

Las redes de tierra de grandes estaciones eléctricas

por el Ing. Alfredo Rifaldi *

Un particular agradecimiento al Ing. B. L. Colombo que me enseñó a meditar sobre estos temas.

INTRODUCCION

El examen de las distintas consideraciones que se deben hacer en el proyecto y realización de redes de tierra de estaciones eléctricas, exige proponer algunos modelos que juzgados interesantes se presentan en este trabajo.

Las redes estudiadas pertenecen a las estaciones de Futaleufú y Puerto Madryn, de todos modos la referencia a estos casos particulares sólo sirve como ejemplo de los criterios generales que se pretenden exponer.

GENERALIDADES

La finalidad de la red de tierra de una estación es limitar las tensiones de paso y de contacto tanto en el área interna como en el contorno.

A la red de tierra se conectan todos los equipos y estructuras de la estación, esto condiciona notablemente el diseño de la red ya que supone muchos vínculos geométricos.

La red se realiza en general con conductores paralelos tendidos en direcciones ortogonales y con un paso asignado.

Para lograr con economía valores satisfactorios de las tensiones de paso y de contacto dentro del área debe elegirse adecuadamente la distancia entre conductores paralelos.

Haciendo el mallado más denso (en el límite una placa metálica) disminuyen las tensiones internas hasta anularse.

Lógicamente el mallado más denso implica mayor cantidad de material para realizar la red y consecuentemente mayor costo.

En el perímetro de la red se controlan las tensiones de paso profundizando la malla, haciendo anillos perimetrales a mayor profundidad, o hincando jabalinas en profundidad y uniéndolas con cable aislado a la red.

Deben evitarse los diseños de red en los cuales ésta pueda tener un apéndice. En lo posible la red debe

tener siempre forma de polígono convexo, para impedir que en algún lugar de su periferia se presenten tensiones de paso sensiblemente mayores del promedio, y que puedan presentar peligro.

La figura 1 muestra como ejemplo la red de tierra proyectada de acuerdo a estos criterios para el caso particular de la estación eléctrica de Futaleufú.

PARAMETROS PRINCIPALES DE LA RED

La tensión total que la red asume respecto de puntos de la tierra suficientemente alejados cuando dreña una corriente dada depende de la resistencia equivalente de tierra de la red.

El estudio de modelos ha conducido a sencillas fórmulas que permiten evaluar la resistencia total de la red y otros parámetros significativos, tales como tensión de malla, tensión de contacto, tensión de paso y tensión en la diagonal.

Estos valores se determinan en base a características geométricas de la red y características eléctricas del terreno.

Las características geométricas están ligadas al diseño general de la estación y particularmente a los módulos de los campos, a la distancia entre fases, y al tamaño de la estación.

La longitud de cable enterrado incluye parte de los cables de conexión a equipos que por estar tendidos en el terreno deben considerarse dispersores.

La resistividad del terreno es variable de un punto a otro, y depende también de la profundidad.

La medición de resistividad debe hacerse con un método que permita su determinación a distintas profundidades, el método de las cuatro jabalinas permite obtener éstos resultados.

Haciendo el promedio de los valores medidos en distintos puntos y calculando su dispersión media cuadrática se obtienen valores de resistividad equivalentes y sus máximos y mínimos que se introducen en los cálculos.

La figura 2 muestra para el caso particular de las estaciones en examen los valores de resistividad media en función de la profundidad y la dispersión correspondiente obtenidos en base a mediciones realizadas en el terreno.

* Profesor de Instalaciones Eléctricas - Facultad Regional Avellaneda - U.T.N.

