resultados de la ecuación simplificada y la ecuación de Sverak, éstos se asemejan más al aumentar el tamaño del electrodo. En la mayoría de los casos la ecuación de Sverak arroja resultados menores que los de la ecuación simplificada, esto se debe a que, en la primera, se toma en cuenta la profundidad de entierro (0,5 metros para el presente análisis).

El problema principal que tiene la ecuación de Sverak es que no diferencia entre el conductor que pertenece a la malla, y las varillas conectadas al electrodo. Una mejor aproximación al cálculo de resistencia para electrodos con varillas, es la **ecuación de Schwarz**. Esta

ecuación se basa en que, la resistencia total de un sistema consiste en la combinación de las resistencias de la malla y de las varillas, siendo ésta, menor que cada una de ellas, pero mayor que si fueran conexiones en paralelo de las dos resistencias.

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2R_{12}}$$

[4]

donde

R_1 = Resistencia de la malla

R_2 = Resistencia de las varillas enterradas

R_{12} = Resistencia mutua entre la malla del electrodo y las varillas enterradas.

Los valores de cada una de las resistencias descritas en la ecuación anterior pueden ser obtenidos de la siguiente manera:

$$R_1 = (\rho_1/\pi l_1) [\ln (2l_1/s') + K_1(l_1/\sqrt{A}) - K_2]$$

[5]

$$R_2 = (\rho_a/2n\pi l_2) [\ln (8l_2/d_2) - 1 + 2K_1(l_2/\sqrt{A}) (\sqrt{n} - 1)^2]$$

[6]

$$R_{12} = (\rho_1/\pi l_1) [\ln (2l_1/l_2) + K_1(l_1/\sqrt{A}) - K_2 + 1]$$

[7]

donde:

ρ_1 = Resistividad del suelo en el que está enterrada la malla a una profundidad s en $\Omega \cdot m$

ρ_a = Resistividad aparente vista por una varilla en $\Omega \cdot m$

l_1 = Longitud total de los conductores que conforman la malla en m

l_2 = Longitud promedio de una varilla en m

- s = Profundidad a la que está enterrada la malla en m
 s' = $\sqrt{d_1 s}$ para conductores enterrados a una profundidad s , o $0.5 d_1$, para conductores a $s = 0$ (sobre la superficie del suelo).
 A = Area cubierta por la malla
 n = Número de varillas colocadas en el área A
 $K_1 K_2$ = Constantes relacionadas a la geometría del sistema [fig. 2.1 y 2.2]
 d_1 = Diámetro del conductor de la malla en m
 d_2 = Diámetro del conductor de las varillas en m

Como se puede ver, este método de cálculo es algo complejo, y no puede ser realizado si no se tienen a mano las curvas de las figuras 2.1 y 2.2.

Los resultados de la evaluación de este método pueden observarse en la tabla B.3. El método tiene validez si la resistencia no es menor que 1Ω . Hasta esos valores, el error no llega al 20%. Pero si se quiere tener resistencias menores, el método empieza a perder validez, porque los errores bordean el 100%. Otra desventaja de este método, es que, para utilizarlo, se necesita tener disponibles mínimo tres ecuaciones, que son necesarias para poder luego ser utilizados los resultados en la ecuación final.

2.2 NORMA 142 DE LA IEEE (5)

La norma 142 da algunas ecuaciones para el cálculo de la resistencia de electrodos con diversas formas como: varillas, anillos, discos, etc. El diseñador que quiera realizar una puesta a tierra con alguna de las formas expuestas por la norma 142, puede ver las ecuaciones en el anexo C.

Estas ecuaciones son muy exactas, principalmente porque los parámetros que se incluyen no son complicados

Fig. 2.1
Ecuacion de Swarz-Coefficiente K1

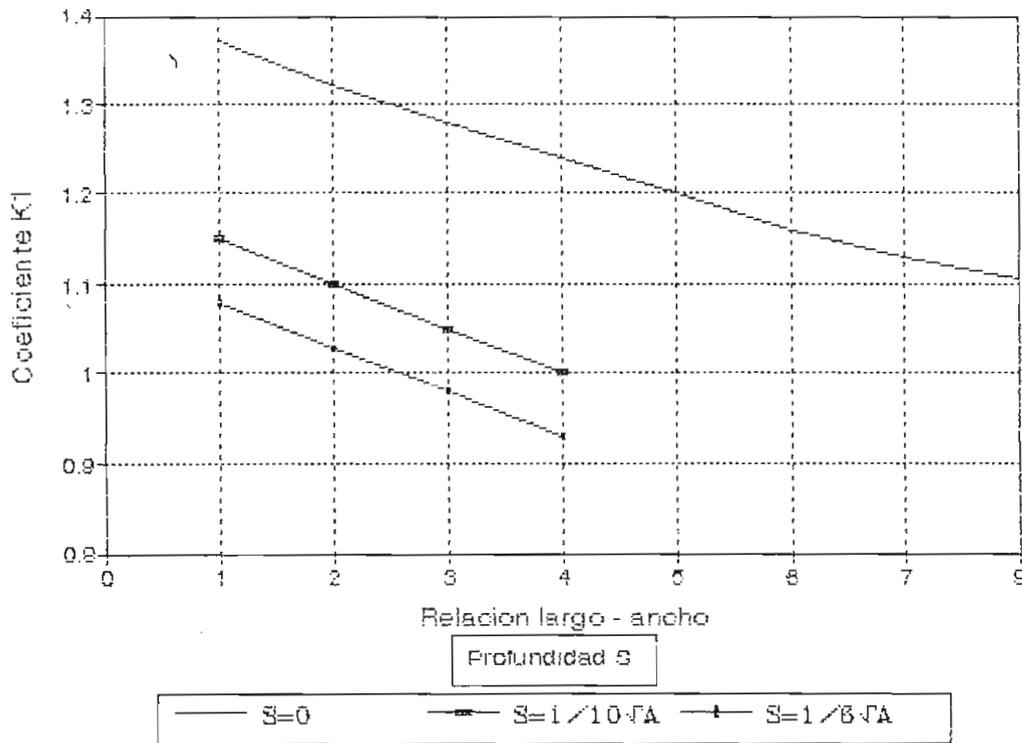
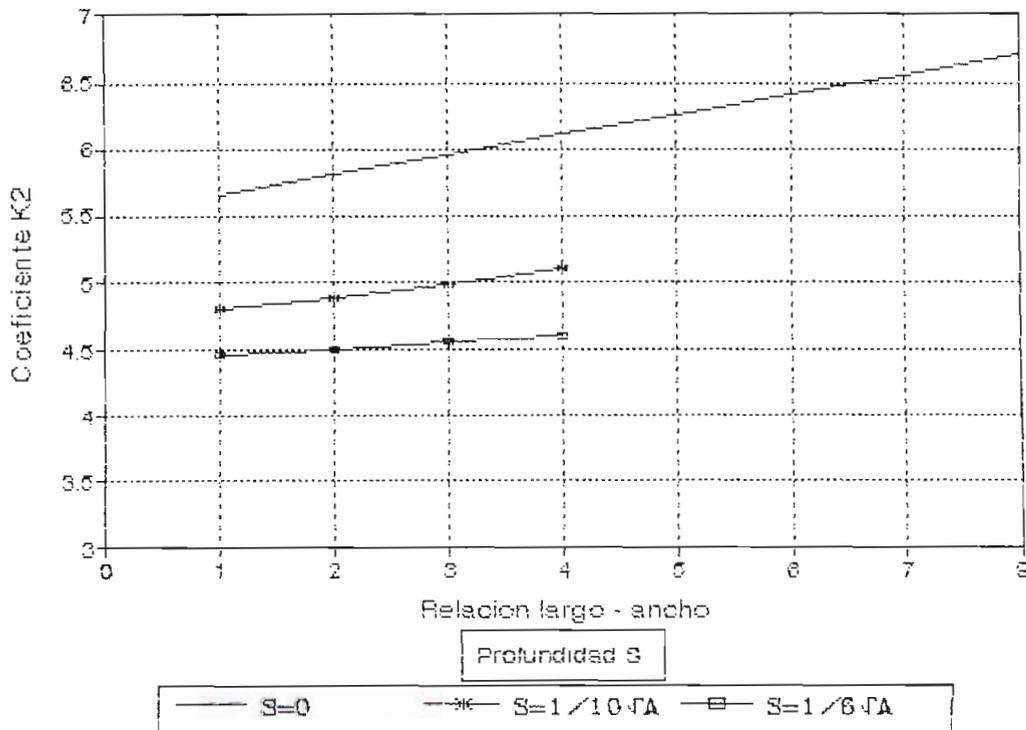


Fig. 2.2
Ecuacion de Schwarz-Coefficiente K2



como los de la norma 80. En la mayoría de electrodos se toma en cuenta el radio, la profundidad, la longitud, desechando en casi todos, el área que abarca el electrodo. Lamentablemente, entre las formas de electrodos disponibles en la norma 142 no se encuentran electrodos cuadrados o rectangulares, por lo que para este caso, es necesario utilizar otra metodología.

2.3 METODO DE LOS MOMENTOS (1)

Este método se basa en que la mayoría de electrodos pueden ser representados por la unión de pequeños segmentos, y éstos a su vez, formados por electrodos puntuales.

Se realiza el análisis solamente para suelo homogéneo, ya que es el tipo de suelo estudiado en todo el trabajo.

En primer lugar se describe el comportamiento de un electrodo puntual.

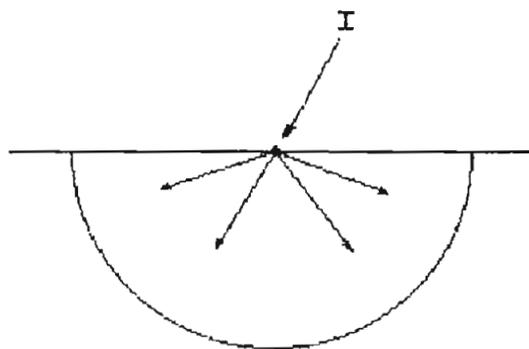


Fig. 2.3

Electrodo puntual recibiendo una corriente I.

Suponiendo una corriente I que llega al electrodo puntual -figura 2.3- por medio del método de las imágenes, para un suelo homogéneo, el potencial inducido por los dos electrodos (el electrodo y su imagen) en un punto P a una distancia r respecto del punto remoto es:

$$V(P) = \frac{\rho \cdot I}{4 \cdot \pi} \left[\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right]$$

[8]

donde r' es la distancia de la imagen al punto P.

Una vez obtenido el potencial para un electrodo puntual, se procede a extender el análisis al caso de un conductor lineal. Se considera al conductor formado por infinitos electrodos puntuales; dichos electrodos constituirán, entonces, un diferencial del conductor. El potencial del electrodo formado por el conductor lineal sobre un punto P estará dado por la ecuación 9.

$$V(P) = \frac{\rho}{4 \cdot \pi} \int_{\psi} i \cdot \left[\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right] dl$$

[9]

Siendo i la densidad de corriente lineal, y que, para este caso, se considera constante. Por lo tanto la ecuación 9 queda expresada como:

$$V(P) = \frac{\rho \cdot i}{4 \cdot \pi} \int_{\psi} \left[\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right] dl$$

[10]

El símbolo ψ significa que la integración ha de llevarse a cabo en toda la trayectoria del conductor.

En este trabajo no se darán pormenores de la resolución de la integral expresada en la ecuación 10. Si hay interés en conocer el desarrollo de esta integral, éste se explica detalladamente en la referencia 1.

Se procede a continuación a encontrar el potencial medio que un electrodo j induce en un electrodo k . Este está dado por la ecuación 11.

$$\bar{V}_{jk} = \frac{\int_{\psi} V_{jk} dl}{l(\psi)}$$

[11]

V_{jk} es el potencial que produce el conductor j en un punto cualquiera del conductor k , y está dado por la ecuación 10. $l(\psi)$ es la longitud de la trayectoria del electrodo k .

La resistencia mutua entre el conductor j y el conductor k viene dada por la ecuación 12.

$$R_{jk} = \frac{\bar{V}_{jk}}{I_j}$$

[12]

cumpléndose que:

$$R_{jk} = R_{kj}$$

[13]

Hasta ahora se ha analizado el comportamiento de electrodos formados por conductores lineales. El método de los momentos aprovecha este estudio, y divide a cualquier tipo de electrodo en segmentos lineales. Mientras se divida el electrodo en más segmentos, será más exacta la solución, ya que se asume que la densidad lineal de corriente es constante en cada segmento.

En un electrodo dividido en n segmentos, el potencial debido a sí mismo, y al resto de segmentos viene dado por la ecuación 14.

$$V_k = \sum_{j=1}^n R_{jk} I_j$$

[14]

donde

R_{jk} = Resistencia mutua entre los electrodos j y k

I_j = Corriente que abandona el j -ésimo electrodo

De la ecuación 14, aplicada a cada segmento en que ha sido dividido el electrodo, se obtiene un sistema de ecuaciones que matricialmente se puede expresar:

$$[R][I] = [V]$$

[15]

donde

[R] = Matriz de resistencias mutuas

[I] = Vector de corrientes que abandonan cada segmento

[V] = Vector de potenciales de cada segmento

Para la resolución de este sistema de ecuaciones, se asume la caída de potencial nula dentro del electrodo. Por lo tanto los potenciales de los segmentos serán iguales entre sí, e iguales al potencial de la tierra remota (GPR), y por facilidad, se los iguala a la unidad.

La corriente total que abandona el electrodo es:

$$I = \sum_{j=1}^n I_j$$

[16]

El potencial que alcanza el electrodo respecto a la tierra remota es:

$$GPR = R_g \cdot I \quad [17]$$

Como se dijo anteriormente, el GPR es igual a 1, por lo tanto, la resistencia del electrodo es:

$$R_g = \left[\sum_{j=1}^n I_j \right]^{-1} \quad [18]$$

Como se habrá notado, el cálculo de la resistencia por este método es sólo para desarrollos teóricos de estudios acerca de la resistencia de electrodos de puesta a tierra, y es demasiado complicado para ser utilizado en la práctica, aun más si se considera que las integrales no han sido desarrolladas en esta sección. No obstante, si se quiere ver la utilización de este método; en el subcapítulo 3.2.1.1 se encuentra su aplicación en un electrodo cuadrado sin varillas.

2.4 METODO DE TAGG⁽⁸⁾

Tagg desarrolla una metodología para el cálculo de electrodos con varillas. Este método se basa en elementos de Teoría Electromagnética y algunos resultados empíricos.

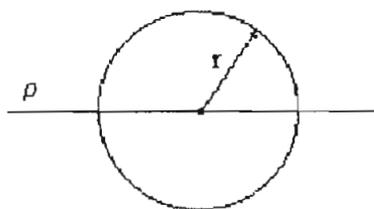


Fig 2.4

Electrodo esférico de radio r en un medio de resistividad ρ

La resistencia para un electrodo formado por una esfera como la mostrada en la fig 2.4 viene dada por:

$$R_g = \frac{\rho}{4\pi C}$$

[19]

donde C es la capacitancia entre electrodos.

Para el caso de una esfera de radio r, se cumple que $C=r$, quedando la ecuación:

$$R_g = \frac{\rho}{4\pi r}$$

[20]

En la práctica, el electrodo es una semiesfera enterrada, por lo que la resistencia es el doble, es decir:

$$R_g = \frac{\rho}{2\pi r}$$

[21]

Generalizando para cualquier forma de electrodo:

$$R_g = \frac{\rho}{2\pi C}$$

[22]

Para el caso de una varilla la capacitancia es:

$$C = \frac{1}{\ln(4l/d)}$$

[23]

Sustituyendo C en 22, la resistencia para una varilla es:

$$R_g = \frac{\rho}{2\pi l} \ln(4l/d)$$

[24]

Luego Tagg realiza el análisis de electrodos con dos varillas, con tres varillas en línea recta y tres varillas en triángulo. Cada problema fue resuelto haciendo que la ecuación quede en función de la relación entre la resistencia de una varilla y las varillas que forman el electrodo (Resistencia de N varillas / Resistencia de 1 varilla). En lo que concierne a este trabajo, se procede ahora con el caso de varillas en cuadrado hueco, como se muestra en la figura 2.5.

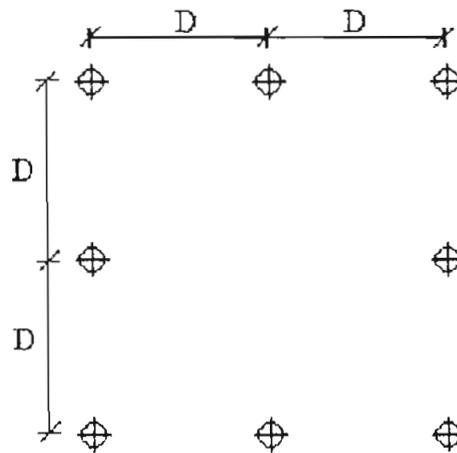


Fig. 2.5

Varillas formando un cuadrado hueco

La ecuación que se aplica para el cálculo de la resistencia para este electrodo es:

$$\frac{\text{Resistencia de N varillas en paralelo}}{\text{Resistencia de 1 varilla}} = \frac{1 + k\alpha}{N}$$

[25]

donde

- k = constante que se encuentra según la tabla 2.4
 α = relación r/D
 r = radio de la semiesfera equivalente, calculado según la ecuación 22, reemplazando con la capacitancia C .
 D = distancia entre las varillas, según se muestra en la fig. 2.5

Tabla 2.1

VALOR DE K DE ACUERDO AL NUMERO DE VARILLAS	
N	K
4	2.7071
8	4.2583
12	5.3939
16	6.0072
20	6.4633
24	6.8363
28	7.1479
32	7.4195
36	7.6551

En este método no se toma en cuenta el conductor que une a las varillas, se desprecia su influencia. En la tabla B.4 se puede observar la comprobación de la validez de este método comparado con los resultados de la simulación.

Se ve que el mayor error que se da al utilizar este método cuando $L=2$, es de 19.71%. El error aumenta al aumentar la distancia de separación, $L=4$, y llega al 55%. Es lógico este resultado, ya que al tener una mayor cantidad de celdas, crece la influencia del conductor que forma la malla.

Se comprobó el método de Tagg con electrodos que no están unidos entre sí por medio de un conductor, y que se encuentran en la superficie, ya que ésta es la forma en que dedujo Tagg las ecuaciones. El error se reduce para el caso en que se tiene $n'=2$, es decir, en la nomenclatura utilizada en el presente estudio, cuando $n=1$ a 1.3%, y aumenta conforme aumenta el número de varillas, lo que puede revelar defecto en las mediciones de Tagg. Para el caso de $L=4$ el error disminuye considerablemente, llegando a ser de 13% en el peor de los casos.

Se han obtenido nuevos valores de K (Tabla 2.2), de tal manera que todos los errores se hagan cero. Se toma como referencia principal el caso en el que $D=2$, ya que éste es el caso de mayor validez del método de Tagg.

Tabla 2.2

NUEVOS VALORES DE K OBTENIDOS DE A.M.T.	
N	K
4	2.919
8	6.186
12	8.107
16	9.139
20	10.450
24	11.265
28	11.946
32	12.523
36	13.034

De los resultados obtenidos, se consideraría la utilización del método de Tagg solo para el caso de tener una longitud de 2 metros, o menos para cada celda, pues en ese caso son menores los errores.

CAPITULO 3

ECUACION PARA EL CALCULO DE LA RESISTENCIA DE ELECTRODOS FORMADOS POR CONDUCTORES EN DISPOSICION CUADRANGULAR

Después del desarrollo del capítulo anterior, es evidente que el mayor problema que se tiene para el cálculo de la resistencia, se da en el caso de electrodos cuadrados. Los métodos existentes para el cálculo de la resistencia son complicados y/o tienen errores demasiado grandes.

En este capítulo se desarrolla una metodología para el cálculo de la resistencia de electrodos cuadrados. Se establece como objetivo la sencillez de la ecuación resultante y su exactitud. Esta metodología está basada en el análisis de las ecuaciones de la norma 142 de la IEEE.

3.1 PUNTOS COMUNES ENTRE LAS ECUACIONES DE LA NORMA 142 DE LA IEEE

Las ecuaciones de la norma 142, a pesar de servir para muy variadas formas de electrodos, tienen elementos comunes que sirven como referencia para el desarrollo de una sola ecuación que sirva para encontrar la resistencia de electrodos cuadrados. Los puntos comunes entre estas ecuaciones son:

- * Todas tienen un término $2 \cdot \pi \cdot L$, o algún múltiplo del mismo, en el denominador.
- * La resistencia de puesta a tierra es directamente proporcional a la resistividad del suelo en el que está enterrado el electrodo.