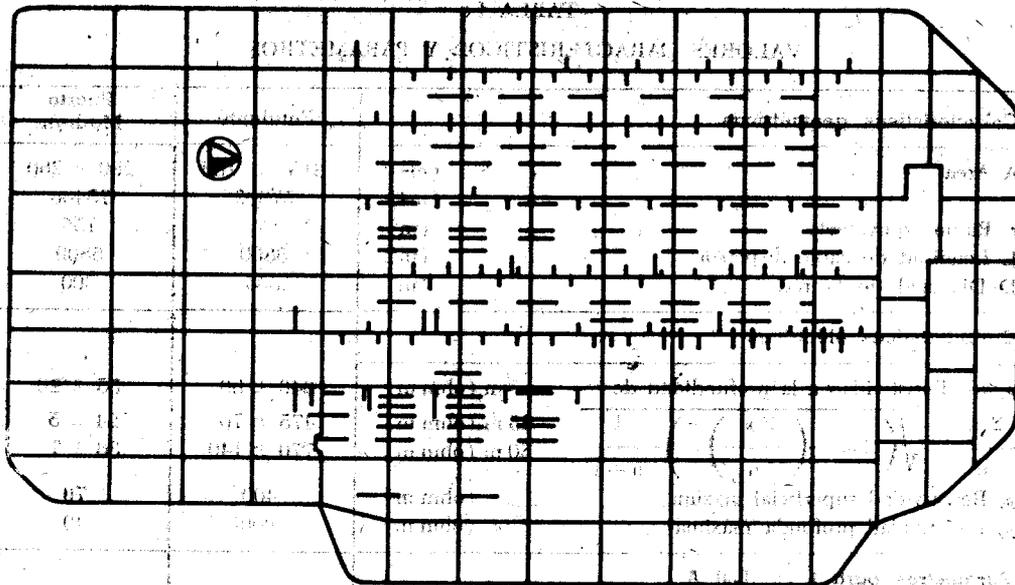


Fig. 1 ESTACION FUTALEUFU
Ejemplo de red de tierra

Para una corriente drenada unitaria se determinan las tensiones características de la red, y luego por proporción se obtienen las que efectivamente se presentarán con la corriente de falla efectivamente drenada por la red.

De la bibliografía se han extractado algunas fórmulas que permiten evaluar las tensiones características de la red, y su resistencia.

Tensión de paso (para 1 m) (Bibl. 2).

$$V_p = (0,1 \text{ a } 0,15) \rho_s i$$

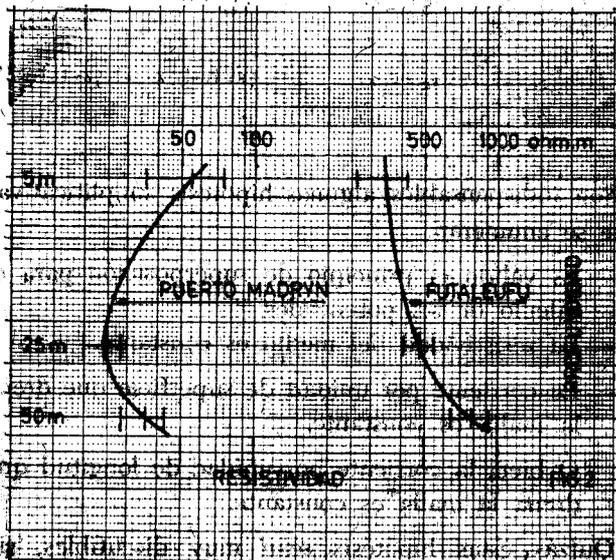


Fig. 2

Resistividad media en función de la profundidad.

Tensión de contacto (para 1 m) (Bibl. 2).

$V_c = (0,6 \text{ a } 0,8) \rho_s i$
Tensión entre la red y el centro de la malla (Bibl. 2).

$V_m = \rho_s i$
Gradiente en la periferia (Bibl. 3).

$$G_p = 4 \rho_s I/D^2$$

Resistencia de la malla (Bibl. 2).

$$R = \rho_p/4r + \rho_p/L$$

Donde:

- ρ_s : resistividad superficial en ohm m.
- ρ_p : resistividad en profundidad en ohm m.
- $i = I/L$: corriente media drenada por unidad de longitud de la malla.
- I : corriente que drena la malla en A.
- D : diagonal de la malla en m.
- L : longitud del conductor enterrado en m.
- $r = \sqrt{A/\pi}$: radio equivalente de la malla en m.
- A : área que cubre la malla en m².

En alguna bibliografía se encuentran fórmulas distintas a las aquí propuestas, pero que conducen a resultados equivalentes, dentro de las aproximaciones aceptadas para estos cálculos.

En la tabla I se indican los valores característicos de la red y los parámetros calculados para las dos estaciones en examen en el caso particular que cada una de las redes drenara una corriente de 1.000 A.

TABLA I
VALORES CARACTERISTICOS Y PARAMETROS

Características geométricas		Futaleufú	Puerto Madryn
A Area	(m ²)	313 × 183	290 × 280
r Radio equivalente	(m)	57300	75400
L Longitud de cable dispersor	(m)	135	155
D Diagonal de la red	(m)	6800	5800
	(m)	334	300
Características eléctricas			
$\rho \pm \sigma$ Resistividad a la profundidad de	5 m (ohm m)	340 ± 80	55 ± 20
	25 m (ohm m)	475 ± 70	24 ± 5
	50 m (ohm m)	770 ± 140	36 ± 7
ρ_s Resistividad superficial máxima	(ohm m)	400	70
ρ_p Resistividad profunda máxima	(ohm m)	900	40
Parámetros para I = 1000 A			
V _c Tensión de contacto	(V)	35-47	7-10
V _p Tensión de paso	(V)	6-9	1-2
V _m Tensión al centro de una malla	(V)	59	12
G _p Gradiente en la periferia	(V/m)	14	3
R Resistencia de la malla	(ohm)	1,8	0,07

LAS TENSIONES DE PASO Y DE CONTACTO

Un análisis más preciso y riguroso puede hacerse con un modelo de la red, estudiado con métodos analógicos o numéricos.

El campo equipotencial y las líneas de corriente que se forman cuando un dispersor drena corriente a tierra pueden ser determinados.

Con una cuba electrolítica de tamaño suficiente que aloje una hemisfera equipotencial, que representa la equipotencial suficientemente alejada de la red —5 veces su dimensión mayor— y un modelo a escala de la red colocado en el centro de la cuba, a cierta profundidad, en escala, de la superficie del líquido se tiene un modelo aceptable de la red.

En este modelo se determinan las curvas equipotenciales en la superficie, y conocida la tensión total que la red asume respecto del punto infinitamente alejado se determinan los potenciales correspondientes a cada curva.

La solución numérica del problema puede ser enfocada con el método que a continuación se sugiere.

La tabla II da las fórmulas que permiten calcular el potencial en la superficie del terreno debido a dispersores de forma simple, jabalinas, conductores horizontales enterrados (Bibl. 7).

Un dispersor compuesto está formado por varios dispersores simples, y como el campo en estudio es potencial, el potencial en un punto puede hallarse como suma del potencial en dicho punto debido a cada uno de los dispersores.

TABLA II

POTENCIAL EN UN PUNTO PRODUCIDO POR UN DISPERSOR

$V_1 = \frac{I_p \rho}{4\pi r}$

$V_2 = V_1 \times 2$

$V_3 = V_1 \times 2 \quad ; r = \sqrt{h^2 + x^2}$

$V_4 = \frac{I_p \rho}{8\pi l} \ln \frac{x+l + \sqrt{y^2 + (x+l)^2}}{x-l + \sqrt{y^2 + (x-l)^2}}$

$V_5 = V_4 \times 2 \quad ; y = \sqrt{h^2 + z^2}$

$V_6 = V_4 \times 2 \quad ; x = h+l ; x-l = h ; x+l = h+2l$

Son indispensables algunas hipótesis simplificativas que se enumeran.

- Es válido el principio de superposición para el cálculo de los potenciales.
- La resistividad del medio es constante.
- La corriente por unidad de superficie que drena la malla es constante.
- O bien, la corriente por unidad de longitud que drena la malla es constante.

Quizás estas hipótesis sean muy discutibles, sin embargo la incertidumbre de los datos convierte la discusión en bizantina por lo que deberá primar en

cada caso, al adoptar las hipótesis, el buen criterio del proyectista.

La resistencia total de la red, o el potencial que asume, se puede determinar calculando el potencial en un punto del terreno en contacto con el conductor de la red de tierra o bien eligiendo un punto central de la red cuando ésta es grande.

Quien utilizara estos criterios e hiciera los cálculos variando estos puntos, o variando la descripción de la red (dividiendo por ejemplo los dispersores en partes) obtendría resultados distintos que son atribuibles a las fórmulas aproximadas propuestas.