- * Casi todas las ecuaciones tienen un término en forma de logaritmo natural.
- * Dentro de los logaritmos se tienen fracciones cuyo numerador es la longitud del lado, brazo, o del conductor enterrado, dependiendo de la forma de la puesta a tierra; y el denominador es el radio, o la profundidad a la que está enterrado el electrodo.
- * En general, existe siempre un término independiente.
- * Hay términos adicionales que son fracciones, cuyo numerador es la profundidad, y cuyo denominador es la longitud que se encuentra dentro del término logarítmico.

De las consideraciones anteriores, para la formulación de una ecuación se elimina la influencia del radio o la profundidad, porque, como se dijo en el capítulo 1, estos parámetros no contribuyen significativamente a la variación de la resistencia del electrodo.

3.2 ELECTRODOS CUADRADOS SIN VARILLAS

En principio se pensaría en una puesta a tierra, como una varilla a la que se conectan todos los elementos que irían a tierra. Pero una sola varilla, difícilmente daría la resistencia requerida (una varilla tiene aproximadamente 50Ω de resistencia). Se necesita, por lo tanto, la instalación de muchas varillas; pero estas varillas deben estar conectadas entre sí. Cuando el electrodo llega a tener grandes dimensiones, las varillas pierden influencia, comparada con el aporte de la malla que se forma con el conductor que las une. Es entonces cuando el diseñador está en libertad de prescindir de la colocación

de varillas, y se hace más importante el conductor horizontal que forma parte del electrodo. (6)

3.2.1 ELECTRODOS CUADRADOS SIN DIVISIONES

El cuadrado sin divisiones es un electrodo que sólo está formado por un conductor horizontal conectado en forma cuadrangular. Es la forma más simple de electrodo cuadrado que se puede instalar.

3.2.1.1 DEDUCCION DE LA ECUACION POR EL METODO DE LOS MOMENTOS

La ecuación que se dará a conocer a continuación, es un desarrollo teórico, basado en conocimientos de Teoría Electromagnética. Esto se recalca, porque las ecuaciones que se desarrollarán más adelante son empíricas, basadas en el análisis de los resultados de la simulación en el programa AMT.

La nomenclatura para las resistencias propias y mutuas se define según la figura 3.1

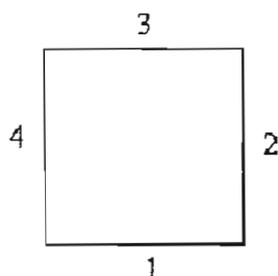


Fig. 3.1

Nomenclatura para la deducción de una ecuación por el método de los momentos

Para la utilización del método de los momentos, se tomará al electrodo dividido en segmentos con una longi-

tud igual a cada lado del cuadrado. Por lo tanto, en este electrodo habrá cuatro segmentos.

Para formar la matriz de resistencias de la ecuación 15, debido a la simetría del electrodo, se observan las siguientes igualdades:

$$R_{11} = R_{22} = R_{33} = R_{44} = R_1$$

$$R_{12} = R_{21} = R_{14} = R_{41} = R_{23} = R_{32} = R_{34} = R_{43} = R_2$$

$$R_{13} = R_{31} = R_{24} = R_{42} = R_3$$

[26]

Las resistencias mutuas son iguales, porque cada uno de los segmentos tiene la misma longitud y el mismo radio.

Para analizar la igualdad de las resistencias mutuas entre segmentos colaterales (R_{12} , R_{34} , etc.), compárese las figuras 3.2 (a) y 3.2 (b).

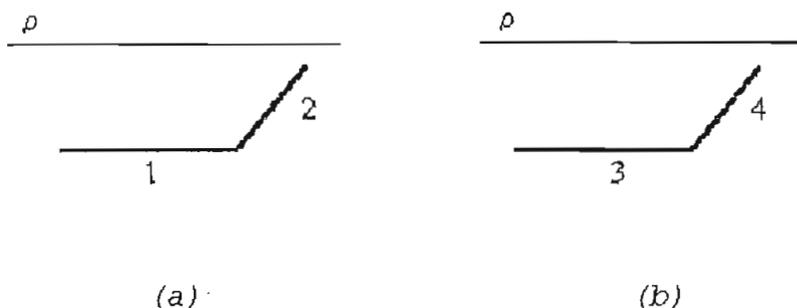


Fig. 3.2

Simetría del electrodo. Los electrodos 2 y 4 se observan iguales viéndolos desde 1 o desde 3 respectivamente.

La integral de la ecuación 11 se realiza desde el eje del segmento j , y, por la simetría del electrodo que se está analizando, la integral será la misma, tanto para R_{12} , como para R_{34} , y lo mismo sucede con el resto de segmentos colaterales.

El mismo análisis realizado para segmentos colaterales podría ser hecho para la resistencia mutua entre segmentos frontales (R_{13} y R_{24}).

Como conclusión de las igualdades de la ecuación 26, la ecuación 15 quedará:

$$\begin{bmatrix} R1 & R2 & R3 & R2 \\ R2 & R1 & R2 & R3 \\ R3 & R2 & R1 & R2 \\ R2 & R3 & R2 & R1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I1 \\ I2 \\ I3 \\ I4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V1 \\ V2 \\ V3 \\ V4 \end{bmatrix}$$

[27]

es decir, el problema se reduce a encontrar tres resistencias.

Para la resolución de la **resistencia propia $R1$** , se considera al conductor 1, y se calcula el potencial que éste induce a una distancia igual al radio. Se hace de esta manera, porque la integral de la ecuación 10 se puede hacer en todos los puntos menos en el mismo eje del conductor, de ahí la necesidad de considerar el radio en éste cálculo. Resolviendo la ecuación 10 se tiene:[1]

$$V(p) = \frac{\rho \cdot i}{4 \cdot \pi} \left[\operatorname{asinh} \left(\frac{L - \lambda}{\sqrt{r^2}} \right) + \operatorname{asinh} \left(\frac{\lambda}{\sqrt{r^2}} \right) + \operatorname{asinh} \left(\frac{L - \lambda}{\sqrt{r^2 + 4s^2}} \right) + \operatorname{asinh} \left(\frac{\lambda}{\sqrt{r^2 + 4s^2}} \right) \right]$$

[28]

donde

- L = longitud de un lado del cuadrado que forma el electrodo.
- λ = coordenada que indica el punto en el cual se calcula el potencial dentro del conductor 1.
- r = radio del conductor.
- s = profundidad a la que está enterrado el electrodo.

En la figura 3.3 se puede ver con más claridad el significado de éstos términos. Nótese que en la ecuación, resulta el mismo potencial calculado en 0 y en L; por lo tanto λ puede ser tomado desde cualquiera de los extremos del segmento.

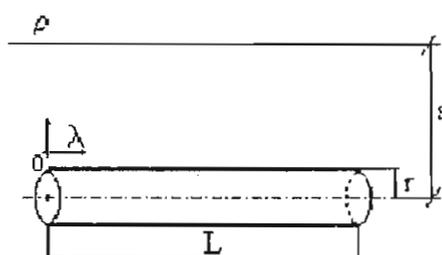


Fig. 3.3

Parámetros para el cálculo
de la resistencia propia R1

Del potencial encontrado en la ecuación 28, se puede encontrar el potencial medio con la ecuación 11. En este caso se tiene que dividir la integral para la longitud del conductor.

Calculado el potencial medio, se puede encontrar R1 con la ecuación 12, de donde resulta:

$$R1 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L^2} \left[r + L \cdot \operatorname{asnh} \left(\frac{L}{r} \right) - \sqrt{L^2 + r^2} + \sqrt{r^2 + 4s^2} \right. \\ \left. + L \cdot \operatorname{asnh} \left(\frac{L}{\sqrt{r^2 + 4s^2}} \right) - \sqrt{L^2 + r^2 + 4s^2} \right]$$

[29]

Una vez calculada la resistencia propia, se procede al desarrollo de la ecuación para encontrar la **resistencia mutua R2** entre segmentos colaterales. Se sigue el mismo camino de cálculo de R1. El potencial que el segmento 1 induce sobre el segmento 2, de la ecuación 10, es:

$$V(p) = \frac{\rho \cdot i}{4 \cdot \pi} \left[\operatorname{asinh} \left(\frac{L}{\sqrt{\lambda^2}} \right) + \operatorname{asinh} \left(\frac{L}{\sqrt{\lambda^2 + 4s^2}} \right) \right]$$

[30]

La resistencia R2 será:

$$R2 = \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot L^2} \left[1,763 \cdot L + 2 \cdot L \cdot \operatorname{asinh} \left(\frac{L}{\sqrt{L^2 + 4s^2}} \right) + 2 \cdot s \cdot \operatorname{atan} \left(\frac{-L^2}{2 \cdot s \cdot \sqrt{2L^2 + 4s^2}} \right) \right]$$

[31]

Por último, se calcula la **resistencia mutua R3**. Podría seguirse el procedimiento de cálculo de R1 y R2, pero, por medio de un análisis, se puede facilitar el camino para encontrar R3. Cuando se hizo el cálculo de R1, se asumió un conductor auxiliar a una distancia igual al radio del conductor que forma el electrodo, por las razones anteriormente expuestas. Al hacer el cálculo de R3, existe un conductor 3, paralelo a 1, es decir, tiene las mismas características del conductor calculado en R1. Por lo tanto el resultado será el mismo, con la diferencia de que en lugar de r habrá una distancia L que es el lado del electrodo. Explicado lo anterior, R3 tendrá la forma:

$$R3 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L^2} \left[0,467L + \sqrt{L^2 + 4s^2} + L \cdot \operatorname{asinh} \left(\frac{L}{\sqrt{L^2 + 4s^2}} \right) - \sqrt{2L^2 + 4s^2} \right]$$

[32]

Para encontrar la resistencia del electrodo, se resuelve el sistema de ecuaciones expresado matricialmente en la ecuación 27. Las corrientes I1, I2, I3 e I4, debido a la simetría del electrodo, son iguales entre sí. Por lo tanto el sistema de ecuaciones se reduce a una sola ecuación:

$$II \cdot (R1 + 2 \cdot R2 + R3) = 1$$

[33]

Como se expresa en la ecuación 16, la corriente total que sale del electrodo es la suma de las cuatro corrientes, entonces, la corriente total será:

$$I \cdot (R1 + 2 \cdot R2 + R3) = 4$$

[34]

y, según la ecuación 18, la resistencia del electrodo es el inverso de la corriente total; en consecuencia, la resistencia es:

$$Rg = \frac{R1 + 2 \cdot R2 + R3}{4}$$

[35]

Reemplazando R1, R2 y R3 encontradas en las ecuaciones 29, 31 y 32, respectivamente, en la ecuación 35, se obtiene la resistencia del electrodo expresada en la ecuación 36.

$$Rg = \frac{\rho}{8 \cdot \pi \cdot L^2} \left[r + L \cdot \operatorname{asinh} \left(\frac{L}{r} \right) - \sqrt{L^2 + r^2} + \sqrt{r^2 + 4s^2} \right. \\ \left. + L \cdot \operatorname{asinh} \left(\frac{L}{\sqrt{r^2 + 4s^2}} \right) - \sqrt{L^2 + r^2 + 4s^2} + 2.23 \cdot L + 3 \cdot L \cdot \operatorname{asinh} \left(\frac{L}{\sqrt{L^2 + 4s^2}} \right) \right. \\ \left. + 2 \cdot s \cdot \operatorname{atan} \left(\frac{-L^2}{2 \cdot s \cdot \sqrt{2L^2 + 4s^2}} \right) + \sqrt{L^2 + 4s^2} - \sqrt{2L^2 + 4s^2} \right]$$

[36]

Como se habrá notado, el resultado es una ecuación bastante compleja, difícil de utilizar, y limitada solamente a cuadrados sin divisiones. Podría ser simplificada

eliminando el radio en donde éste se presenta como sumando; pero esta simplificación es mínima. No obstante, la ecuación 36 sirve como referencia, porque tiene similitudes con las ecuaciones de la norma 142; como por ejemplo, en esta ecuación se confirma la proporcionalidad de la resistividad, y se ve la existencia del término múltiplo de $2 \cdot \pi \cdot L$ en el denominador del factor común.

3.2.1.2 DEDUCCION POR EL ANALISIS DE LAS ECUACIONES DE LA NORMA 142

En una sección anterior se vio que las ecuaciones de la norma 142 tienen algunas semejanzas. Podría valerse de dichas semejanzas para deducir una ecuación algo parecida, que tenga utilidad en electrodos cuadrados sin divisiones.

La ecuación desarrollada en este subcapítulo, se deduce de manera empírica de los resultados obtenidos en la simulación.

Se inicia, introduciendo dentro de la ecuación, aquellos términos que sean comunes en la generalidad de las ecuaciones de la norma 142.

$$R_g = \frac{\rho}{8\pi L} \left[\ln\left(\frac{2 \cdot L}{r}\right) + \ln\left(\frac{2 \cdot L}{h}\right) \right]$$

[37]

En la tabla 3.1 se presentan los resultados de la utilización de la ecuación 37. Se compara con los datos de la simulación, utilizando el conductor N° 2 AWG, que tiene un radio de 7.4 mm.

Tabla 3.1

RESULTADOS DE LA ECUACION 37			
L	Rg(amt)	Rg (ecu. 37)	Error (%)
2	21.108	16.656	26.73
4	12.027	9.707	23.90
6	8.581	7.009	22.43
8	6.732	5.543	21.45
10	5.568	4.612	20.73
12	4.764	3.964	20.18
14	4.173	3.485	19.73
16	3.719	3.116	19.34
18	3.359	2.822	19.03
20	3.065	2.582	18.72

Las principales conclusiones que se obtienen del análisis de la tabla 3.1, es que los errores disminuyen al aumentar la longitud, y todos los valores de la ecuación 37 son menores que los de la simulación. Esto sugiere la utilización de una constante dentro de la ecuación, y un término que disminuya en tanto aumenta la longitud, para así disminuir el error encontrado. Cabe aclarar que estos términos fueron encontrados empíricamente, analizando el comportamiento de los errores con la inclusión de cada uno.

$$R_g = \frac{\rho}{8\pi L} \left[\ln\left(\frac{2 \cdot L}{r}\right) + \ln\left(\frac{2 \cdot L}{h}\right) + 2.438 - \frac{2h^2}{L^2} \right]$$

[38]

En la tabla 3.2 puede observarse la utilización de la ecuación 38.

Tabla 3.2

RESULTADOS DE LA ECUACION 38			
L	Rg(amt)	Rg(ecu. 38)	Error (%)
2	21.108	21.257	-0.70
4	12.027	12.101	-0.61
6	8.581	8.616	-0.41
8	6.732	6.752	-0.29
10	5.568	5.580	-0.21
12	4.764	4.771	-0.15
14	4.173	4.178	-0.11
16	3.719	3.722	-0.08
18	3.359	3.361	-0.05
20	3.065	3.067	-0.05

El máximo error es de 0.70%, y disminuye con el aumento de L. Se introducen nuevos términos que pierdan su influencia al aumentar L, es decir, L estará en el denominador. Se tiene la ecuación 39, como definitiva para el cálculo de la resistencia. Esta ecuación da un error máximo de 0.15%, tal como se observa en los resultados mostrados en la tabla 3.3.

$$R_g = \frac{\rho}{8\pi L} \left[\ln\left(\frac{2 \cdot L}{r}\right) + \ln\left(\frac{2 \cdot L}{h}\right) + 2.438 - \frac{2h^2}{L^2} - \frac{0.47h}{L} + \frac{9.1h^4}{L^4} \right]$$

[39]

Tabla 3.3

RESULTADOS DE LA ECUACION 39			
L	Rg(amt)	Rg (ecu. 39)	Error (%)
2	21.108	21.094	0.07
4	12.027	12.045	-0.15
6	8.581	8.591	-0.11
8	6.732	6.737	-0.07
10	5.568	5.571	-0.05
12	4.764	4.765	-0.02
14	4.173	4.173	0.00
16	3.719	3.718	0.02
18	3.359	3.358	0.04
20	3.065	3.064	0.03

3.2.2 ELECTRODOS CUADRADOS CON DIVISIONES

Se han desarrollado dos ecuaciones útiles para el cálculo de resistencia de electrodos cuadrados sin divisiones. Sin embargo, la necesidad de tener resistencias bajas, vuelve imperativo el diseñar electrodos con divisiones. Como puede observarse en los resultados de la simulación, en un electrodo sin divisiones se tiene como mínimo una resistencia de 3Ω , en un cuadrado de 20 m de lado.

El diseñador necesita, por lo tanto, tener una ecuación que le permita encontrar la resistencia de electrodos cuadrados con divisiones. Se trata, en lo posible, de que la ecuación sea general para todo tipo de electrodo cuadrado.

3.2.2.1 CORRELACION MULTIPLE⁽⁷⁾

Cuando se tiene una función que depende de una sola variable, el método utilizado para encontrar el tipo de

función que le corresponde es el de los mínimos cuadrados. En este método se minimiza el error entre la función encontrada y los datos obtenidos en la práctica. Existen funciones típicas a las que comúnmente se trata de ajustar la curva. Por medio de desarrollo matemático, con la misma teoría desarrollada para encontrar una función lineal, se encuentran tres funciones más. Estas funciones típicas son:

$$\begin{array}{ll} y = A + Bx & \text{(lineal)} \\ y = A + B \cdot \ln x & \text{(logarítmica)} \\ y = A \cdot e^{Bx} & \text{(exponencial)} \\ y = A \cdot x^B & \text{(de potencia)} \end{array}$$

Existen otras funciones que dependen de más de una variable. En este caso se utiliza la correlación múltiple. Cuando una función depende de dos o más variables se trata a la ecuación como si dependiera de una sola variable, manteniendo las demás constantes. De esta manera, el problema se reduce al método de mínimos cuadrados.

En el caso de un electrodo de puesta a tierra, como se vio en el capítulo 2, la resistencia depende de varios factores: resistividad, longitud de cada celda, número de celdas de división, profundidad de entierro y diámetro del conductor.

La resistividad -analizando las fórmulas de resistencia para diferentes formas de electrodos - guarda una relación directamente proporcional con la resistencia. La profundidad de entierro y el diámetro del conductor, si bien sí influyen en la resistencia, lo hacen en forma poco significativa. Por lo tanto la ecuación de la resistencia a obtenerse dependerá sólo de dos variables: la longitud de cada celda, y el número de celdas, tal como están explicadas en la figura 1.

3.2.2.2 DEDUCCION DE LA ECUACION PARA EL CALCULO DE RESISTENCIA DE ELECTRODOS CUADRADOS MANTENIENDO CONSTANTE EL NUMERO DE CELDAS "n"

Como se explicó anteriormente, al depender la resistencia de dos variables, se necesita mantener una de ellas constante y encontrar una función que dependa de la otra variable. En esta parte se procede a mantener constante el número de celdas y encontrar una función que dependa de la longitud de cada celda. Una vez que se encuentre la resistencia en función de la longitud, se determinará su relación con el número de celdas.

Se sigue un proceso similar al que se hizo con electrodos cuadrados sin divisiones. En primer lugar se necesita un factor común que multiplique a toda la suma, tal como se observa en las fórmulas de la norma 142. Este factor debe tener la resistividad en el numerador, un múltiplo de $2 \cdot \pi$ y $n \cdot L$ en el denominador. Se elige $n \cdot L$, porque éste representa la longitud total de un lado del electrodo, algo muy común en las fórmulas de resistencia encontradas.

$$R_g = \frac{\rho}{4\pi nL}$$

[40]

Esta ecuación es lejana de los valores simulados, necesita una constante que la aproxime más. A continuación se procederá con el caso en que $n=1$, es decir, con cuadrados sin divisiones.