Si se dispone de un medio de cálculo suficientemente poderoso puede realizarse un programa que determine las líneas equipotenciales.

Del análisis de estas líneas surgirá cuáles son las áreas en las cuales se pueden presentar las mayores tensiones de paso y de contacto.

Los resultados obtenidos mostrarán la necesidad de verificar más puntos, o de obtener resultados con mayor densidad de las líneas estudiadas.

CONSIDERACIONES SOBRE LA CORRIENTE DRENADA POR LA RED DE TIERRA DE UNA ESTACION

Cuando se produce una falla monofásica a tierra en una línea, la corriente es inyectada en la tierra por la red de tierra de la estación en la cual se encuentra conectado a tierra el neutro del sistema.

En cambio si la falla es en la estación en la cual se encuentra conectado a tierra el neutro del sistema la red de tierra no drena corriente de falla.

Interesa por lo tanto el caso en el cual la falla se produce en la línea en un punto lo bastante próximo a la estación para que la corriente de falla sea elevada, y lo bastante alejado para que la corriente drenada a tierra sea importante.

El modelo que muestra la figura 3 es válido para líneas que no tienen cable de retorno (cable de guardia tratándose de líneas aéreas).

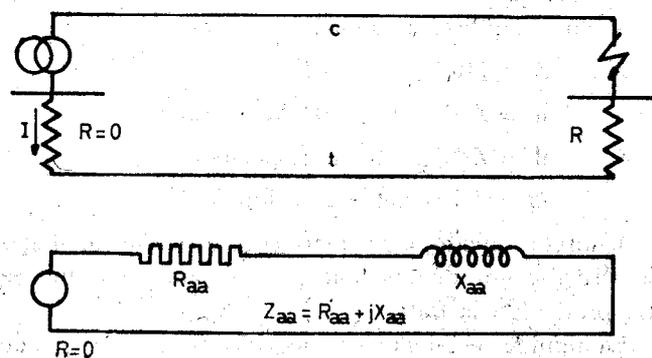


Fig. 3
Línea sin cable de retorno.

Cuando existe cable de retorno, que se encuentra conectado en paralelo a la tierra, la corriente se distribuye entre este cable y la tierra en relación inversa a sus impedancias.

Para el caso de líneas aéreas con cable de guardia el modelo mostrado en la figura 4 es excesivamente simplista, en rigor los soportes de la línea son muchos, y en cada uno de ellos el cable de guardia se encuentra conectado a tierra.

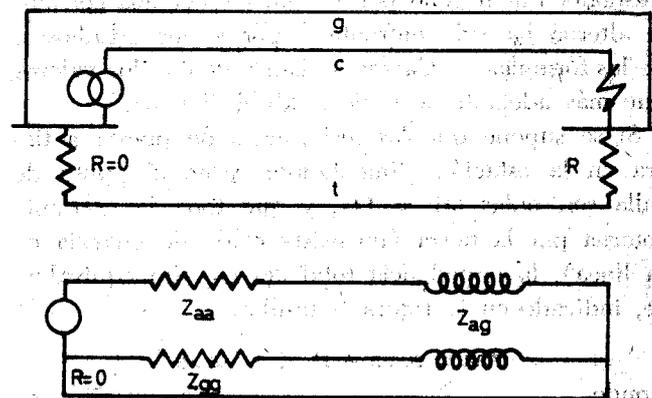


Fig. 4
Línea con cable de retorno.

La corriente se distribuye entre cable de guardia y terreno y el modelo resulta más complicado tal como muestra la figura 5.

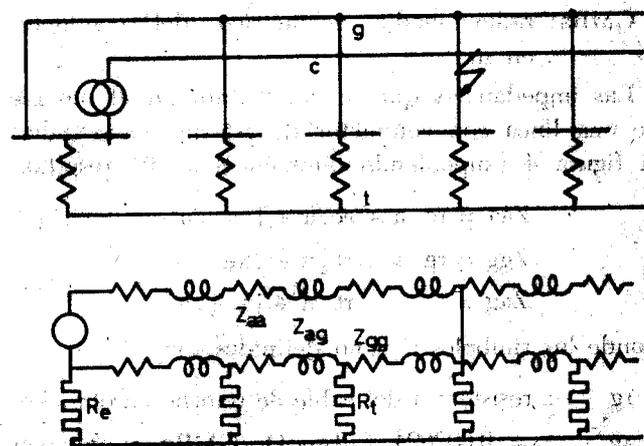


Fig. 5
Línea con cable de guardia puesto a tierra en todas las torres.