La constante hallada para $n=1$ es 5.188, resultando la ecuación 41. Se establece esta constante de tal manera que los errores tomen una simetría que pueda ser tratada matemáticamente. Obsérvese el resultado de la inclusión de esta constante en la tabla 3.4.

$$R_g = \frac{\rho}{4\pi nL} [5.188]$$

[41]

Tabla 3.4

RESULTADOS DE LA ECUACION 41			
L	Rg(ecu. 41)	Rg(amt)	Error(%)
2	20.642	20.645	0.01
4	10.321	11.795	12.50
6	6.881	8.426	18.34
8	5.161	6.616	22.00
10	4.128	5.476	24.61
12	3.440	4.687	26.60
14	2.949	4.107	28.20
16	2.580	3.661	29.52
18	2.294	3.307	30.64
20	2.064	3.019	31.63

Como se observa en la tabla 3.4, el error aumenta al aumentar L. Además, es un error por defecto. Interesa incluir un término que aumente su influencia conforme aumenta L, y que esta influencia disminuya poco a poco; nótese que entre L=18 y L=20, existe apenas un 1% de diferencia en el error. Este es el comportamiento de un término que sea diferencia de un exponencial $(1 - A \cdot e^{-B \cdot x})$, o de un término logarítmico $(A \cdot \ln[B \cdot x])$. Del análisis de las fórmulas de la IEEE, se concluye que el término añadido debe tener características logarítmicas. Al igual que con la constante 5.188, el nuevo término se aplica buscando un comportamiento uniforme de los errores. La nueva ecuación es:

$$R_g = \frac{\rho}{4\pi nL} [5.188 + 0.804 \cdot \ln(L)]$$

[42]

Los resultados de esta ecuación pueden observarse en la tabla 3.5.

Tabla 3.5

RESULTADOS DE LA ECUACION 42			
L (m)	Rg(ecu. 42)	Rg(amt)	Error(%)
2	22.860	20.645	-10.73
4	12.539	11.795	-6.30
6	8.791	8.426	-4.34
8	6.824	6.616	-3.14
10	5.602	5.476	-2.30
12	4.765	4.687	-1.67
14	4.155	4.107	-1.17
16	3.689	3.661	-0.76
18	3.321	3.307	-0.42
20	3.023	3.019	-0.12

Después de la última inclusión, se observa que el error disminuye al aumentar L. Se pensaría en un término que contenga a L en el denominador.

$$R_g = \frac{\rho}{4\pi nL} \left[5.188 + 0.804 \cdot \ln(L) - \frac{1.112}{L} \right]$$

[43]

Obsérvese en los resultados mostrados en la tabla 3.6, que el error ha disminuido hasta un 1.62%. Se ha perdido la uniformidad en el comportamiento del error, pero ésta ya no es necesaria, a menos que se quiera tener una mayor precisión, lo que sería inútil; y, además, esto complicaría la ecuación, que, hasta el momento, guarda una relativa simplicidad.

Tabla 3.6

RESULTADOS DE LA ECUACION 43			
L	Rg(ecu. 43)	Rg(amt)	Error(%)
2	20.648	20.645	-0.01
4	11.986	11.795	-1.62
6	8.546	8.426	-1.42
8	6.685	6.616	-1.05
10	5.513	5.476	-0.68
12	4.704	4.687	-0.36
14	4.110	4.107	-0.07
16	3.654	3.661	0.18
18	3.294	3.307	0.40
20	3.000	3.019	0.61

El proceso que se ha seguido para un electrodo sin divisiones ($n=1$), se sigue para electrodos con divisiones. Las ecuaciones que resultan para cada valor de n tienen la misma forma de la ecuación 41. Se podría escribir una ecuación general que sea útil para todos los electrodos.

$$R_g = \frac{\rho}{4\pi nL} \left[K_1 + K_2 \cdot \ln(L) - \frac{N}{L} \right]$$

[44]

Los valores de las constantes para cada n se muestran en la tabla 3.7. Si se utiliza estas constantes, se tiene un error máximo de 1.62%, que resulta para $n=1$, y fue el caso usado para la deducción de la fórmula.

Tabla 3.7

VALOR DE LAS CONSTANTES DE LA ECUACION 44			
n	K1	K2	N
1	5.188	0.804	1.112
2	5.372	0.592	0.812
3	5.436	0.468	0.576
4	5.464	0.388	0.532
5	5.480	0.336	0.460
6	5.492	0.296	0.412
7	5.496	0.264	0.364
8	5.500	0.238	0.328
9	5.503	0.224	0.312
10	5.506	0.201	0.276
12	5.507	0.176	0.244
14	5.506	0.159	0.220
16	5.504	0.149	0.206
18	5.505	0.126	0.174
20	5.504	0.126	0.175

Podría considerarse la ecuación 44 como una solución al problema existente. Pero, por métodos de regresión, tratando de ajustar los valores de las constantes a una curva que los represente, se puede llegar a tener una ecuación general que sirva para encontrar la resistencia de cualquier electrodo cuadrado. Realizando esto, se tienen las siguientes ecuaciones:

$$K1 = 5.263 + 0.116 \cdot \ln(n)$$

$$K2 = 0.646 \cdot e^{-0.10953n}$$

$$N = 0.739 \cdot n^{-0.7715} + 0.24$$

[45]

Se tiene, entonces, la ecuación:

$$R_g = \frac{\rho}{4\pi nL} \left[5.263 + 0.116 \cdot \ln(n) + 0.646 \cdot e^{-0.10953n} \ln(L) - \frac{0.739 \cdot n^{-0.7715} + 0.24}{L} \right] \quad [46]$$

Esta ecuación, sirve para todo tipo de electrodos cuadrados sin varillas. Se exceptúa el caso de electrodos sin divisiones ($n=1$), porque la curva de ajuste de N , no correspondió completamente a los datos de la tabla 3.5. Si se utiliza en $n=1$, se tiene un error máximo de 8%.

La comprobación de la ecuación 46 puede verse en el apéndice C. Exceptuando los electrodos sin divisiones, el mayor error que tiene la fórmula es de 3.83%. Comparada con los métodos analizados en el capítulo anterior, esta fórmula es muy exacta, y al depender solamente de dos variables principales (n y L), su uso es bastante sencillo.

3.2.2.3 DEDUCCION DE LA ECUACION PARA EL CALCULO DE RESISTENCIA DE ELECTRODOS CUADRADOS MANTENIENDO CONSTANTE LA LONGITUD DE CADA CELDA "L"

De la misma manera que se dedujo la ecuación para la resistencia manteniendo n constante, se puede encontrar otra ecuación, partiendo de mantener "L" constante para cada caso analizado.

El factor común utilizado para la ecuación anterior se conserva para este caso. Se necesita, entonces, una constante que iguale el factor común a los valores de referencia. Es un proceso semejante al que se desarrolló en la ecuación anterior. En este caso se trabajará, inicialmente, con $L=2$. Se tiene una ecuación inicial:

$$R_g = \frac{\rho}{4\pi nL} [5.516] \quad [47]$$

Utilizando esta ecuación, se tienen los resultados mostrados en la tabla 3.8. Nótese que el error disminuye al aumentar n.

Tabla 3.8

RESULTADOS DE LA ECUACION 47			
n	Rg(amt)	Rg(ecu.47)	Error (%)
1	21.644	21.947	-6.31
2	10.694	10.974	-2.62
4	5.438	5.487	-0.90
6	3.642	3.658	-0.44
8	2.736	2.743	-0.27
10	2.191	2.195	-0.17
12	1.826	1.829	-0.16
14	1.565	1.568	-0.17
16	1.369	1.372	-0.20
18	1.217	1.219	-0.19
20	1.095	1.097	-0.22

Se requiere un nuevo término que disminuya su influencia al aumentar n. Empíricamente se obtiene la ecuación:

$$R_g = \frac{\rho}{4 \pi n L} [5.516 - 0.259 \cdot n^{-1.24}]$$

[48]

Se observan los resultados en la tabla 3.9. El error máximo es de 1.32%. Nótese que el error es mayor que 1 sólo para n=1, en el resto de casos el error es menor.

Tabla 3.9

RESULTADOS DE LA ECUACION 48			
n	Rg(amt)	Rg(ecu.48)	Error (%)
1	21.644	20.916	-1.32
2	10.694	10.755	-0.57
4	5.438	5.441	-0.05
6	3.642	3.639	0.07
8	2.736	2.734	0.09
10	2.191	2.189	0.10
12	1.826	1.825	0.05
14	1.565	1.565	0.01
16	1.369	1.370	-0.05
18	1.217	1.218	-0.06
20	1.095	1.096	-0.10

A continuación se analizará el comportamiento con L=4. Introduciendo la constante, se tiene la ecuación:

$$R_g = \frac{\rho}{4 \pi n L} [6.053]$$

[49]

Tabla 3.10

RESULTADOS DE LA ECUACION 49			
n	Rg(amt)	Rg(ecu.49)	Error (%)
1	11.795	12.042	-2.09
2	5.920	6.021	-1.71
4	2.917	3.011	-3.21
6	1.923	2.007	-4.37
8	1.431	1.505	-5.19
10	1.139	1.204	-5.72
12	0.945	1.004	-6.19
14	0.807	0.860	-6.59
16	0.704	0.753	-6.91
18	0.624	0.669	-7.21
20	0.561	0.602	-7.33

El error, conforme a lo que se observa en la tabla 3.10, crece con el aumento de n . Sugiere la inclusión de un término que aumente su influencia al aumentar n . El término escogido, por analogía con las fórmulas de la IEEE, es logarítmico. La ecuación para $L=4$ será:

$$R_g = \frac{\rho}{4\pi nL} [6.053 - 0.14111 \cdot \ln(n)] \quad [50]$$

De acuerdo a lo mostrado por la tabla 3.11, el error ha disminuido hasta un 2.09%. En este caso, al igual que en $L=2$, el caso de $n=1$ es el único que tiene un error superior al 1%. Los demás valores son menores que 0.2%.

Tabla 3.11

RESULTADOS DE LA ECUACION 50			
n	$R_g(\text{amt})$	$R_g(\text{ecu. 50})$	Error (%)
1	11.795	12.042	-2.09
2	5.920	5.924	-0.06
4	2.917	2.913	0.13
6	1.923	1.923	-0.01
8	1.431	1.432	-0.09
10	1.139	1.140	-0.05
12	0.945	0.945	-0.04
14	0.807	0.807	-0.03
16	0.704	0.704	0.00
18	0.624	0.624	0.01
20	0.561	0.560	0.17

Comparando entre las ecuaciones 48 y 50, se ve que el comportamiento para $L=2$ y $L=4$ es diferente. Realizando el mismo proceso, para los demás valores de L , resultan ecuaciones similares a la que se obtuvo para $L=4$. Se puede escribir una ecuación general de la forma:

$$R_g = \frac{\rho}{4 \pi n L} [K_1 - K_2 \cdot \ln(n)]$$

[51]

Tabla 3.12

CONSTANTES DE LA ECUACION 51		
L(m)	K1	K2
4	6.053	0.141
6	6.385	0.233
8	6.656	0.315
10	6.851	0.376
12	7.011	0.424
14	7.148	0.465
16	7.271	0.506
18	7.367	0.532
20	7.488	0.583

Por métodos de regresión se pueden obtener ecuaciones que permitan calcular las constantes de acuerdo a cada valor de L. Estas ecuaciones son:

$$K_1 = 4.8076 + 0.8884 \cdot \ln(L)$$

$$K_2 = -0.2451 + 0.2708 \cdot \ln(L)$$

[52]

La ecuación general será:

$$R_g = \frac{\rho}{4 \pi n L} [4.8076 + 0.8884 \cdot \ln(L) + (0.2451 - 0.2708 \cdot \ln(L)) \cdot \ln(n)]$$

[53]

Con la ecuación 53, excluyendo a L=2, se tiene un error máximo de 1.87%. Sin embargo, aun cuando en la deducción no se tomó en cuenta a L=2, al probar esta ecuación con este valor, se tuvo un error máximo de

4.33%, que en la práctica puede considerarse aceptable. La comprobación de la ecuación 53 para todos los casos simulados se muestran en el apéndice D.

3.2.2.4 ESTABLECIMIENTO DE UNA ECUACION FINAL POR COMPARACION DE LAS DOS ECUACIONES DEDUCIDAS EN LOS SUBCAPITULOS ANTERIORES

Se han obtenido dos ecuaciones, igualmente útiles, para el cálculo de la resistencia de electrodos cuadrados. Pero, para el diseñador, no es necesario tener las dos ecuaciones, sino tener la ecuación más sencilla posible.

La ecuación 46 contiene términos logarítmicos, exponenciales y de potencia. Los términos exponencial y de potencia son muy sensibles, lo que puede provocar que la ecuación tenga mayores errores fuera de los valores con los que ha sido probada; por ejemplo, cuando L sea menor que 2. El error para esta ecuación es mayor que el que se tiene para la ecuación 53; el primero es de 3.83%, mientras que el segundo es de 1.87% como máximo. Además, la ecuación 46 no es estrictamente general, ya que no sirve para el caso de $n=1$; en cambio la ecuación 53, aún en el caso de $L=2$, tiene un error de 4.33%, lo que podría ser un buen indicativo de su generalidad. Por último, la sola forma de la ecuación 53, es más sencilla que la que tiene la ecuación 46.

Por lo dicho anteriormente, se concluye que la ecuación 53 es más factible de usar, y será, de aquí en adelante la ecuación utilizada para la deducción de las ecuaciones que se considerarán luego.

En conclusión, para el diseñador que tenga la necesidad de un electrodo de puesta a tierra cuadrado, la

ecuación a utilizarse para el cálculo de su resistencia será:

$$R_g = \frac{\rho}{4\pi nL} [4.8076 + 0.8884 \cdot \ln(L) + (0.2451 - 0.2708 \cdot \ln(L)) \cdot \ln(n)]$$

3.3 CUADRADOS CON VARILLAS EN EL PERIMETRO

En algunas ocasiones, principalmente cuando el área disponible para la instalación de la puesta a tierra no puede extenderse demasiado, no se puede conseguir la resistencia deseada con electrodos sin varillas.

La colocación de varillas permite reducir la resistencia considerablemente, dependiendo del tamaño del electrodo. En electrodos pequeños, de hasta 4 metros por lado, la resistencia puede reducirse un 30% de su valor; pero en electrodos grandes, las varillas van perdiendo influencia. Es así, que en electrodos de 400 metros por lado, la resistencia con varillas y sin ellas es prácticamente la misma.

Ya que el deseo de este trabajo es brindar una ecuación general -hasta donde sea posible-, se intentará acoplar la ecuación de electrodos sin varillas al caso en el que si las tienen en el perímetro.

Al depender la influencia de las varillas del tamaño del electrodo, y considerando que en electrodos muy grandes, la resistencia es prácticamente la misma, se podría pensar en un término que se pueda añadir a la ecuación 53 para que se tome en cuenta la presencia de varillas en el perímetro.

El término añadido, debería perder valor en tanto aumenta el tamaño del electrodo. El tamaño del electrodo

puede ser expresado en función de su área, o de la longitud de conductor enterrado. Como la utilización de la longitud de conductor enterrado otorga más versatilidad al manejo de variables, se utiliza ésta como variable representativa del tamaño del electrodo.

Hay que introducir un término que compare la longitud de conductor enterrado con las varillas en el perímetro. Se tiene una ecuación inicial:

$$R_g = \frac{\rho}{4\pi nL} [4.8076 + 0.8884 \cdot \ln(L) + (0.2451 - 0.2708 \cdot \ln(L)) \cdot \ln(n) + A - B \frac{l_v}{l}]$$

[54]

donde

- l_v = longitud total de las varillas enterradas. Para electrodos cuadrados, viene dada por la ecuación $l_v = 2 \cdot nL \cdot (n+1)$.
- l = longitud total de conductor horizontal enterrado, es decir, no se toman en cuenta las varillas.

Los valores de A y B dependen del número de celdas n. Se encuentran, para cada constante, los siguientes valores:

Tabla 3.13

CONSTANTES DE LA ECUACION 54		
L(m)	A	B
2	0.0834	2.419
4	0.0313	2.374
6	0.0144	2.426
8	0.0163	2.555
10	0.0211	2.716
12	0.0443	3.032
14	0.0631	3.411
16	0.0864	3.843
18	0.0988	4.261
20	0.1312	4.943

La ecuación que sirve para encontrar B es:

$$B = 0.07421 \cdot e^{0.1854n} + 2.25$$

[55]

En el caso de A, la ecuación para encontrarla se complica, porque, como se puede observar en los valores, no tiene la disposición de alguna función conocida. Para obtener A, o se tiene una ecuación compleja, o se tienen dos ecuaciones. En este caso se ha optado por la segunda opción. Por lo tanto la ecuación será:

$$\text{Si } 1 \leq n \leq 7 \Rightarrow A = 0.003221 \cdot n^2 - 0.04336 \cdot n + 0.157184$$

$$\text{Si } n > 7 \Rightarrow A = 0.000104 \cdot n^{2.39411}$$

[56]

Concluyendo, el diseñador que tenga la necesidad de instalar electrodos con varillas en el perímetro, recurrirá a la siguiente ecuación:

$$R_g = \frac{\rho}{4\pi nL} [4.8076 + 0.8884 \cdot \ln(L) + (0.2451 - 0.2708 \cdot \ln(L)) \cdot \ln(n) + A - B \frac{lv}{l}]$$

siendo:

$$B = 0.07421 \cdot e^{0.1854n} + 2.25$$

$$A = 0.003221 \cdot n^2 - 0.04336 \cdot n + 0.157184 \quad \text{si } 1 \leq n \leq 7$$

$$A = 0.000104 \cdot n^{2.39411} \quad \text{si } n > 7$$

En el apéndice E puede observarse la comprobación de esta ecuación. El error máximo que se da al utilizar esta ecuación es de 8.62%, en el caso de $n=1$. Este error puede considerarse aceptable en comparación con los errores que se obtienen con la utilización de otros métodos de cálculo de resistencia.

CAPITULO 4

ECUACION PARA ELECTRODOS FORMADOS POR CONDUCTORES EN DISPOSICION RECTANGULAR

Aunque la simetría guardada por un electrodo que tiene conductores dispuestos en forma de cuadrado, es tentadora para el diseñador; en la práctica es difícil tener un caso en el que se pueda instalar un electrodo cuadrado. La mayoría de veces se tiene que diseñar electrodos rectangulares.

En este capítulo se van a desarrollar dos ecuaciones para encontrar la resistencia de electrodos rectangulares. Para ello se establece un electrodo patrón cuya nomenclatura se indica en la figura 4.1.

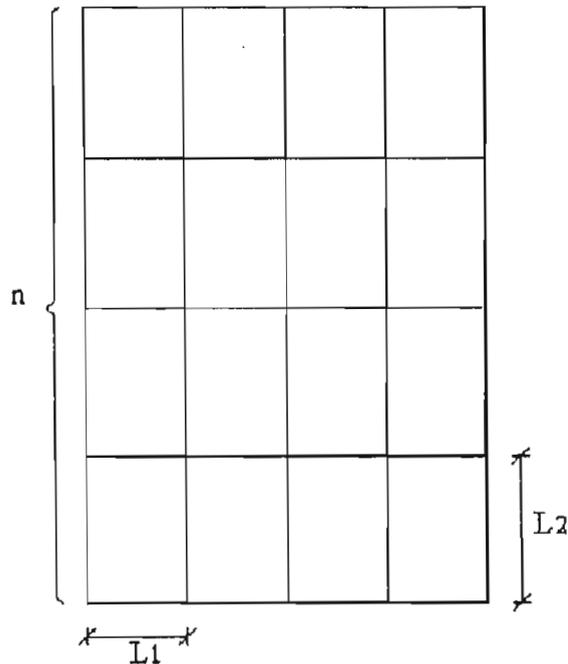


Fig. 4.1

Electrodo patrón para electrodos rectangulares

es decir, n sigue siendo el número de celdas de un lado del electrodo, L_1 es el ancho de la celda y L_2 es el largo. Las simulaciones se realizan en base a la relación L_2/L_1 . Se analiza electrodos que tienen una relación desde $L_2/L_1=1.2$, hasta $L_2/L_1=2$, porque fuera de este límite se considera que el electrodo es inusual. Los resultados de la simulación pueden verse en el apéndice F.

4.1 UTILIZACION DE LA ECUACION DE ELECTRODOS CUADRADOS

Una primera ecuación que podría utilizarse es la que se obtuvo para electrodos cuadrados (ecu. 53). Se la utiliza asumiendo un cuadrado equivalente por medio del cálculo:

$$L = \sqrt{L_1 L_2}$$

[57]

y se utiliza este valor dentro de la ecuación 53 para el caso de que no haya varillas, o la ecuación 56 en el caso de que se tengan varillas.

La comprobación puede observársela en el apéndice G. El error mayor, se da en el caso de electrodos con varillas, en los que alcanza el 8.8%. Aun así, es aceptable esta resolución, porque los resultados son más exactos que los que se obtienen con la norma 80 de la IEEE.

4.2 ECUACION DEPENDIENTE DE LA LONGITUD DE CONDUCTOR ENTERRADO Y DEL AREA CUBIERTA POR EL ELECTRODO

A lo largo de este trabajo, se ha analizado el valor de la resistencia visto desde su dependencia del número de celdas en el que se divide un lado del electrodo, y de la longitud que tiene cada celda o división. Las simula-

ciones se hicieron con respecto a esta dependencia porque es más sencillo elaborar una base de datos. Pero, dentro de esta dependencia, está inmersa otra, que es la resistencia dependiendo de la longitud de conductor enterrado y del área que cubre el electrodo.

La relación de la resistencia con el área es evidente, si se observa los datos de la simulación (apéndice A). Si un electrodo cubre un área mayor, la resistencia disminuye notablemente.

Si la resistencia dependiera solamente del área cubierta, no se necesitarían electrodos con divisiones, pero este no es el caso, y ahí es que toma importancia la longitud de conductor enterrado. Al existir más conductor enterrado, es menor la resistencia del electrodo.

Podría pensarse en una ecuación que sea función del área cubierta y de la longitud de conductor enterrado. Con una ecuación que tenga esta forma, sería posible encontrar la resistencia, sin importar la forma que tenga el electrodo.

Debido a que, en el desarrollo de este trabajo, se ha obtenido una ecuación muy exacta para el cálculo de la resistencia de electrodos cuadrados, lo más lógico sería modificar la misma, de tal manera que pueda ser empleada en función de la longitud de conductor enterrado y del área cubierta. Lo único que se necesita es reemplazar n y L , con su correspondiente relación con el área y la longitud de conductor enterrado.

En electrodos cuadrados, se tienen las siguientes relaciones:

$$A = (nL)^2$$
$$X = 2 \cdot nL \cdot (n+1)$$

donde A es el área cubierta y X es la longitud de conductor enterrado.

Las ecuaciones 58 son deducidas por simple análisis del electrodo utilizado en el desarrollo de la ecuación de la resistencia de electrodos cuadrados.

Despejando las ecuaciones de 58, se tiene:

$$n = \frac{X}{2\sqrt{A}} - 1 \quad L = \frac{2A}{X - 2\sqrt{A}} \quad [59]$$

Reemplazando 59 en la ecuación 53, se tiene:

$$R_g = \frac{\rho}{4\pi nL} \left[4.8076 + 0.8884 \ln\left(\frac{2A}{X - 2\sqrt{A}}\right) + \left(0.2451 + 0.2708 \ln\left(\frac{2A}{X - 2\sqrt{A}}\right)\right) \cdot \ln\left(\frac{X}{2\sqrt{A}} - 1\right) \right] \quad [60]$$

La ecuación 60 es útil para el cálculo de la resistencia sin importar su forma. En el apéndice H se puede ver la comprobación de esta ecuación para el caso de $L1=2$; viéndose hasta este valor que, si bien el error decrece, lo hace muy poco -de 3% en la ecuación 57, a 2% con la ecuación 60-, quedando para el diseñador la decisión de acogerse a una ecuación más complicada, con el fin de tener un poco más de precisión.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

La profundidad a la que está enterrado el electrodo de puesta a tierra, y el diámetro del conductor del que está conformado, son parámetros que no tienen mayor influencia en el valor de la resistencia de puesta a tierra. Con grandes variaciones de los mismos, resultan pequeños cambios en ésta.

La resistencia del electrodo varía proporcionalmente con la resistividad del suelo en el que está enterrado. Sin embargo, es un factor sobre el que se tiene poco control. Si bien, un suelo de alta resistividad puede ser cambiado, o tratado con elementos químicos, el mantener una resistividad baja es difícil. Además, saber con certeza la resistividad requiere de tiempo, ya que ésta cambia, dependiendo de la época del año y de la hora del día.

El número de divisiones que se hacen al electrodo, y la longitud de cada división son parámetros sobre los cuales la resistencia presenta una gran sensibilidad. Con éstos se puede variar la resistencia de una manera fácil, aumentando las divisiones o la longitud de las mismas.

El método de cálculo de resistencia presentado por la norma 80 de la IEEE que tiene mayor precisión es la ecuación de Schwarz. Sin embargo, éste es complicado porque necesita la resolución de tres ecuaciones, dos de las cuales necesitan de gráficos adicionales para resolverlas. Además su precisión se limita a resistencias mayores

a 1 ohmio; luego de las cuales, el error crece hasta aproximarse al 100%.

Las ecuaciones de la norma 142 de la IEEE son caminos fáciles de cálculo de resistencia de electrodos de puesta a tierra. Los datos que necesitan son tangibles, están inmersos en la forma y estructura de que está formado el electrodo. Lamentablemente, entre dichas ecuaciones no se encuentra una que sea válida para electrodos con disposición cuadrangular o rectangular.

El método de los momentos tiene un desarrollo exclusivamente teórico, por ello es un método muy preciso; pero, se desvirtúa su utilización práctica por lo complicado que resulta calcular una resistencia por este medio.

El método de Tagg es válido en electrodos conformados exclusivamente por varillas, es decir en aquellos casos en los que se desprece la presencia de conductor horizontal. Presenta el menor error de todos los métodos estudiados. En el caso de tener conductor que una a las varillas, este método tiene validez para electrodos cuya longitud sea menor a 2 metros, porque en este caso la presencia de varillas es más significativa que el conductor horizontal.

La ecuación para el cálculo de resistencia de electrodos cuadrados sin divisiones deducida por el método de los momentos, presenta similitudes con las ecuaciones de la norma 142 de la IEEE; siendo un indicio de que existe una ecuación para electrodos cuadrados que sea parecida a las ecuaciones de la mencionada norma.

En el presente trabajo se ha encontrado una ecuación para el cálculo de la resistencia de electrodos cuadrados sin varillas. Esta ecuación es sencilla de utilizar, ya que depende sólo de los dos parámetros que más influyen en el valor de la resistencia: el número de celdas en que

se divide el electrodo, y la longitud de cada celda. El error que se tiene al usar esta ecuación es mucho menor, llegando a ser la quinta parte del error mínimo que se tuvo en los métodos anteriores.

La ecuación encontrada para electrodos cuadrados sin varillas se ha podido extender al caso de electrodos cuadrados con varillas y electrodos rectangulares, llegando a ser una ecuación general para el cálculo de resistencia. En ambos casos el error es muy bajo comparado con cualquiera de los métodos anteriormente estudiados. En todos los casos el error se calcula por comparación con los resultados de la simulación de electrodos de puesta a tierra en el programa AMT.

Modificando la ecuación de electrodos cuadrados, haciéndola dependiente del área cubierta por el electrodo y de la longitud total de conductor enterrado, se obtiene un error menor para electrodos rectangulares. No obstante, al parecer, no se justifica una ecuación más compleja para disminuir el error en 1%, aun más si se considera que la ecuación anterior tiene ya un margen de error aceptable.

5.1 RECOMENDACIONES

Cuando la resistencia que resulta del diseño de un electrodo de puesta a tierra no es la requerida, antes de tomar alguna medida correctiva, se debe realizar un análisis técnico, para evitar modificaciones innecesarias e inútiles en la puesta a tierra.

La colocación de varillas en el perímetro con la finalidad de reducir la resistencia debe ser bien analizada antes de realizarla, porque éstas influyen sólo en el caso de electrodos de pequeñas dimensiones, de hasta 20 me-

tros de lado, luego de lo cual, la resistencia es prácticamente la misma, con y sin varillas.

La metodología desarrollada en este trabajo tiene limitaciones, tales como: el electrodo debe tener el mismo número de divisiones a lo largo como a lo ancho; la ecuación desarrollada sirve solo en el caso de tener suelo homogéneo, o utilizar el modelo de suelo homogéneo. Queda, por lo tanto, superar estas limitaciones en estudios futuros.

En nuevos trabajos que se desarrollen acerca de la resistencia de electrodos de puesta a tierra con estructura igual a la estudiada en este trabajo, debe tomarse en cuenta el comportamiento diferente que presentan los electrodos sin divisiones ($n=1$). En todos los casos, el electrodo sin divisiones dejó ver un error mayor que los demás, y en la deducción de las ecuaciones, siempre presentó problemas por no corresponder a la disposición de los errores del resto de electrodos.

ANEXOS

ANEXO A

RESISTIVIDAD DE ALGUNOS TIPOS DE SUELO (B)

TABLA A.1

TIPO DE SUELO	RESISTIVIDAD (ohm-m)
Suelo orgánico mojado	10
Suelo húmedo	100
Suelo seco	1000
Lecho de roca	10000

TABLA A.2

TIPO DE SUELO	RESISTIVIDAD (ohm-m)
Suelo superficial, grada, etc.	1-50
Arcilla	2-100
Arena y grava	50-1000
Piedra caliza superficial	5-4000
Cenizas	5-100
Piedra arenisca	20-2000
Granitos, basaltos	1000
Pizarras	10-100

TABLA A.3

TIPO DE SUELO	RESISTIVIDAD (ohm-m)		
	MEDIA	MINIMA	MAXIMA
Rellenos, cenizas, escoria volcánica, gravas negras	23.7	5.9	70
Arcilla, pizarra, suelo pegajoso, grada	40.6	3.4	163
La misma, con variaciones de arena y grava	158.0	10.2	1350
Grava, arena, piedras con pequeñas cantidades de arcilla o grada	940.0	590.0	4580

ANEXO B

ECUACION PARA EL CALCULO DE LA SECCION DEL CONDUCTOR (4)

$$S_c = \frac{1.973.52 I}{\left[\frac{\ln \left[\frac{T_m - T_a}{k_o + T_a} + 1 \right]}{\frac{t_c \alpha_r p_r 10^4}{TCAP}} \right]^{1/2}}$$

S_c = Area de la sección recta del conductor en circular mils.

I = Corriente máxima en kiloamperios.

T_m = Temperatura máxima admisible en grados centígrados (para uniones soldadas es de 450°C y para conectores atornillados es de 250°C).

T_a = Temperatura ambiente en °C (generalmente 40°C).

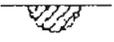
k_o , α_r , p_r , $TCAP$: constantes del material. Para el cobre tienen los siguientes valores:

$$\begin{aligned} k_o &= 234 \\ \alpha_r &= 0.00393 \\ p_r &= 1.7241 \\ TCAP &= 3.422 \end{aligned}$$

t_c = Tiempo durante el cual se aplica la corriente I , en segundos.

ANEXO C

ECUACIONES PARA EL CALCULO DE RESISTENCIAS DE PUESTA A TIERRA ⁽⁵⁾

	<p>Seamiesfera de radio a</p>	$R = \frac{\rho}{2\pi a}$
	<p>Varilla enterrada longitud L, radio a</p>	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} \right)$
	<p>Dos varillas, ubicadas a una distancia S una de la otra; S mayor que L</p>	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi S} \left(1 - \frac{L^2}{3S^3} + \frac{2L^4}{5S^4} \dots \right)$
	<p>Dos varillas, ubicadas a una distancia S una de la otra; S menor que L</p>	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{S} - 2 + \frac{S}{2L} - \frac{S^2}{16L^2} + \frac{S^4}{512L^4} \dots \right)$
	<p>Conductor horizontal enterrado una profundidad $S/2$; longitud $2L$</p>	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{S} - 2 + \frac{S}{2L} - \frac{S^2}{16L^2} + \frac{S^4}{512L^4} \dots \right)$
	<p>Placa horizontal enterrada longitud $2L$, sección a/b, profundidad $s/2$, b menor que $a/8$</p>	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \frac{a^2 \cdot \pi a b}{2(a+b)^2} + \ln \frac{4L}{S} - 1 + \frac{S}{2L} - \frac{S^2}{16L^2} + \frac{S^4}{512L^4} \dots \right)$
	<p>Conductor en forma de anillo diámetro del anillo D, diámetro del conductor d, profundidad S</p>	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left(\ln \frac{2D}{d} + \ln \frac{4D}{S} \right)$
	<p>Disco enterrado horizontalmente radio a, profundidad $S/2$</p>	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi S} \left(1 - \frac{7a^2}{12S^2} + \frac{33a^4}{40S^4} \dots \right)$
	<p>Disco enterrado horizontalmente radio a, profundidad $S/2$</p>	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi S} \left(1 + \frac{7a^2}{24S^2} + \frac{99a^4}{320S^4} \dots \right)$

APENDICES

APENDICE A

VALORES DE RESISTENCIA OBTENIDOS DE LA SIMULACION DE ELECTRODOS CUADRADOS EN EL PROGRAMA AMT

A.1 RESISTENCIA DE ELECTRODOS CON DISPOSICION CUADRANGULAR SIN VARILLAS EN EL PERIMETRO

CONDUCTOR: No. 2 AWG
DIAMETRO: 7.4 mm

		L																	
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20								
1	n	21.108	12.027	6.581	6.732	5.568	4.764	4.173	3.719	3.359	3.065								
2		10.854	6.000	4.208	3.263	2.675	2.269	1.975	1.751	1.545	1.432								
3		7.295	3.958	2.749	2.114	1.725	1.460	1.268	1.121	1.006	0.913								
4		5.476	2.942	2.030	1.557	1.265	1.069	0.927	0.816	0.733	0.664								
5		4.398	2.337	1.605	1.227	0.996	0.840	0.726	0.641	0.573	0.519								
6		3.668	1.936	1.325	1.011	0.819	0.690	0.596	0.525	0.470	0.425								
7		3.145	1.651	1.127	0.859	0.695	0.585	0.505	0.445	0.397	0.359								
8		2.752	1.439	0.980	0.746	0.603	0.507	0.437	0.385	0.344	0.311								
9		2.446	1.275	0.867	0.659	0.532	0.447	0.386	0.339	0.303	0.274								
10		2.201	1.144	0.777	0.590	0.476	0.400	0.345	0.303	0.270	0.244								
11		2.001	1.037	0.704	0.534	0.431	0.361	0.311	0.274	0.244	0.221								
12		1.834	0.948	0.643	0.487	0.396	0.329	0.284	0.249	0.223	0.201								
13		1.692	0.874	0.592	0.448	0.361	0.303	0.261	0.229	0.204	0.185								
14		1.571	0.810	0.548	0.415	0.334	0.280	0.241	0.212	0.189	0.171								
15		1.466	0.755	0.511	0.386	0.311	0.261	0.224	0.197	0.164	0.159								
16		1.374	0.706	0.477	0.361	0.291	0.243	0.210	0.184	0.164	0.148								
17		1.293	0.664	0.448	0.339	0.273	0.229	0.197	0.173	0.154	0.139								
18		1.221	0.626	0.423	0.319	0.257	0.215	0.185	0.163	0.145	0.131								
19		1.157	0.593	0.400	0.302	0.243	0.203	0.175	0.154	0.137	0.124								
20		1.098	0.562	0.379	0.286	0.230	0.193	0.166	0.146	0.129	0.117								

Nota: Los valores expresados son las resistencias de los electrodos en ohmios

CONDUCTOR: No. 1/0 AWG
 DIAMETRO: 9.4 mm

		L															
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20						
1	n	20.645	11.795	6.426	6.616	5.476	4.687	4.107	3.661	3.307	3.019						
2		10.694	5.920	4.155	3.223	2.643	2.246	1.957	1.736	1.561	1.420						
3		7.212	3.917	2.721	2.097	1.711	1.449	1.258	1.113	0.999	0.906						
4		5.438	2.917	2.013	1.543	1.257	1.061	0.919	0.812	0.728	0.659						
5		4.363	2.319	1.594	1.233	0.989	0.834	0.722	0.637	0.570	0.516						
6		3.642	1.923	1.317	1.005	0.815	0.686	0.593	0.522	0.467	0.423						
7		3.125	1.642	1.121	0.854	0.691	0.581	0.502	0.442	0.395	0.357						
8		2.736	1.431	0.975	0.742	0.600	0.504	0.435	0.383	0.342	0.309						
9		2.433	1.264	0.863	0.656	0.530	0.445	0.384	0.338	0.302	0.273						
10		2.191	1.139	0.774	0.587	0.474	0.397	0.343	0.302	0.269	0.243						
11		1.992	1.033	0.707	0.532	0.429	0.360	0.310	0.273	0.243	0.220						
12		1.826	0.945	0.640	0.485	0.391	0.328	0.283	0.249	0.222	0.200						
13		1.686	0.870	0.589	0.447	0.360	0.302	0.260	0.228	0.204	0.184						
14		1.565	0.807	0.546	0.413	0.333	0.279	0.240	0.211	0.188	0.170						
15		1.461	0.752	0.508	0.385	0.310	0.260	0.224	0.196	0.175	0.158						
16		1.369	0.704	0.476	0.360	0.290	0.243	0.209	0.183	0.164	0.148						
17		1.289	0.662	0.447	0.338	0.272	0.228	0.196	0.172	0.154	0.139						
18		1.217	0.624	0.421	0.319	0.256	0.215	0.185	0.162	0.145	0.130						
19		1.153	0.591	0.399	0.301	0.242	0.203	0.175	0.153	0.137	0.123						
20		1.095	0.561	0.378	0.286	0.230	0.192	0.165	0.145	0.129	0.117						

Nota: Los valores expresados son las resistencias de los electrodos en ohmios

CONDUCTOR: No. 2/0 AWG
DIAMETRO: 10.5 mm

		L																	
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20								
1	n	20.417	11.681	8.350	6.539	5.430	4.649	4.074	3.632	3.282	2.996								
2		10.616	5.881	4.126	3.203	2.628	2.233	1.946	1.726	1.553	1.412								
3		7.171	3.897	2.708	2.067	1.703	1.442	1.252	1.108	0.994	0.902								
4		5.412	2.904	2.005	1.538	1.251	1.057	0.916	0.809	0.725	0.657								
5		4.345	2.311	1.588	1.215	0.986	0.831	0.719	0.635	0.568	0.514								
6		3.629	1.917	1.313	1.002	0.812	0.684	0.591	0.521	0.466	0.422								
7		3.115	1.637	1.131	0.852	0.689	0.580	0.501	0.441	0.394	0.357								
8		2.728	1.427	0.973	0.740	0.599	0.503	0.434	0.382	0.341	0.309								
9		2.427	1.265	0.861	0.654	0.529	0.444	0.383	0.337	0.301	0.272								
10		2.185	1.136	0.772	0.586	0.473	0.397	0.342	0.301	0.269	0.243								
11		1.967	1.034	0.701	0.531	0.428	0.359	0.310	0.272	0.243	0.219								
12		1.822	0.943	0.639	0.485	0.391	0.328	0.282	0.248	0.221	0.200								
13		1.682	0.869	0.588	0.446	0.359	0.301	0.260	0.228	0.203	0.184								
14		1.562	0.805	0.545	0.413	0.333	0.279	0.240	0.211	0.188	0.170								
15		1.458	0.751	0.508	0.384	0.310	0.259	0.223	0.196	0.175	0.158								
16		1.367	0.703	0.475	0.310	0.289	0.242	0.209	0.183	0.163	0.147								
17		1.290	0.661	0.446	0.338	0.272	0.228	0.196	0.172	0.153	0.138								
18		1.215	0.623	0.421	0.318	0.258	0.214	0.184	0.162	0.144	0.130								
19		1.152	0.591	0.396	0.301	0.242	0.203	0.174	0.153	0.136	0.123								
20		1.094	0.560	0.376	0.285	0.230	0.192	0.163	0.145	0.129	0.117								

Nota: Los valores expresados son las resistencias de los electrodos en ohmios

CONDUCTOR: No. 4/0 AWG
 DIAMETRO: 13.3 mm

	L																			
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20										
1	19.948	11.446	8.194	6.442	5.336	4.570	4.007	3.574	3.229	2.949										
2	10.453	5.600	4.075	3.163	2.596	2.207	1.923	1.706	1.535	1.396										
3	7.086	3.855	2.680	2.066	1.687	1.428	1.241	1.098	0.985	0.894										
4	5.360	2.878	1.988	1.556	1.242	1.049	0.909	0.803	0.717	0.652										
5	4.309	2.293	1.576	1.206	0.979	0.826	0.714	0.630	0.564	0.511										
6	3.602	1.904	1.304	0.996	0.807	0.680	0.587	0.518	0.463	0.419										
7	3.095	1.627	1.111	0.847	0.686	0.577	0.498	0.439	0.392	0.355										
8	2.712	1.420	0.968	0.737	0.596	0.501	0.432	0.380	0.340	0.307										
9	2.413	1.259	0.857	0.651	0.526	0.442	0.381	0.335	0.300	0.271										
10	2.174	1.131	0.768	0.583	0.471	0.395	0.341	0.299	0.266	0.242										
11	1.978	1.026	0.696	0.528	0.426	0.358	0.308	0.271	0.242	0.219										
12	1.814	0.939	0.637	0.483	0.389	0.326	0.281	0.247	0.221	0.199										
13	1.675	0.871	0.586	0.444	0.358	0.300	0.259	0.227	0.203	0.183										
14	1.556	0.802	0.543	0.411	0.331	0.276	0.239	0.210	0.187	0.169										
15	1.453	0.748	0.506	0.383	0.309	0.258	0.223	0.195	0.174	0.157										
16	1.363	0.701	0.473	0.358	0.289	0.242	0.208	0.183	0.163	0.147										
17	1.282	0.659	0.445	0.337	0.271	0.227	0.195	0.171	0.153	0.138										
18	1.211	0.621	0.420	0.317	0.255	0.214	0.184	0.162	0.144	0.130										
19	1.147	0.588	0.397	0.300	0.241	0.202	0.174	0.153	0.136	0.123										
20	1.108	0.558	0.377	0.285	0.229	0.192	0.165	0.145	0.129	0.116										

Nota: Los valores expresados son las resistencias de los electrodos en ohmios

CONDUCTOR: No. 250 MCM
DIAMETRO: 14.6 mm

	L																			
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20										
1	19.763	11.353	8.132	6.395	5.299	4.539	3.980	3.550	3.209	2.930										
2	10.389	5.768	4.054	3.147	2.583	2.196	1.914	1.698	1.528	1.390										
3	7.053	3.839	2.669	2.058	1.680	1.423	1.263	1.093	0.982	0.891										
4	5.339	2.868	1.981	1.521	1.238	1.045	0.906	0.800	0.717	0.650										
5	4.285	2.286	1.572	1.215	0.977	0.823	0.713	0.629	0.563	0.510										
6	3.592	1.899	1.301	0.993	0.805	0.678	0.586	0.517	0.462	0.418										
7	3.086	1.623	1.109	0.845	0.684	0.575	0.497	0.438	0.391	0.354										
8	2.705	1.416	0.966	0.735	0.594	0.500	0.431	0.379	0.339	0.307										
9	2.408	1.256	0.855	0.650	0.525	0.441	0.381	0.335	0.299	0.272										
10	2.170	1.128	0.767	0.582	0.470	0.395	0.340	0.299	0.267	0.242										
11	1.974	1.024	0.695	0.528	0.426	0.357	0.308	0.271	0.242	0.218										
12	1.811	0.937	0.636	0.482	0.389	0.326	0.281	0.247	0.220	0.199										
13	1.672	0.864	0.585	0.444	0.356	0.300	0.258	0.227	0.202	0.183										
14	1.553	0.801	0.542	0.411	0.331	0.277	0.239	0.210	0.187	0.169										
15	1.450	0.747	0.505	0.382	0.308	0.258	0.222	0.195	0.174	0.157										
16	1.360	0.700	0.473	0.358	0.288	0.241	0.212	0.182	0.163	0.147										
17	1.280	0.658	0.444	0.336	0.271	0.227	0.195	0.171	0.152	0.138										
18	1.209	0.632	0.419	0.317	0.255	0.214	0.184	0.161	0.144	0.130										
19	1.146	0.588	0.396	0.291	0.241	0.202	0.174	0.152	0.132	0.122										
20	1.089	0.558	0.376	0.284	0.230	0.191	0.165	0.145	0.129	0.116										

Nota: Los valores expresados son las resistencias de los electrodos en ohmios

CONDUCTOR: No. 300 MCM
 DIAMETRO: 15.95 mm

		L																			
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20										
1	n	19.581	11.262	8.071	6.350	5.262	4.509	3.954	3.528	3.189	2.912										
2		10.326	5.737	4.033	3.132	2.570	2.166	1.905	1.690	1.521	1.384										
3		7.020	3.822	2.659	2.050	1.674	1.418	1.231	1.090	0.978	0.888										
4		5.318	2.858	1.975	1.516	1.234	1.042	0.903	0.798	0.715	0.648										
5		4.281	2.279	1.567	1.199	0.974	0.821	0.711	0.627	0.561	0.508										
6		3.581	0.189	1.298	0.991	0.803	0.676	0.585	0.515	0.461	0.417										
7		3.078	1.619	1.106	0.849	0.683	0.574	0.496	0.437	0.391	0.353										
8		2.699	1.413	0.964	0.734	0.593	0.499	0.430	0.379	0.338	0.306										
9		2.432	1.254	0.853	0.649	0.524	0.440	0.380	0.334	0.299	0.270										
10		2.165	1.126	0.766	0.581	0.470	0.394	0.340	0.299	0.267	0.241										
11		1.970	1.022	0.694	0.527	0.425	0.357	0.307	0.270	0.241	0.218										
12		1.807	0.938	0.635	0.481	0.388	0.326	0.280	0.247	0.220	0.199										
13		1.669	0.863	0.585	0.443	0.357	0.299	0.258	0.227	0.202	0.183										
14		1.551	0.800	0.542	0.410	0.331	0.277	0.239	0.210	0.187	0.169										
15		1.448	0.746	0.505	0.382	0.308	0.258	0.222	0.195	0.174	0.157										
16		1.358	0.699	0.472	0.357	0.288	0.241	0.208	0.182	0.163	0.147										
17		1.279	0.658	0.444	0.336	0.270	0.226	0.195	0.171	0.153	0.138										
18		1.208	0.620	0.419	0.317	0.255	0.213	0.184	0.161	0.144	0.130										
19		1.145	0.587	0.396	0.299	0.241	0.202	0.174	0.152	0.136	0.123										
20		1.088	0.557	0.405	0.284	0.229	0.191	0.165	0.144	0.129	0.116										

Nota: Los valores expresados son las resistencias de los electrodos en ohmios

CONDUCTOR: No. 350 MCM
DIAMETRO: 17.2 mm

		L																	
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20								
1	n	19.436	11.189	8.022	6.313	5.233	4.485	3.933	3.509	3.172	2.897								
2		10.274	5.711	4.016	3.119	2.560	2.177	1.898	1.684	1.515	1.379								
3		6.993	3.809	2.650	2.044	1.669	1.413	1.228	1.087	0.975	0.885								
4		5.302	2.850	1.969	1.512	1.231	1.039	0.901	0.796	0.713	0.647								
5		4.269	2.274	1.564	1.197	0.972	0.819	0.709	0.626	0.560	0.507								
6		3.573	1.890	1.295	0.989	0.802	0.675	0.584	0.514	0.460	0.416								
7		3.072	1.616	1.104	0.842	0.681	0.573	0.495	0.436	0.390	0.353								
8		2.694	1.411	0.962	0.732	0.592	0.498	0.430	0.378	0.338	0.306								
9		2.399	1.252	0.852	0.648	0.523	0.440	0.379	0.336	0.298	0.269								
10		2.162	1.125	0.764	0.581	0.469	0.394	0.339	0.299	0.267	0.241								
11		1.967	1.023	0.693	0.526	0.424	0.356	0.307	0.270	0.241	0.216								
12		1.805	0.935	0.634	0.481	0.403	0.325	0.280	0.246	0.220	0.198								
13		1.667	0.862	0.584	0.442	0.357	0.299	0.258	0.226	0.202	0.182								
14		1.548	0.799	0.541	0.410	0.330	0.277	0.238	0.209	0.187	0.169								
15		1.446	0.745	0.504	0.382	0.307	0.258	0.222	0.195	0.174	0.157								
16		1.356	0.698	0.472	0.357	0.288	0.241	0.207	0.182	0.162	0.147								
17		1.277	0.656	0.443	0.335	0.270	0.226	0.195	0.171	0.152	0.138								
18		1.207	0.619	0.418	0.316	0.255	0.213	0.183	0.161	0.144	0.133								
19		1.144	0.586	0.396	0.299	0.241	0.202	0.173	0.152	0.136	0.122								
20		1.086	0.557	0.375	0.284	0.228	0.191	0.164	0.144	0.129	0.116								

Nota: Los valores expresados son las resistencias de los electrodos en ohmios

**A.2 RESISTENCIA DE ELECTRODOS CON DISPOSICION
CUADRANGULAR CON VARILLAS EN EL PERIMETRO**

CONDUCTOR: No. 2 AWG
DIAMETRO: 7.4 mm

		L																	
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20								
1	n	12.988	9.139	7.170	5.890	5.011	4.369	3.878	3.491	3.177	2.917								
2		7.921	5.121	3.801	3.032	2.528	2.170	1.902	1.696	1.532	1.398								
3		5.769	3.537	2.561	2.012	1.663	1.418	1.236	1.099	0.989	0.900								
4		4.550	2.695	1.923	1.498	1.230	1.045	0.909	0.805	0.723	0.656								
5		3.760	2.180	1.535	1.190	0.973	0.824	0.715	0.632	0.567	0.519								
6		3.205	1.821	1.276	0.983	0.803	0.679	0.588	0.520	0.465	0.422								
7		2.793	1.566	1.091	0.840	0.683	0.577	0.499	0.440	0.394	0.357								
8		2.475	1.373	0.953	0.731	0.594	0.501	0.433	0.382	0.341	0.309								
9		2.223	1.222	0.845	0.647	0.525	0.442	0.382	0.337	0.301	0.272								
10		2.017	1.100	0.759	0.580	0.470	0.396	0.342	0.301	0.269	0.243								
11		1.846	1.001	0.669	0.526	0.426	0.358	0.309	0.272	0.243	0.220								
12		1.702	0.919	0.630	0.481	0.389	0.327	0.282	0.248	0.221	0.200								
13		1.578	0.847	0.581	0.442	0.359	0.300	0.259	0.228	0.204	0.184								
14		1.472	0.787	0.538	0.410	0.331	0.278	0.240	0.211	0.188	0.170								
15		1.379	0.734	0.502	0.382	0.308	0.259	0.223	0.196	0.164	0.158								
16		1.297	0.689	0.470	0.358	0.288	0.242	0.208	0.183	0.159	0.148								
17		1.224	0.648	0.442	0.335	0.271	0.227	0.196	0.172	0.153	0.138								
18		1.169	0.612	0.417	0.316	0.255	0.214	0.184	0.162	0.144	0.130								
19		1.100	0.580	0.394	0.299	0.241	0.202	0.174	0.153	0.136	0.123								
20		1.047	0.551	0.374	0.284	0.229	0.192	0.165	0.145	0.129	0.117								

Nota: Los valores expresados son las resistencias de los electrodos en ohmios

CONDUCTOR: No. 1/0 AWG
DIAMETRO: 9.4 mm

		L																	
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20								
1	n	12.924	9.133	7.098	5.826	4.983	4.316	3.831	3.448	3.137	2.881								
2		7.892	5.088	3.772	3.007	2.506	2.152	1.888	1.684	1.521	1.367								
3		5.751	3.517	2.544	1.999	1.650	1.407	1.228	1.090	0.981	0.893								
4		4.537	2.693	1.912	1.489	1.222	1.038	0.903	0.800	0.718	0.652								
5		3.750	2.165	1.528	1.195	0.968	0.819	0.711	0.622	0.564	0.511								
6		3.197	1.814	1.271	0.980	0.801	0.675	0.582	0.517	0.463	0.419								
7		2.787	1.560	1.087	0.836	0.680	0.574	0.497	0.438	0.392	0.355								
8		2.470	1.368	0.949	0.728	0.591	0.499	0.431	0.380	0.340	0.308								
9		2.218	1.218	0.842	0.645	0.523	0.440	0.381	0.335	0.300	0.271								
10		2.013	1.097	0.756	0.572	0.439	0.394	0.340	0.300	0.268	0.242								
11		1.842	0.998	0.686	0.524	0.424	0.357	0.308	0.271	0.242	0.219								
12		1.699	0.915	0.628	0.479	0.388	0.326	0.281	0.247	0.221	0.199								
13		1.576	0.845	0.579	0.441	0.357	0.300	0.258	0.227	0.203	0.183								
14		1.469	0.785	0.537	0.409	0.330	0.277	0.239	0.210	0.188	0.169								
15		1.376	0.733	0.501	0.381	0.307	0.258	0.222	0.195	0.174	0.158								
16		1.295	0.687	0.469	0.356	0.288	0.241	0.208	0.183	0.163	0.147								
17		1.222	0.617	0.441	0.335	0.270	0.227	0.195	0.171	0.153	0.138								
18		1.157	0.611	0.416	0.316	0.255	0.213	0.184	0.162	0.144	0.130								
19		1.099	0.579	0.394	0.299	0.241	0.202	0.174	0.153	0.136	0.123								
20		1.047	0.550	0.374	0.283	0.229	0.191	0.165	0.147	0.129	0.116								

Nota: Los valores expresados son las resistencias de los electrodos en ohmios

CONDUCTOR: No. 2/0 AWG
 DIAMETRO: 10.5 mm

		L																	
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20								
1	n	12.881	9.095	7.063	5.793	4.924	4.290	3.807	3.426	3.118	2.865								
2		7.877	5.071	3.746	2.994	2.495	2.142	1.879	1.656	1.513	1.381								
3		5.741	3.508	2.536	1.992	1.644	1.402	1.223	1.086	0.977	0.889								
4		4.530	2.676	1.906	1.482	1.218	1.035	0.900	0.797	0.716	0.650								
5		3.747	2.160	1.524	1.180	0.965	0.817	0.709	0.627	0.562	0.510								
6		3.195	1.812	1.268	0.978	0.797	0.674	0.584	0.516	0.462	0.418								
7		2.783	1.557	1.096	0.834	0.679	0.573	0.496	0.437	0.391	0.354								
8		2.474	1.366	0.947	0.727	0.590	0.497	0.430	0.385	0.339	0.307								
9		2.216	1.216	0.840	0.643	0.521	0.440	0.380	0.335	0.299	0.271								
10		2.011	1.096	0.753	0.577	0.468	0.394	0.340	0.299	0.267	0.242								
11		1.841	1.000	0.685	0.523	0.424	0.356	0.307	0.271	0.242	0.218								
12		1.697	0.914	0.627	0.478	0.387	0.325	0.281	0.247	0.220	0.199								
13		1.574	0.844	0.578	0.440	0.356	0.299	0.258	0.227	0.203	0.183								
14		1.468	0.784	0.536	0.409	0.330	0.277	0.239	0.210	0.187	0.169								
15		1.375	0.732	0.500	0.380	0.307	0.258	0.222	0.195	0.174	0.157								
16		1.294	0.686	0.438	0.336	0.287	0.241	0.208	0.182	0.163	0.147								
17		1.223	0.646	0.440	0.334	0.270	0.226	0.195	0.171	0.153	0.138								
18		1.156	0.610	0.415	0.315	0.256	0.213	0.184	0.163	0.144	0.130								
19		1.089	0.579	0.394	0.299	0.240	0.202	0.174	0.152	0.136	0.123								
20		1.045	0.549	0.373	0.283	0.228	0.191	0.163	0.145	0.129	0.116								

Nota: Los valores expresados son las resistencias de los electrodos en ohmios

CONDUCTOR: No. 4/0 AWG
DIAMETRO: 13.3 mm

		L																	
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20								
1	n	12.714	9.015	6.985	5.726	4.864	4.236	3.758	3.382	3.077	2.825								
2		7.845	5.037	3.726	2.967	2.481	2.121	1.861	1.659	1.501	1.367								
3		5.722	3.467	2.519	1.978	1.632	1.391	1.214	1.045	0.970	0.882								
4		4.530	2.662	1.895	1.499	1.211	1.028	0.894	0.792	0.708	0.645								
5		3.734	2.151	1.516	1.175	0.959	0.812	0.705	0.623	0.559	0.507								
6		3.185	1.807	1.262	0.973	0.793	0.670	0.581	0.513	0.459	0.416								
7		2.777	1.551	1.080	0.830	0.675	0.570	0.493	0.435	0.389	0.353								
8		2.462	1.361	0.945	0.724	0.588	0.495	0.428	0.376	0.338	0.306								
9		2.211	1.212	0.837	0.641	0.520	0.438	0.378	0.333	0.298	0.269								
10		2.007	1.092	0.752	0.575	0.466	0.392	0.339	0.298	0.266	0.241								
11		1.837	0.994	0.683	0.521	0.422	0.342	0.306	0.240	0.241	0.219								
12		1.694	0.912	0.625	0.477	0.386	0.324	0.280	0.246	0.220	0.195								
13		1.571	0.846	0.577	0.439	0.355	0.298	0.257	0.226	0.202	0.182								
14		1.466	0.782	0.535	0.407	0.329	0.276	0.238	0.209	0.187	0.169								
15		1.375	0.732	0.500	0.379	0.306	0.257	0.221	0.195	0.174	0.157								
16		1.292	0.685	0.467	0.355	0.286	0.240	0.207	0.182	0.162	0.147								
17		1.219	0.645	0.439	0.339	0.269	0.226	0.194	0.171	0.152	0.136								
18		1.154	0.609	0.414	0.315	0.254	0.213	0.183	0.161	0.144	0.130								
19		1.097	0.577	0.392	0.298	0.240	0.201	0.173	0.152	0.136	0.123								
20		1.048	0.548	0.372	0.282	0.228	0.191	0.164	0.144	0.129	0.116								

Nota: Los valores expresados son las resistencias de los electrodos en ohmios

CONDUCTOR: No. 250 MCM
 DIAMETRO: 14.6 mm

n	L																			
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20										
1	12.714	9.015	6.958	5.699	4.840	4.215	3.739	3.364	3.061	2.810										
2	7.990	5.023	3.714	2.958	2.463	2.113	1.854	1.653	1.492	1.361										
3	5.714	3.479	2.512	1.972	1.627	1.387	1.210	1.073	0.966	0.879										
4	4.516	2.657	1.891	1.472	1.207	1.025	0.891	0.789	0.709	0.643										
5	3.730	2.147	1.513	1.120	0.957	0.810	0.703	0.622	0.557	0.505										
6	3.181	1.800	1.262	0.971	0.792	0.669	0.580	0.512	0.458	0.415										
7	2.777	1.567	1.080	0.830	0.674	0.569	0.492	0.435	0.389	0.352										
8	2.459	1.363	0.942	0.722	0.587	0.494	0.428	0.376	0.337	0.305										
9	2.209	1.210	0.836	0.640	0.519	0.437	0.376	0.333	0.297	0.271										
10	2.005	1.091	0.751	0.574	0.465	0.391	0.338	0.298	0.266	0.240										
11	1.809	0.993	0.682	0.521	0.422	0.354	0.306	0.269	0.240	0.217										
12	1.693	0.911	0.625	0.476	0.385	0.324	0.279	0.246	0.219	0.198										
13	1.577	0.841	0.576	0.439	0.355	0.298	0.257	0.213	0.202	0.182										
14	1.464	0.781	0.534	0.407	0.326	0.276	0.236	0.209	0.187	0.168										
15	1.372	0.730	0.498	0.379	0.306	0.257	0.221	0.194	0.174	0.157										
16	1.291	0.685	0.467	0.355	0.286	0.240	0.210	0.182	0.162	0.146										
17	1.218	0.644	0.439	0.333	0.269	0.225	0.194	0.171	0.152	0.137										
18	1.154	0.608	0.414	0.314	0.253	0.212	0.183	0.161	0.143	0.129										
19	1.096	0.577	0.392	0.297	0.240	0.201	0.173	0.152	0.136	0.122										
20	1.043	0.548	0.372	0.282	0.228	0.191	0.164	0.144	0.128	0.116										

Nota: Los valores expresados son las resistencias de los electrodos en ohmios

CONDUCTOR: No. 300 MCM
 DIAMETRO: 15.95 mm

		L																			
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20										
1	n	12.654	6.950	6.928	5.673	4.919	4.194	3.720	3.347	3.045	2.795										
2		7.620	5.009	3.702	2.946	2.453	2.105	1.846	1.646	1.487	1.356										
3		5.706	3.471	2.503	1.966	1.622	1.382	1.206	1.071	0.963	0.876										
4		4.505	2.652	1.886	1.468	1.204	1.022	0.890	0.787	0.707	0.642										
5		3.726	2.143	1.510	1.169	0.953	0.809	0.702	0.620	0.556	0.504										
6		3.178	1.797	1.257	0.969	0.790	0.668	0.578	0.511	0.458	0.414										
7		2.778	1.547	1.076	0.827	0.673	0.566	0.491	0.433	0.386	0.351										
8		2.457	1.357	0.941	0.721	0.586	0.494	0.427	0.376	0.336	0.304										
9		2.219	1.209	0.833	0.639	0.518	0.436	0.377	0.333	0.297	0.269										
10		2.007	1.090	0.751	0.573	0.465	0.391	0.338	0.297	0.266	0.240										
11		1.834	0.992	0.681	0.530	0.421	0.354	0.305	0.269	0.240	0.217										
12		1.691	0.911	0.624	0.476	0.365	0.323	0.279	0.245	0.218	0.198										
13		1.577	0.841	0.575	0.438	0.354	0.297	0.256	0.226	0.201	0.182										
14		1.463	0.781	0.534	0.406	0.328	0.275	0.237	0.209	0.186	0.168										
15		1.371	0.730	0.498	0.378	0.306	0.256	0.221	0.194	0.174	0.157										
16		1.290	0.684	0.466	0.354	0.286	0.240	0.207	0.182	0.162	0.146										
17		1.218	0.644	0.438	0.333	0.269	0.225	0.194	0.170	0.152	0.137										
18		1.153	0.608	0.414	0.314	0.253	0.212	0.183	0.161	0.143	0.129										
19		1.095	0.576	0.392	0.297	0.240	0.201	0.173	0.152	0.136	0.122										
20		1.042	0.547	0.391	0.282	0.227	0.190	0.164	0.144	0.126	0.116										

Nota: Los valores expresados son las resistencias de los electrodos en ohmios

CONDUCTOR: No. 350 MCM
 DIAMETRO: 17.2 mm

		L																		
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20									
1	n	12.629	6.924	6.904	5.651	4.797	4.177	3.704	3.333	3.032	2.783									
2		7.809	4.998	3.692	2.937	2.445	2.099	1.841	1.641	1.482	1.352									
3		5.699	3.465	2.499	1.961	1.618	1.379	1.203	1.068	0.961	0.874									
4		4.500	2.647	1.863	1.465	1.202	1.019	0.867	0.786	0.705	0.640									
5		3.722	2.140	1.507	1.166	0.953	0.808	0.800	0.619	0.555	0.503									
6		3.175	1.795	1.255	0.968	0.789	0.666	0.577	0.510	0.457	0.414									
7		2.769	1.545	1.075	0.826	0.672	0.569	0.491	0.433	0.387	0.351									
8		2.455	1.356	0.940	0.720	0.585	0.493	0.428	0.377	0.336	0.304									
9		2.206	1.208	0.834	0.638	0.515	0.436	0.377	0.334	0.307	0.269									
10		2.002	1.088	0.750	0.573	0.464	0.390	0.337	0.297	0.265	0.240									
11		1.826	0.991	0.681	0.519	0.421	0.354	0.305	0.269	0.240	0.217									
12		1.690	0.909	0.623	0.475	0.384	0.323	0.279	0.245	0.219	0.196									
13		1.568	0.840	0.575	0.438	0.354	0.297	0.256	0.225	0.201	0.182									
14		1.464	0.780	0.533	0.406	0.328	0.275	0.237	0.209	0.186	0.168									
15		1.370	0.729	0.497	0.378	0.305	0.256	0.221	0.194	0.173	0.156									
16		1.289	0.683	0.466	0.354	0.286	0.240	0.206	0.181	0.162	0.146									
17		1.217	0.644	0.439	0.332	0.268	0.225	0.194	0.170	0.152	0.138									
18		1.152	0.608	0.414	0.314	0.253	0.212	0.182	0.160	0.143	0.129									
19		1.094	0.576	0.391	0.297	0.239	0.201	0.173	0.152	0.136	0.121									
20		1.042	0.547	0.371	0.283	0.227	0.190	0.164	0.144	0.128	0.116									

Nota: Los valores expresados son las resistencias de los electrodos en ohmios

APENDICE B

**COMPROBACION DE METODOS DE
CALCULO DE RESISTENCIA DE
PUESTA A TIERRA**

B.1 ECUACION SIMPLIFICADA (ecu. 2)

n	L (m)	L' (m)	A (m ²)	Rg (ohms)	Rg (amt) (ohms)	Error (%)
1	2	8	4	34.656	21.108	64.18
4	20	200	6400	1.054	0.664	58.72
6	8	112	2304	1.816	1.011	79.63
8	14	252	12544	0.792	0.437	81.34
10	10	220	10000	0.898	0.476	88.58
12	4	104	2304	1.885	0.948	98.81
14	12	360	28224	0.542	0.280	93.41
16	6	204	9216	0.952	0.477	99.53
18	16	608	82944	0.318	0.163	95.30
20	18	756	129600	0.255	0.129	97.96

B.2 ECUACION DE SVERAK (ecu. 3)

n	L (m)	L1 (m)	A (m ²)	Rg (ohms)	Rg amt (ohms)	Error (%)
1	2	8	4	28.959	21.108	37.19
4	20	200	6400	1.051	0.664	58.35
6	8	112	2304	1.804	1.011	78.42
8	14	252	12544	0.792	0.437	81.28
10	10	220	10000	0.897	0.476	88.42
12	4	104	2304	1.872	0.948	97.52
14	12	360	28224	0.542	0.280	93.65
16	6	204	9216	0.951	0.477	99.32
18	16	608	82944	0.320	0.163	96.02
20	18	756	129600	0.256	0.129	98.54

B.3 ECUACION DE SCHWARZ (ecu. 4)

n	L (m)	L' (m)	A (m ²)	NV	R1 (ohms)	R2 (ohms)	R12 (ohms)	Rg (ohms)	Rgamt (ohms)	Error (%)
1	2	8	4	4	20.500	12.273	11.855	12.254	12.988	-5.65
1	20	60	400	4	3.094	12.247	2.102	3.005	2.917	3.02
2	10	60	400	8	3.362	6.127	2.039	3.039	2.526	20.20
6	14	252	12544	32	0.673	1.532	0.558	0.796	0.433	63.60
10	10	220	10000	40	0.972	1.226	0.611	0.838	0.47	78.39
12	4	104	2304	48	1.615	1.024	1.052	1.023	0.919	11.29
14	12	360	28224	56	0.632	0.876	0.411	0.561	0.278	101.68
16	6	204	9216	64	1.023	0.767	0.634	0.733	0.47	55.97
18	16	608	82944	72	0.400	0.681	0.269	0.368	0.162	127.22
20	18	756	129600	80	0.330	0.613	0.225	0.308	0.129	136.42

**B.4 METODO DE TAGG COMPARADO CON VARILLAS
ENTERRADAS A 0.5 m DE PROFUNDIDAD**

L = 2

n'	R(amt) (ohms)	Rnv/R1v	N	K	Rnv (ohms)	Error (%)
2	12.988	0.302	4	2.707	15.548	19.71
3	7.921	0.166	8	4.258	8.545	7.88
4	5.769	0.118	12	5.394	6.073	5.28
5	4.550	0.092	16	6.007	4.708	3.46
6	3.760	0.075	20	6.463	3.857	2.57
7	3.205	0.064	24	6.836	3.276	2.21
8	2.793	0.055	28	7.148	2.852	2.12
9	2.475	0.049	32	7.420	2.529	2.20
10	2.223	0.044	36	7.655	2.274	2.31

L = 4

n'	R(amt) (ohms)	Rnv/R1v	N	K	Rnv (ohms)	Error (%)
2	9.139	0.276	4	2.707	14.201	55.39
3	5.121	0.146	8	4.258	7.486	46.19
4	3.537	0.101	12	5.398	5.180	46.45
5	2.695	0.077	16	6.007	3.961	46.96
6	2.180	0.063	20	6.463	3.214	47.43
7	1.821	0.053	24	6.836	2.709	48.77
8	1.566	0.046	28	7.148	2.344	49.70
9	1.373	0.040	32	7.420	2.068	50.63
10	1.222	0.036	36	7.655	1.851	51.50

B.5 METODO DE TAGG COMPARADO CON VARILLAS AL NIVEL DEL SUELO SIN CONDUCTOR HORIZONTAL

L = 2

n'	R(amt) (ohms)	Rnv/R1v	N	K	Rnv (ohms)	Error (%)
2	15.752	0.302	4	2.707	15.548	-1.30
3	9.504	0.166	8	4.258	8.545	-10.09
4	6.973	0.118	12	5.394	6.073	-12.90
5	5.561	0.092	16	6.007	4.708	-15.35
6	4.650	0.075	20	6.463	3.857	-17.06
7	4.010	0.064	24	6.836	3.276	-18.31
8	3.534	0.055	28	7.148	2.852	-19.29
9	3.164	0.049	32	7.420	2.529	-20.06
10	2.869	0.044	36	7.655	2.274	-20.72

L = 4

n'	R(amt) (ohms)	Rnv/R1v	N	K	Rnv (ohms)	Error (%)
2	14.025	0.276	4	2.707	14.201	1.26
3	7.887	0.146	8	4.258	7.486	-5.08
4	5.580	0.101	12	5.398	5.180	-7.17
5	4.349	0.077	16	6.007	3.961	-8.93
6	3.579	0.063	20	6.463	3.214	-10.19
7	3.049	0.053	24	6.836	2.709	-11.15
8	2.842	0.046	28	7.148	2.344	-17.50
9	2.414	0.040	32	7.420	2.068	-14.33
10	2.129	0.036	36	7.655	1.851	-13.04

APENDICE C

**COMPROBACION DE LA ECUACION DE
ELECTRODOS CUADRADOS SIN VARILLAS
DEDUCIDA CON "n" CONSTANTE (ecu. 46)**

n	L (m)	Rg (ohms)	Rg(amt) (ohms)	Error (%)	n	L (m)	Rg (ohms)	Rg(amt) (ohms)	Error (%)
1	2	20.590	20.645	0.27	4	2	5.438	5.438	0.00
1	4	11.580	11.795	1.82	4	4	2.924	2.917	-0.24
1	6	8.139	8.426	3.40	4	6	2.019	2.013	-0.30
1	8	6.311	6.616	4.61	4	8	1.549	1.543	-0.40
1	10	5.171	5.476	5.57	4	10	1.260	1.257	-0.26
1	12	4.390	4.687	6.34	4	12	1.064	1.061	-0.30
1	14	3.820	4.107	6.99	4	14	0.922	0.919	-0.34
1	16	3.385	3.661	7.53	4	16	0.814	0.812	-0.29
1	18	3.042	3.307	8.00	4	18	0.730	0.728	-0.23
1	20	2.765	3.019	8.43	4	20	0.661	0.659	-0.35
2	2	10.677	10.694	0.16	5	2	4.363	4.363	-0.00
2	4	5.864	5.920	0.95	5	4	2.330	2.319	-0.46
2	6	4.086	4.155	1.67	5	6	1.603	1.594	-0.58
2	8	3.153	3.223	2.19	5	8	1.228	1.233	0.44
2	10	2.575	2.643	2.58	5	10	0.997	0.989	-0.82
2	12	2.181	2.246	2.91	5	12	0.841	0.834	-0.84
2	14	1.894	1.957	3.21	5	14	0.728	0.722	-0.83
2	16	1.676	1.736	3.45	5	16	0.642	0.637	-0.84
2	18	1.504	1.561	3.62	5	18	0.575	0.570	-0.91
2	20	1.366	1.420	3.83	5	20	0.521	0.516	-0.96
3	2	7.208	7.212	0.05	6	2	3.641	3.642	0.02
3	4	3.910	3.917	0.17	6	4	1.933	1.923	-0.52
3	6	2.711	2.721	0.38	6	6	1.326	1.317	-0.72
3	8	2.085	2.097	0.57	6	8	1.014	1.005	-0.87
3	10	1.699	1.711	0.69	6	10	0.822	0.815	-0.90
3	12	1.437	1.449	0.84	6	12	0.693	0.686	-0.99
3	14	1.246	1.258	0.92	6	14	0.599	0.593	-1.04
3	16	1.102	1.113	1.01	6	16	0.528	0.522	-1.21
3	18	0.988	0.999	1.11	6	18	0.473	0.467	-1.23
3	20	0.896	0.906	1.10	6	20	0.428	0.423	-1.17

n	L (m)	Rg (ohms)	Rg(amt) (ohms)	Error (%)	n	L (m)	Rg (ohms)	Rg(amt) (ohms)	Error (%)
7	2	3.124	3.125	0.04	10	2	2.188	2.191	0.15
7	4	1.650	1.642	-0.47	10	4	1.142	1.139	-0.25
7	6	1.129	1.121	-0.73	10	6	0.777	0.774	-0.37
7	8	0.862	0.854	-0.89	10	8	0.590	0.587	-0.57
7	10	0.698	0.691	-1.02	10	10	0.477	0.474	-0.60
7	12	0.588	0.581	-1.12	10	12	0.400	0.397	-0.85
7	14	0.508	0.502	-1.14	10	14	0.345	0.343	-0.68
7	16	0.447	0.442	-1.21	10	16	0.304	0.302	-0.58
7	18	0.400	0.395	-1.28	10	18	0.271	0.269	-0.83
7	20	0.362	0.357	-1.40	10	20	0.245	0.243	-0.87
8	2	2.734	2.736	0.06	12	2	1.823	1.826	0.15
8	4	1.438	1.431	-0.46	12	4	0.946	0.945	-0.10
8	6	0.982	0.975	-0.70	12	6	0.642	0.640	-0.26
8	8	0.748	0.742	-0.81	12	8	0.487	0.485	-0.32
8	10	0.605	0.600	-0.89	12	10	0.392	0.391	-0.36
8	12	0.509	0.504	-1.00	12	12	0.329	0.328	-0.33
8	14	0.440	0.435	-1.06	12	14	0.284	0.283	-0.18
8	16	0.387	0.383	-1.07	12	16	0.249	0.249	-0.07
8	18	0.346	0.342	-1.17	12	18	0.222	0.222	-0.15
8	20	0.313	0.309	-1.27	12	20	0.201	0.200	-0.38
9	2	2.431	2.433	0.09	14	2	1.563	1.565	0.14
9	4	1.273	1.268	-0.40	14	4	0.807	0.807	-0.01
9	6	0.868	0.863	-0.55	14	6	0.546	0.546	-0.01
9	8	0.660	0.656	-0.64	14	8	0.413	0.413	-0.10
9	10	0.534	0.530	-0.71	14	10	0.333	0.333	0.01
9	12	0.448	0.445	-0.78	14	12	0.279	0.279	0.02
9	14	0.387	0.384	-0.79	14	14	0.240	0.240	-0.05
9	16	0.341	0.338	-0.78	14	16	0.211	0.211	0.06
9	18	0.304	0.302	-0.76	14	18	0.188	0.188	-0.02
9	20	0.275	0.273	-0.76	14	20	0.170	0.170	0.17

n	L (m)	Rg (ohms)	Rg(amt) (ohms)	Error (%)
16	2	1.368	1.369	0.09
16	4	0.704	0.704	0.04
16	6	0.475	0.476	0.18
16	8	0.359	0.360	0.22
16	10	0.289	0.290	0.34
16	12	0.242	0.243	0.44
16	14	0.208	0.209	0.42
16	16	0.183	0.183	0.19
16	18	0.163	0.164	0.74
16	20	0.147	0.148	0.78
18	2	1.216	1.217	0.06
18	4	0.624	0.624	0.02
18	6	0.421	0.421	0.10
18	8	0.318	0.319	0.44
18	10	0.255	0.256	0.27
18	12	0.214	0.215	0.67
18	14	0.184	0.185	0.75
18	16	0.161	0.162	0.58
18	18	0.143	0.145	1.04
18	20	0.129	0.130	0.47
20	2	1.095	1.095	-0.03
20	4	0.560	0.561	0.10
20	6	0.377	0.379	0.45
20	8	0.285	0.286	0.47
20	10	0.229	0.230	0.58
20	12	0.191	0.192	0.43
20	14	0.164	0.165	0.43
20	16	0.144	0.145	0.65
20	18	0.128	0.129	0.55
20	20	0.116	0.117	1.16

APENDICE D

**COMPROBACION DE LA ECUACION DE
ELECTRODOS CUADRADOS SIN VARILLAS (ecu. 53)**

L = 2

n	L (m)	Rg (ohms)	Rg(amt) (ohms)	Error (%)
1	2	21.579	20.644	4.33
2	2	10.868	10.694	1.61
3	2	7.277	7.211	0.90
4	2	5.474	5.438	0.66
5	2	4.388	4.363	0.60
6	2	3.665	3.642	0.62
7	2	3.146	3.125	0.67
8	2	2.757	2.736	0.75
9	2	2.453	2.433	0.83
10	2	2.210	2.191	0.88
11	2	2.012	1.992	0.97
12	2	1.846	1.826	1.06
13	2	1.705	1.686	1.11
14	2	1.584	1.565	1.22
15	2	1.480	1.461	1.27
16	2	1.388	1.369	1.39
17	2	1.307	1.289	1.41
18	2	1.236	1.217	1.50
19	2	1.171	1.153	1.55
20	2	1.113	1.095	1.63

L = 4

n	L (m)	Rg (ohms)	Rg(amt) (ohms)	Error (%)
1	4	12.015	11.795	1.83
2	4	5.917	5.920	-0.04
3	4	3.910	3.917	-0.18
4	4	2.914	2.917	-0.11
5	4	2.319	2.319	0.02
6	4	1.925	1.923	0.10
7	4	1.644	1.642	0.14
8	4	1.434	1.431	0.24
9	4	1.272	1.268	0.29
10	4	1.142	1.139	0.24
11	4	1.036	1.033	0.26
12	4	0.946	0.945	0.27
13	4	0.873	0.870	0.35
14	4	0.809	0.807	0.29
15	4	0.754	0.752	0.29
16	4	0.709	0.704	0.28
17	4	0.664	0.662	0.23
18	4	0.626	0.624	0.30
19	4	0.592	0.591	0.20
20	4	0.562	0.561	0.16

L = 6

n	L (m)	Rg (ohms)	Rg(amt) (ohms)	Error (%)
1	6	8.487	8.426	0.72
2	6	4.133	4.155	-0.52
3	6	2.713	2.721	-0.31
4	6	2.011	2.013	-0.07
5	6	1.595	1.594	0.06
6	6	1.319	1.317	0.19
7	6	1.124	1.121	0.26
8	6	0.978	0.975	0.32
9	6	0.865	0.863	0.27
10	6	0.775	0.774	0.18
11	6	0.702	0.707	-0.69
12	6	0.641	0.640	0.21
13	6	0.590	0.589	0.18
14	6	0.546	0.546	0.04
15	6	0.508	0.508	0.07
16	6	0.475	0.476	-0.15
17	6	0.446	0.447	-0.18
18	6	0.420	0.421	-0.15
19	6	0.397	0.399	-0.41
20	6	0.377	0.378	-0.35

L = 8

n	L (m)	Rg (ohms)	Rg(amt) (ohms)	Error (%)
1	8	6.620	6.616	0.06
2	8	3.200	3.223	-0.71
3	8	2.091	2.097	-0.30
4	8	1.545	1.543	0.15
5	8	1.222	1.233	-0.89
6	8	1.009	1.005	0.38
7	8	0.858	0.854	0.44
8	8	0.745	0.742	0.44
9	8	0.655	0.656	0.35
10	8	0.589	0.587	0.36
11	8	0.533	0.532	0.16
12	8	0.486	0.485	0.24
13	8	0.447	0.447	-0.04
14	8	0.413	0.413	0.05
15	8	0.384	0.385	-0.21
16	8	0.359	0.360	-0.30
17	8	0.337	0.338	-0.39
18	8	0.317	0.319	-0.64
19	8	0.299	0.301	-0.54
20	8	0.284	0.286	-0.84

L = 10

n	L (m)	Rg (ohms)	Rg(amt) (ohms)	Error (%)
1	10	5.454	5.476	-0.41
2	10	2.622	2.643	-0.78
3	10	1.708	1.711	-0.20
4	10	1.259	1.257	0.16
5	10	0.994	0.989	0.48
6	10	0.819	0.815	0.49
7	10	0.695	0.691	0.63
8	10	0.603	0.600	0.57
9	10	0.532	0.530	0.46
10	10	0.476	0.474	0.42
11	10	0.430	0.429	0.26
12	10	0.392	0.391	0.28
13	10	0.360	0.360	0.03
14	10	0.333	0.333	-0.07
15	10	0.309	0.310	-0.26
16	10	0.289	0.290	-0.46
17	10	0.271	0.272	-0.51
18	10	0.255	0.256	-0.54
19	10	0.240	0.242	-0.68
20	10	0.228	0.230	-1.07

L = 12

n	L (m)	Rg (ohms)	Rg(amt) (ohms)	Error (%)
1	12	4.652	4.687	-0.75
2	12	2.228	2.246	-0.82
3	12	1.447	1.449	-0.15
4	12	1.065	1.061	0.35
5	12	0.839	0.834	0.61
6	12	0.691	0.686	0.67
7	12	0.586	0.581	0.81
8	12	0.508	0.504	0.74
9	12	0.448	0.445	0.59
10	12	0.400	0.397	0.72
11	12	0.361	0.360	0.30
12	12	0.329	0.328	0.28
13	12	0.302	0.302	-0.04
14	12	0.279	0.279	-0.07
15	12	0.259	0.260	-0.42
16	12	0.242	0.243	-0.58
17	12	0.226	0.228	-0.72
18	12	0.213	0.215	-0.99
19	12	0.201	0.203	-1.05
20	12	0.190	0.192	-0.99

L = 14

n	L (m)	Rg (ohms)	Rg(amt) (ohms)	Error (%)
1	14	4.065	4.107	-1.02
2	14	1.940	1.937	-0.67
3	14	1.257	1.258	-0.05
4	14	0.924	0.919	0.52
5	14	0.727	0.722	0.71
6	14	0.596	0.593	0.81
7	14	0.507	0.502	0.90
8	14	0.439	0.435	0.86
9	14	0.387	0.384	0.66
10	14	0.345	0.343	0.60
11	14	0.311	0.310	0.45
12	14	0.284	0.283	0.18
13	14	0.260	0.260	0.02
14	14	0.240	0.241	-0.39
15	14	0.223	0.224	-0.52
16	14	0.206	0.209	-0.56
17	14	0.195	0.196	-0.69
18	14	0.183	0.185	-1.10
19	14	0.173	0.175	-1.39
20	14	0.163	0.165	-1.05

L = 16

n	L (m)	Rg (ohms)	Rg(amt) (ohms)	Error (%)
1	16	3.616	3.661	-1.24
2	16	1.721	1.736	-0.88
3	16	1.113	1.113	0.03
4	16	0.817	0.812	0.60
5	16	0.642	0.637	0.82
6	16	0.523	0.522	1.06
7	16	0.447	0.442	1.05
8	16	0.387	0.383	0.94
9	16	0.340	0.338	0.70
10	16	0.304	0.302	0.56
11	16	0.274	0.273	0.33
12	16	0.249	0.249	0.11
13	16	0.229	0.228	0.24
14	16	0.211	0.211	-0.05
15	16	0.196	0.196	-0.17
16	16	0.182	0.183	-0.31
17	16	0.171	0.172	-0.70
18	16	0.161	0.162	-0.93
19	16	0.151	0.153	-1.09
20	16	0.143	0.145	-1.30

L = 18

n	L (m)	Rg (ohms)	Rg(amt) (ohms)	Error (%)
1	18	3.261	3.307	-1.42
2	18	1.548	1.561	-0.84
3	18	1.000	0.999	0.06
4	18	0.733	0.728	0.65
5	18	0.576	0.570	0.98
6	18	0.472	0.467	1.16
7	18	0.400	0.393	1.18
8	18	0.346	0.342	1.10
9	18	0.304	0.302	0.75
10	18	0.271	0.269	0.86
11	18	0.245	0.243	0.66
12	18	0.223	0.222	0.23
13	18	0.204	0.204	-0.04
14	18	0.188	0.188	0.05
15	18	0.174	0.175	-0.31
16	18	0.163	0.164	-0.66
17	18	0.152	0.154	-1.19
18	18	0.143	0.145	-1.41
19	18	0.135	0.137	-1.65
20	18	0.127	0.129	-1.23

L = 20

n	L (m)	Rg (ohms)	Rg(amt) (ohms)	Error (%)
1	20	2.972	3.019	-1.59
2	20	1.406	1.420	-0.86
3	20	0.908	0.906	0.23
4	20	0.665	0.659	0.89
5	20	0.522	0.516	1.12
6	20	0.428	0.423	1.18
7	20	0.362	0.357	1.36
8	20	0.313	0.309	1.25
9	20	0.275	0.273	0.80
10	20	0.245	0.243	0.94
11	20	0.221	0.220	0.46
12	20	0.201	0.200	0.50
13	20	0.184	0.184	0.09
14	20	0.170	0.170	-0.11
15	20	0.157	0.158	-0.35
16	20	0.147	0.148	-0.68
17	20	0.137	0.139	-1.26
18	20	0.129	0.130	-0.83
19	20	0.122	0.123	-1.23
20	20	0.115	0.117	-1.87

APENDICE E

**COMPROBACION DE LA ECUACION DE
ELECTRODOS CUADRADOS CON VARILLAS (ecu. 54)**

n	L (m)	I (m)	iv (m)	Rg (ohms)	Rg(amt) (ohms)	Error (%)
1	2	8	8	12.737	12.924	-1.45
1	4	16	8	9.920	9.133	8.62
1	6	24	8	7.603	7.098	7.19
1	8	32	8	6.155	5.826	5.64
1	10	40	8	5.174	4.983	3.84
1	12	48	8	4.471	4.316	3.59
1	14	56	8	3.942	3.831	2.90
1	16	64	8	3.529	3.448	2.35
1	18	72	8	3.197	3.137	1.93
1	20	80	8	2.925	2.881	1.54
2	2	24	16	7.908	7.892	0.20
2	4	48	16	5.219	5.088	2.57
2	6	72	16	3.841	3.772	1.84
2	8	96	16	3.046	3.007	1.31
2	10	120	16	2.531	2.506	0.98
2	12	144	16	2.169	2.152	0.77
2	14	168	16	1.900	1.888	0.64
2	16	192	16	1.693	1.684	0.52
2	18	216	16	1.528	1.521	0.45
2	20	240	16	1.393	1.387	0.44
4	2	80	32	4.552	4.537	0.33
4	4	160	32	2.692	2.693	-0.04
4	6	240	32	1.917	1.912	0.25
4	8	320	32	1.494	1.489	0.35
4	10	400	32	1.228	1.222	0.47
4	12	480	32	1.044	1.038	0.57
4	14	560	32	0.909	0.903	0.70
4	16	640	32	0.806	0.800	0.79
4	18	720	32	0.725	0.718	0.96
4	20	800	32	0.659	0.652	1.05

n	L (m)	I (m)	Iv (m)	Rg (ohms)	Rg(amt) (ohms)	Error (%)
6	2	168	48	3.204	3.197	0.23
6	4	336	48	1.812	1.814	-0.11
6	6	504	48	1.270	1.271	-0.06
6	8	672	48	0.982	0.980	0.17
6	10	840	48	0.802	0.801	0.12
6	12	1008	48	0.679	0.675	0.60
6	14	1176	48	0.590	0.582	1.29
6	16	1344	48	0.521	0.517	0.84
6	18	1512	48	0.468	0.463	1.00
6	20	1680	48	0.424	0.419	1.24
8	2	288	64	2.479	2.470	0.38
8	4	576	64	1.367	1.368	-0.07
8	6	864	64	0.949	0.949	0.00
8	8	1152	64	0.729	0.728	0.18
8	10	1440	64	0.594	0.591	0.43
8	12	1728	64	0.501	0.499	0.42
8	14	2016	64	0.434	0.431	0.71
8	16	2304	64	0.383	0.380	0.82
8	18	2592	64	0.343	0.340	0.92
8	20	2880	64	0.311	0.308	0.92
10	2	440	80	2.024	2.013	0.53
10	4	880	80	1.098	1.097	0.06
10	6	1320	80	0.757	0.756	0.12
10	8	1760	80	0.579	0.572	1.29
10	10	2200	80	0.470	0.468	0.47
10	12	2640	80	0.396	0.394	0.54
10	14	3080	80	0.343	0.340	0.74
10	16	3520	80	0.302	0.300	0.64
10	18	3960	80	0.270	0.268	0.76
10	20	4400	80	0.244	0.242	0.98

n	L (m)	I (m)	iv (m)	Rg (ohms)	Rg(amt) (ohms)	Error (%)
12	2	624	96	1.709	1.699	0.59
12	4	1248	96	0.917	0.915	0.19
12	6	1872	96	0.629	0.628	0.18
12	8	2496	96	0.480	0.479	0.23
12	10	3120	96	0.389	0.388	0.20
12	12	3744	96	0.327	0.326	0.30
12	14	4368	96	0.282	0.281	0.48
12	16	4992	96	0.249	0.247	0.64
12	18	5616	96	0.222	0.221	0.51
12	20	6240	96	0.201	0.199	0.92
14	2	840	112	1.478	1.469	0.60
14	4	1680	112	0.787	0.785	0.23
14	6	2520	112	0.538	0.537	0.19
14	8	3360	112	0.410	0.409	0.15
14	10	4200	112	0.331	0.330	0.34
14	12	5040	112	0.278	0.277	0.41
14	14	5880	112	0.240	0.239	0.38
14	16	6720	112	0.211	0.210	0.48
14	18	7560	112	0.188	0.188	0.21
14	20	8400	112	0.170	0.169	0.72
16	2	1088	128	1.300	1.295	0.39
16	4	2176	128	0.689	0.687	0.27
16	6	3264	128	0.470	0.469	0.18
16	8	4352	128	0.357	0.356	0.31
16	10	5440	128	0.288	0.288	0.10
16	12	6528	128	0.242	0.241	0.37
16	14	7616	128	0.208	0.208	0.22
16	16	8704	128	0.183	0.183	0.11
16	18	9792	128	0.163	0.163	0.29
16	20	10880	128	0.148	0.147	0.41

n	L (m)	I (m)	iv (m)	Rg (ohms)	Rg(amt) (ohms)	Error (%)
18	2	1368	144	1.158	1.157	0.07
18	4	2736	144	0.612	0.611	0.20
18	6	4104	144	0.417	0.416	0.22
18	8	5472	144	0.316	0.316	0.15
18	10	6840	144	0.255	0.255	0.09
18	12	8208	144	0.214	0.213	0.45
18	14	9576	144	0.184	0.184	0.14
18	16	10944	144	0.162	0.162	-0.10
18	18	12312	144	0.144	0.144	0.22
18	20	13680	144	0.130	0.130	0.19
20	2	1680	160	1.040	1.047	-0.65
20	4	3360	160	0.550	0.550	0.07
20	6	5040	160	0.375	0.374	0.15
20	8	6720	160	0.284	0.283	0.39
20	10	8400	160	0.229	0.228	0.42
20	12	10080	160	0.192	0.191	0.43
20	14	11760	160	0.165	0.165	0.06
20	16	13440	160	0.145	0.147	-1.40
20	18	15120	160	0.129	0.129	0.15
20	20	16800	160	0.117	0.116	0.47

APENDICE F

VALORES DE RESISTENCIA OBTENIDOS DE LA SIMULACION DE ELECTRODOS RECTANGULARES EN EL PROGRAMA AMT

F.1 RESISTENCIA DE ELECTRODOS CON DISPOSICION RECTANGULAR SIN VARILLAS EN EL PERIMETRO

$$L1 = 2$$

		L2/L1				
		1.2	1.4	1.6	1.8	2
n	1	19.573	18.280	17.175	16.215	15.372
	2	10.027	9.339	8.751	8.247	7.806
	4	5.050	4.689	4.384	4.123	3.896
	6	3.368	3.106	2.915	2.740	2.587
	8	2.524	2.337	2.181	2.048	1.934
	10	2.017	1.867	1.741	1.635	1.543
	12	1.679	1.553	1.448	1.360	1.283
	14	1.438	1.330	1.240	1.163	1.097
	16	1.257	1.162	1.083	1.016	0.959
	18	1.100	1.032	0.962	0.906	0.851
	20	1.004	0.928	0.865	0.811	0.765

$$L1 = 10$$

		L2/L1				
		1.2	1.4	1.6	1.8	2
n	1	5.136	4.774	4.465	4.198	3.965
	2	2.459	2.280	2.129	1.999	1.886
	4	1.161	1.074	1.002	0.939	0.886
	6	6.750	0.693	0.646	0.606	0.571
	8	0.552	0.510	0.475	0.445	0.419
	10	0.435	0.502	0.374	0.351	0.340
	12	0.359	0.332	0.309	0.289	0.273
	14	0.305	0.282	0.263	0.246	0.232
	16	0.266	0.245	0.228	0.214	0.202
	18	0.235	0.218	0.202	0.189	0.178
	20	0.210	0.194	0.181	0.169	0.160

Nota: Los valores expresados son resistencias de los electrodos en ohmios.

$$L1 = 20$$

		L2/L1				
		1.2	1.4	1.6	1.8	2
n	1	2.823	2.621	2.448	2.299	2.169
	2	1.319	1.221	1.139	1.069	1.007
	4	0.609	0.563	0.524	0.491	0.463
	6	0.389	0.359	0.335	0.314	0.295
	8	0.284	0.262	0.244	0.229	0.216
	10	0.223	0.206	0.192	0.181	0.169
	12	0.184	0.170	0.156	0.148	0.139
	14	0.156	0.144	0.134	0.125	0.118
	16	0.135	0.125	0.116	0.109	0.103
	18	0.119	0.110	0.103	0.096	0.090
	20	0.107	0.099	0.092	0.086	0.081

Nota: Los valores expresados son resistencias de los electrodos en ohmios.

**F.2 RESISTENCIA DE ELECTRODOS CON DISPOSICION
RECTANGULAR CON VARILLAS EN EL PERIMETRO**

$$L1 = 2$$

		L2/L1				
		1.2	1.4	1.6	1.8	2
n	1	12.473	12.008	11.631	11.195	10.835
	2	7.511	7.153	6.832	6.546	6.287
	4	4.242	4.030	3.820	3.612	3.401
	6	2.981	2.791	2.633	2.493	2.370
	8	2.305	2.153	2.014	1.903	1.813
	10	1.864	1.744	1.627	1.539	1.462
	12	1.569	1.461	1.370	1.291	1.223
	14	1.356	1.261	1.181	1.112	1.052
	16	1.193	1.109	1.037	0.977	0.924
	18	1.053	0.989	0.925	0.873	0.822
	20	0.962	0.893	0.835	0.785	0.742

$$L1 = 10$$

		L2/L1				
		1.2	1.4	1.6	1.8	2
n	1	4.669	4.377	4.149	3.899	3.702
	2	2.338	2.178	2.042	1.924	1.820
	4	1.131	1.049	0.980	0.921	0.870
	6	0.737	0.682	0.638	0.598	0.564
	8	0.544	0.503	0.469	0.440	0.415
	10	0.431	0.398	0.371	0.348	0.337
	12	0.356	0.329	0.306	0.287	0.271
	14	0.303	0.280	0.261	0.244	0.230
	16	0.264	0.244	0.227	0.213	0.201
	18	0.233	0.216	0.201	0.188	0.177
	20	0.209	0.193	0.180	0.169	0.160

Nota: Los valores expresados son resistencias de los electrodos en ohmios.

$$L1 = 20$$

		L2/L1				
		1.2	1.4	1.6	1.8	2
n	1	2.700	2.517	2.359	2.230	2.101
	2	1.290	1.197	1.119	1.051	0.991
	4	0.602	0.557	0.520	0.487	0.460
	6	0.386	0.357	0.333	0.312	0.294
	8	0.283	0.261	0.243	0.228	0.215
	10	0.222	0.205	0.191	0.180	0.169
	12	0.183	0.169	0.156	0.147	0.139
	14	0.155	0.143	0.133	0.125	0.118
	16	0.135	0.124	0.116	0.109	0.103
	18	0.119	0.110	0.103	0.096	0.090
	20	0.107	0.099	0.092	0.086	0.081

Nota: Los valores expresados son resistencias de los electrodos en ohmios.

APENDICE G

COMPROBACION DE LA ECUACION DE ELECTRODOS CUADRADOS MODIFICADA PARA SU UTILIZACION EN ELECTRODOS RECTANGULARES

G.1 COMPROBACION EN ELECTRODOS CON DISPOSICION RECTANGULAR SIN VARILLAS EN EL PERIMETRO

n	L1 (m)	L2/L1	L2 (m)	L (m)	Rg(amt) (ohms)	Rg (ohms)	Error (%)
1	2	1.2	2.4	2.191	19.573	19.993	2.15
1	2	1.4	2.8	2.366	18.280	18.740	2.52
1	2	1.6	3.2	2.530	17.175	17.716	3.15
1	2	1.8	3.6	2.683	16.215	16.858	3.97
1	2	2	4	2.828	15.372	16.125	4.90
2	2	1.2	2.4	2.191	10.027	10.038	0.11
2	2	1.4	2.8	2.366	9.339	9.384	0.48
2	2	1.6	3.2	2.530	8.751	8.851	1.15
2	2	1.8	3.6	2.683	8.247	8.406	1.93
2	2	2	4	2.828	7.806	8.027	2.83
4	2	1.2	2.4	2.191	5.050	5.039	-0.21
4	2	1.4	2.8	2.366	4.689	4.699	0.21
4	2	1.6	3.2	2.530	4.384	4.422	0.87
4	2	1.8	3.6	2.683	4.123	4.192	1.67
4	2	2	4	2.828	3.896	3.996	2.56
6	2	1.2	2.4	2.191	3.368	3.368	-0.01
6	2	1.4	2.8	2.366	3.106	3.135	0.94
6	2	1.6	3.2	2.530	2.915	2.947	1.09
6	2	1.8	3.6	2.683	2.740	2.790	1.83
6	2	2	4	2.828	2.587	2.657	2.70
8	2	1.2	2.4	2.191	2.524	2.530	0.24
8	2	1.4	2.8	2.366	2.337	2.353	0.68
8	2	1.6	3.2	2.530	2.181	2.209	1.30
8	2	1.8	3.6	2.683	2.048	2.090	2.06
8	2	2	4	2.828	1.934	1.989	2.84
10	2	1.2	2.4	2.191	2.017	2.027	0.48
10	2	1.4	2.8	2.366	1.867	1.883	0.87
10	2	1.6	3.2	2.530	1.741	1.767	1.50
10	2	1.8	3.6	2.683	1.635	1.671	2.18
10	2	2	4	2.828	1.543	1.589	2.97

n	L1 (m)	L2/L1	L2 (m)	L (m)	Rg(amt) (ohms)	Rg (ohms)	Error (%)
1	10	1.2	12	10.954	5.136	5.037	-1.92
1	10	1.4	14	11.832	4.774	4.710	-1.35
1	10	1.6	16	12.649	4.465	4.443	-0.50
1	10	1.8	18	13.416	4.198	4.220	0.52
1	10	2	20	14.142	3.965	4.030	1.63
2	10	1.2	12	10.954	2.459	2.417	-1.70
2	10	1.4	14	11.832	2.280	2.256	-1.05
2	10	1.6	16	12.649	2.129	2.125	-0.19
2	10	1.8	18	13.416	1.999	2.016	0.84
2	10	2	20	14.142	1.886	1.923	1.94
4	10	1.2	12	10.954	1.161	1.158	-0.27
4	10	1.4	14	11.832	1.074	1.079	0.43
4	10	1.6	16	12.649	1.002	1.014	1.23
4	10	1.8	18	13.416	0.939	0.961	2.32
4	10	2	20	14.142	0.886	0.915	3.30
6	10	1.2	12	10.954	0.750	0.752	0.28
6	10	1.4	14	11.832	0.693	0.700	0.98
6	10	1.6	16	12.649	0.646	0.657	1.77
6	10	1.8	18	13.416	0.606	0.622	2.67
6	10	2	20	14.142	0.571	0.592	3.72
8	10	1.2	12	10.954	0.552	0.554	0.28
8	10	1.4	14	11.832	0.510	0.515	0.90
8	10	1.6	16	12.649	0.475	0.483	1.70
8	10	1.8	18	13.416	0.445	0.457	2.66
8	10	2	20	14.142	0.419	0.435	3.73
10	10	1.2	12	10.954	0.435	0.436	0.30
10	10	1.4	14	11.832	0.402	0.405	0.82
10	10	1.6	16	12.649	0.374	0.380	1.67
10	10	1.8	18	13.416	0.351	0.359	2.40
10	10	2	20	14.142	0.340	0.342	0.52

n	L1 (m)	L2/L1	L2 (m)	L (m)	Rg(amt) (ohms)	Rg (ohms)	Error (%)
1	20	1.2	24	21.909	2.823	2.742	-2.86
1	20	1.4	28	23.664	2.621	2.562	-2.25
1	20	1.6	32	25.298	2.448	2.415	-1.34
1	20	1.8	36	26.833	2.299	2.292	-0.28
1	20	2	40	28.284	2.169	2.188	0.88
2	20	1.2	24	21.909	1.319	1.297	-1.69
2	20	1.4	28	23.664	1.221	1.210	-0.93
2	20	1.6	32	25.298	1.139	1.139	-0.01
2	20	1.8	36	26.833	1.069	1.080	1.02
2	20	2	40	28.284	1.007	1.030	2.25
4	20	1.2	24	21.909	0.609	0.611	0.36
4	20	1.4	28	23.664	0.563	0.569	1.10
4	20	1.6	32	25.298	0.524	0.535	2.12
4	20	1.8	36	26.833	0.491	0.507	3.21
4	20	2	40	28.284	0.463	0.483	4.24
6	20	1.2	24	21.909	0.389	0.393	1.02
6	20	1.4	28	23.664	0.359	0.366	1.83
6	20	1.6	32	25.298	0.335	0.343	2.49
6	20	1.8	36	26.833	0.314	0.325	3.47
6	20	2	40	28.284	0.295	0.309	4.82
8	20	1.2	24	21.909	0.284	0.287	1.06
8	20	1.4	28	23.664	0.262	0.267	1.82
8	20	1.6	32	25.298	0.244	0.250	2.62
8	20	1.8	36	26.833	0.229	0.237	3.40
8	20	2	40	28.284	0.216	0.225	4.28
10	20	1.2	24	21.909	0.223	0.225	0.81
10	20	1.4	28	23.664	0.206	0.209	1.37
10	20	1.6	32	25.298	0.192	0.196	2.03
10	20	1.8	36	26.833	0.181	0.185	2.29
10	20	2	40	28.284	0.169	0.176	4.17

**G.2 COMPROBACION EN ELECTRODOS CON DISPOSICION
RECTANGULAR CON VARILLAS EN EL PERIMETRO**

n	L1 (m)	L2/L1	L2	lv (m)	l (m)	L (m)	Rg(amt) (ohms)	Rg (ohms)	Error (%)
1	2	1.2	2.4	8	8	2.191	12.473	11.921	4.42
1	2	1.4	2.8	8	8	2.366	12.008	11.267	6.17
1	2	1.6	3.2	8	8	2.530	11.631	10.726	7.78
1	2	1.8	3.6	8	8	2.683	11.195	10.268	8.28
1	2	2	4	8	8	2.828	10.835	9.873	8.88
2	2	1.2	2.4	16	24	2.191	7.511	7.335	2.35
2	2	1.4	2.8	16	24	2.366	7.153	6.881	3.80
2	2	1.6	3.2	16	24	2.530	6.832	6.511	4.70
2	2	1.8	3.6	16	24	2.683	6.546	6.199	5.29
2	2	2	4	16	24	2.828	6.287	5.933	5.63
4	2	1.2	2.4	32	80	2.191	4.240	4.198	1.00
4	2	1.4	2.8	32	80	2.366	4.030	3.919	2.74
4	2	1.6	3.2	32	80	2.530	3.820	3.693	3.32
4	2	1.8	3.6	32	80	2.683	3.610	3.504	2.92
4	2	2	4	32	80	2.828	3.400	3.344	1.66
6	2	1.2	2.4	48	168	2.191	2.981	2.947	1.13
6	2	1.4	2.8	48	168	2.366	2.791	2.746	1.61
6	2	1.6	3.2	48	168	2.530	2.633	2.583	1.91
6	2	1.8	3.6	48	168	2.683	2.493	2.447	1.85
6	2	2	4	48	168	2.828	2.370	2.331	1.63
8	2	1.2	2.4	64	288	2.191	2.300	2.277	0.98
8	2	1.4	2.8	64	288	2.366	2.153	2.119	1.58
8	2	1.6	3.2	64	288	2.530	2.014	1.991	1.15
8	2	1.8	3.6	64	288	2.683	1.903	1.884	1.00
8	2	2	4	64	288	2.828	1.813	1.793	1.08
10	2	1.2	2.4	80	440	2.191	1.864	1.863	0.03
10	2	1.4	2.8	80	440	2.366	1.744	1.732	0.69
10	2	1.6	3.2	80	440	2.530	1.627	1.626	0.08
10	2	1.8	3.6	80	440	2.683	1.539	1.537	0.11
10	2	2	4	80	440	2.828	1.462	1.462	-0.03

n	L1 (m)	L2/L1	L2	lv (m)	l (m)	L (m)	Rg(amt) (ohms)	Rg (ohms)	Error (%)
1	10	1.2	12	8	40	10.954	4.669	4.782	-2.43
1	10	1.4	14	8	40	11.832	4.377	4.474	-2.21
1	10	1.6	16	8	40	12.649	4.148	4.222	-1.79
1	10	1.8	18	8	40	13.416	3.899	4.012	-2.89
1	10	2	20	8	40	14.142	3.702	3.832	-3.52
2	10	1.2	12	16	120	10.954	2.333	2.333	0.20
2	10	1.4	14	16	120	11.832	2.178	2.178	-0.02
2	10	1.6	16	16	120	12.649	2.042	2.052	-0.51
2	10	1.8	18	16	120	13.416	1.924	1.947	-1.21
2	10	2	20	16	120	14.142	1.820	1.856	-2.07
4	10	1.2	12	32	400	10.954	1.131	1.129	0.15
4	10	1.4	14	32	400	11.832	1.049	1.052	-0.30
4	10	1.6	16	32	400	12.649	0.980	0.990	-0.98
4	10	1.8	18	32	400	13.416	0.921	0.937	-1.79
4	10	2	20	32	400	14.142	0.870	0.893	-2.66
6	10	1.2	12	48	840	10.954	0.737	0.737	0.06
6	10	1.4	14	48	840	11.832	0.682	0.685	-0.50
6	10	1.6	16	48	840	12.649	0.638	0.644	-0.93
6	10	1.8	18	48	840	13.416	0.598	0.609	-1.92
6	10	2	20	48	840	14.142	0.564	0.580	-2.87
8	10	1.2	12	64	1440	10.954	0.544	0.545	-0.09
8	10	1.4	14	64	1440	11.832	0.503	0.506	-0.64
8	10	1.6	16	64	1440	12.649	0.469	0.475	-1.33
8	10	1.8	18	64	1440	13.416	0.440	0.449	-2.15
8	10	2	20	64	1440	14.142	0.415	0.428	-3.04
10	10	1.2	12	80	2200	10.954	0.431	0.431	0.01
10	10	1.4	14	80	2200	11.832	0.398	0.400	-0.60
10	10	1.6	16	80	2200	12.649	0.371	0.376	-1.25
10	10	1.8	18	80	2200	13.416	0.348	0.355	-2.03
10	10	2	20	80	2200	14.142	0.337	0.338	-0.19

n	L1 (m)	L2/L1	L2	lv (m)	l (m)	L (m)	Rg(amt) (ohms)	Rg (ohms)	Error (%)
1	20	1.2	24	8	80	21.909	2.700	2.700	0.01
1	20	1.4	28	8	80	23.664	2.517	2.523	-0.22
1	20	1.6	32	8	80	25.298	2.359	2.378	-0.82
1	20	1.8	36	8	80	26.833	2.230	2.258	-1.25
1	20	2	40	8	80	28.284	2.101	2.155	-2.58
2	20	1.2	24	16	240	21.909	1.290	1.283	0.51
2	20	1.4	28	16	240	23.664	1.197	1.197	-0.02
2	20	1.6	32	16	240	25.298	1.119	1.127	-0.74
2	20	1.8	36	16	240	26.833	1.051	1.069	-1.71
2	20	2	40	16	240	28.284	0.991	1.019	-2.65
4	20	1.2	24	32	800	21.909	0.602	0.606	-0.61
4	20	1.4	28	32	800	23.664	0.557	0.564	-1.27
4	20	1.6	32	32	800	25.298	0.520	0.530	-1.99
4	20	1.8	36	32	800	26.833	0.487	0.502	-3.13
4	20	2	40	32	800	28.284	0.460	0.478	-3.99
6	20	1.2	24	48	1680	21.909	0.386	0.389	-0.90
6	20	1.4	28	48	1680	23.664	0.357	0.362	-1.49
6	20	1.6	32	48	1680	25.298	0.333	0.340	-2.20
6	20	1.8	36	48	1680	26.833	0.312	0.322	-3.22
6	20	2	40	48	1680	28.284	0.294	0.307	-4.26
8	20	1.2	24	64	2880	21.909	0.283	0.285	-0.74
8	20	1.4	28	64	2880	23.664	0.261	0.265	-1.53
8	20	1.6	32	64	2880	25.298	0.243	0.249	-2.36
8	20	1.8	36	64	2880	26.833	0.228	0.235	-3.17
8	20	2	40	64	2880	28.284	0.215	0.224	-4.07
10	20	1.2	24	80	4400	21.909	0.222	0.224	-0.88
10	20	1.4	28	80	4400	23.664	0.205	0.208	-1.48
10	20	1.6	32	80	4400	25.298	0.191	0.195	-2.17
10	20	1.8	36	80	4400	26.833	0.180	0.184	-2.47
10	20	2	40	80	4400	28.284	0.169	0.175	-3.77

APENDICE H

**COMPROBACION DE LA ECUACION DE
ELECTRODOS RECTANGULARES EN FUNCION
DEL AREA Y DE LA LONGITUD DE
CONDUCTOR ENTERRADO**

n	L1 (m)	L2/L1	L2 (m)	A (m ²)	X (m)	Rg(amt) (ohms)	Rg (ohms)	Error (%)
1	2	1.2	2.4	4.8	8.8	19.573	19.967	2.01
1	2	1.4	2.8	5.6	9.6	18.280	18.658	2.07
1	2	1.6	3.2	6.4	10.4	17.175	17.567	2.28
1	2	1.8	3.6	7.2	11.2	16.215	16.639	2.61
1	2	2	4	8	12	15.372	15.837	3.02
2	2	1.2	2.4	19.2	26.4	10.027	10.030	0.03
2	2	1.4	2.8	22.4	28.8	9.339	9.360	0.22
2	2	1.6	3.2	25.6	31.2	8.751	8.807	0.64
2	2	1.8	3.6	28.8	33.6	8.247	8.340	1.13
2	2	2	4	32	36	7.806	7.940	1.71
4	2	1.2	2.4	76.8	88	5.050	5.037	-0.25
4	2	1.4	2.8	89.6	96	4.689	4.692	0.05
4	2	1.6	3.2	102.4	104	4.384	4.409	0.56
4	2	1.8	3.6	115.2	112	4.123	4.171	1.17
4	2	2	4	128	120	3.896	3.968	1.86
6	2	1.2	2.4	172.8	184.8	3.368	3.367	-0.04
6	2	1.4	2.8	201.6	201.6	3.106	3.132	0.83
6	2	1.6	3.2	230.4	218.4	2.915	2.940	0.86
6	2	1.8	3.6	259.2	235.2	2.740	2.780	1.46
6	2	2	4	288	252	2.587	2.643	2.18
8	2	1.2	2.4	307.2	316.8	2.524	2.529	0.21
8	2	1.4	2.8	358.4	345.6	2.337	2.351	0.59
8	2	1.6	3.2	409.6	374.4	2.181	2.206	1.13
8	2	1.8	3.6	460.8	403.2	2.048	2.084	1.77
8	2	2	4	512	432	1.934	1.981	2.43
10	2	1.2	2.4	480	484	2.017	2.026	0.46
10	2	1.4	2.8	560	528	1.867	1.882	0.80
10	2	1.6	3.2	640	572	1.741	1.765	1.36
10	2	1.8	3.6	720	616	1.635	1.667	1.95
10	2	2	4	800	660	1.543	1.584	2.64

BIBLIOGRAFIA

1. NAVARRETE Joffre. Evaluación del comportamiento de los electrodos de puesta a tierra mediante el uso del computador. Tesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1996.
2. AYORA Paul. Apuntes de Diseño en Alto Voltaje. Quito, 1995.
3. IÑIGUEZ Javier. Estudio del potencial de Acoplamiento entre electrodos de puesta a tierra cercanos. Tesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1997.
4. ANSI/IEEE. IEEE Guide for safety in AC Substation Grounding. Std 80-1986, Fourth Printing, 1992.
5. IEEE. Recommended Practice for Grounding of Industrial and Comercial Power Systems. Std 142, 1976.
6. CARGUAYTONGO Bolívar. Nuevo estudio de voltajes peligrosos en sistemas de puesta a tierra. Tesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1986.
7. SPIEGEL Murray. Estadística. McGraw Hill Co., USA, 1970.
8. TAGG G. F. Earth Resistancie, book, Pitman Publishing Corporations, New York, 1964

INDICE

Introducción	1
Capítulo 1	
Parámetros que influyen en el valor de la resistencia de puesta a tierra	4
1.1 Resistividad	5
1.2 Diámetro del conductor	5
1.3 Longitud	12
1.4 Número de celdas	17
1.5 Profundidad de entierro	22
1.6 Varillas en el perímetro	23
Capítulo 2	
Métodos de cálculo de resistencia de puesta a tierra	30
2.1 Norma 80 de la IEEE	30
2.2 Norma 142 de la IEEE	34
2.3 Método de los momentos	36
2.4 Método de Tagg	40
Capítulo 3	
Ecuación para el cálculo de la resistencia de electrodos formados por conductores en disposición cuadrangular	45
3.1 Puntos comunes entre las ecuaciones de la norma 142 de la IEEE	45
3.2 Electrodos cuadrados sin varillas	46
3.2.1 Electrodos cuadrados sin divisiones	47
3.2.1.1 Deducción de la ecuación por el método de los momentos	47
3.2.1.2 Deducción por el análisis de las ecuaciones de la norma 142	53

3.2.2	Electrodos cuadrados con divisiones	56
3.2.2.1	Correlación múltiple	56
3.2.2.2	Deducción de la ecuación para el cálculo de resistencia de electrodos cuadrados manteniendo constante el número de celdas "n"	58
3.2.2.3	Deducción de la ecuación para el cálculo de resistencia de electrodos cuadrados manteniendo constante la longitud de cada celda "L"	63
3.2.2.4	Establecimiento de una ecuación final por comparación de las dos ecuaciones deducidas en los subcapítulos anteriores	68
3.3	Cuadrados con varillas en el perímetro	69

Capítulo 4

	Ecuación para electrodos formados por conductores en disposición rectangular	73
4.1	Utilización de la ecuación de electrodos cuadrados	74
4.2	Ecuación dependiente de la longitud de conductor enterrado y del área cubierta por el electrodo	74

Capítulo 5

	Conclusiones y Recomendaciones	
5.1	Conclusiones	77
5.2	Recomendaciones	79

Anexos

A.	Resistividad de algunos tipos de suelos ...	81
B.	Ecuación para el cálculo de la sección del conductor	82
C.	Ecuaciones para el cálculo de resistencias de puesta a tierra	83

Apéndices

A.	Valores de resistencia obtenidos de la simulación de electrodos cuadrados en el programa AMT	85
A.1	Resistencia de electrodos con disposición cuadrangular sin varillas en el perímetro	85
A.2	Resistencia de electrodos con disposición cuadrangular con varillas en el perímetro	93
B.	Comprobación de métodos de cálculo de resistencia de puesta a tierra	101
C.	Comprobación de la ecuación de electrodos cuadrados sin varillas deducida con "n" constante	106
D.	Comprobación de la ecuación de electrodos cuadrados sin varillas	110
E.	Comprobación de la ecuación de electrodos cuadrados con varillas	116
F.	Valores de resistencia obtenidos de la simulación de electrodos rectangulares en el programa AMT	121
F.1	Resistencia de electrodos con disposición rectangular sin varillas en el perímetro	121
F.2	Resistencia de electrodos con disposición rectangular con varillas en el perímetro	124
G.	Comprobación de la ecuación de electrodos cuadrados modificada para su utilización en electrodos rectangulares	127
G.1	Comprobación en electrodos con disposición rectangular sin varillas en el perímetro	127
G.2	Comprobación en electrodos con disposición rectangular con varillas en el perímetro	131

H. Comprobación de la ecuación de electrodos rectangulares en función del área y de la longitud de conductor enterrado	135
Bibliografía	137
Indice	138

FE DE ERRATA

- 1.- En la página 31, tercer párrafo, la última oración debe decir:

Se observa que el error máximo que se tiene es de un 64.18%, pero esto en el caso excepcional de $n=1$. Para el resto de casos, el error no pasa del 7%.

- 2.- En la página 32, segundo párrafo, la segunda oración debe decir:

Se puede ver que esta ecuación tiene errores aceptables, que no pasan del 5%, excepto el caso de $n=1$ en el que es del 37.19%, pero para el caso de diseño de puestas a tierra de subestaciones el problema no es grave, ya que...

- 3.- En la página 34, el tercer párrafo debe decir:

Los resultados de la evaluación de este método pueden observarse en la tabla B.3. El método tiene mucha validez, ya que los errores no pasan del 7.5%. En resistencias cercanas a 1 ohmio el error está alrededor del 2.5%. Una desventaja de este método es que, para utilizarlo, se necesitan tener disponibles mínimo tres ecuaciones que son necesarias para poder luego ser utilizados los resultados en la ecuación final.

- 4.- En la página 77, el cuarto párrafo en su última línea debe decir:

Su error no pasa del 7.5%, y en resistencias de alrededor de 1 ohmio el error es de 2.5% aproximadamente.

- 5.- En las páginas 102 y 103, los cuadros B.1, B.2 y B.3 deben decir respectivamente:

B.1 ECUACION SIMPLIFICADA (ecu. 2)

n	L (m)	L' (m)	A (m ²)	Rg (ohms)	Rg (amt) (ohms)	Error (%)
1	2	8	4	34.656	21.108	64.18
4	20	800	6400	0.679	0.664	2.24
6	8	672	2304	1.072	1.011	6.03
8	14	2016	12544	0.445	0.437	1.89
10	10	2200	10000	0.489	0.476	2.64
12	4	1248	2304	1.003	0.948	5.83
14	12	5040	28224	0.284	0.280	1.29
16	6	3264	9216	0.492	0.477	3.19
18	16	10944	82944	0.163	0.163	-0.00
20	18	15120	129600	0.130	0.129	0.54

B.2 ECUACION DE SVERAK (ecu. 3)

n	L (m)	L1 (m)	A (m ²)	Rg (ohms)	Rg amt (ohms)	Error (%)
1	2	8	4	28.959	21.108	37.19
4	20	800	6400	0.676	0.664	1.87
6	8	672	2304	1.060	1.011	4.82
8	14	2016	12544	0.445	0.437	1.83
10	10	2200	10000	0.488	0.476	2.47
12	4	1248	2304	0.991	0.948	4.55
14	12	5040	28224	0.284	0.280	1.53
16	6	3264	9216	0.491	0.477	2.97
18	16	10944	82944	0.164	0.163	0.72
20	18	15120	129600	0.130	0.129	1.13

B.3 ECUACION DE SCHWARZ (ecu. 4)

n	L (m)	L' (m)	A (m ²)	NV	R1 (ohms)	R2 (ohms)	R12 (ohms)	Rg (ohms)	Rgamt (ohms)	Error (%)
1	2	8	4	4	20.500	12.273	11.855	12.254	12.988	-5.65
1	20	80	400	4	3.094	12.247	2.102	3.005	2.917	3.02
2	10	120	400	8	2.780	6.127	2.119	2.686	2.528	6.26
8	14	2016	12544	32	0.428	1.532	0.369	0.427	0.433	-1.48
10	10	2200	10000	40	0.460	1.226	0.424	0.458	0.47	-2.47
12	4	1248	2304	48	0.914	1.024	0.850	0.897	0.919	-2.43
14	12	5040	28224	56	0.264	0.876	0.248	0.264	0.276	-5.14
16	6	3264	9216	64	0.448	0.767	0.424	0.447	0.47	-4.93
18	16	10944	82944	72	0.151	0.681	0.143	0.151	0.162	-7.07
20	18	15120	129600	80	0.119	0.613	0.114	0.119	0.129	-7.48