La corriente es drenada en parte por la red de tierra de la estación, y en parte por el cable de guardia de la línea en la cual se ha producido la falla, a medida que aumenta la distancia a la estación la corriente en el cable de guardia disminuye alcanzando un valor mínimo y luego aumenta hasta un máximo que se tiene en la inmediata proximidad de la falla (Bibl. 1).

Es importante destacar el hecho de que la red de tierra de la estación drena sólo una parte de la corriente total de falla y en consecuencia es necesario dimensionarla sólo para ésta.

Los cables de guardia de las líneas no afectadas por la falla, y que convergen a la estación también drenan una parte de la corriente, y deben considerarse como impedancias en paralelo a la resistencia de puesta a tierra de la estación.

El problema de evaluar los parámetros que corresponden al terreno por el cual circula una corriente alterna ha sido enfrentado por varios estudiosos; de las fórmulas de Carson se han obtenido los valores que más adelante se indican (Bibl. 5 y 6).

Si se supone que las resistencias de puesta a tierra en la estación alimentadora, y en el punto de falla son nulas ($R = 0$), y que toda la corriente retorna por la tierra (no existe cable de guardia en la línea), la impedancia total del circuito equivalente, indicado en la figura 3 resulta:

$$Z_{aa} = r_c \cdot a + r_t \cdot a + jx_a \cdot a$$

donde

Z_{aa} : impedancia total en ohm.

a : longitud en km.

r_c : resistencia del cable en ohm/km.

$r_t = 0,0009882 f$ en ohm/km.

f : frecuencia en Hz.

$x_a = 0,002894 \cdot f \cdot \lg_{10} De/GMRa$ en ohm/km.

$De = 658,8 \sqrt{\rho/F}$ en m.

$GMRa$: radio medio geométrico del conductor en m.

Las impedancias que se encuentran en el modelo de una línea con conductor de retorno como indica la figura 4 (suponiendo también $R = 0$) resultan:

$$Z_{aa} = r_c \cdot a + r_t \cdot a + jx_a \cdot a$$

$$Z_{gg} = r_g \cdot a + r_t \cdot a + jx_g \cdot a$$

$$Z_{ag} = r_t \cdot a + jx_{ag} \cdot a$$

donde los símbolos aún no definidos son:

r_g : resistencia del cable de retorno en ohm/km.

$x_g = 0,002894 \cdot f \cdot \lg_{10} De/GMRg$ en ohm/km.

$x_{ag} = 0,002894 \cdot f \cdot \lg_{10} De/dag$ en ohm/km.

dag : distancia entre conductor a y retorno g en m.

$GMRg$: radio medio geométrico del cable de retorno en m.

Estas fórmulas permiten construir un modelo en el cual se supone que la corriente en el terreno circula por un conductor equivalente a la profundidad De .

En la proximidad de las estaciones en cambio, la corriente circula más bien por la superficie del terreno, entonces se puede suponer que la conductividad

del terreno es grande y son válidos los siguientes parámetros:

$$r_t = 0$$

$De = H$ altura del conductor de retorno en m.

Con estos modelos del circuito es posible construir un elemento de seis terminales (hexapolo) que representa un vano de la línea, y que incluye la resistencia de puesta a tierra de una torre de la línea.

Una línea se representa con una cadena de hexapolos como descriptos, en sus extremos se conectan resistencias correspondientes a las tierras de las estaciones terminales y las impedancias equivalentes de las líneas dispersoras pasivas (Bibl. 1).

La hipótesis de suponer que todos los hexapolos que constituyen el circuito equivalente de la línea son iguales, es aceptable porque generalmente los valores de los vanos y los valores de la resistencia de puesta a tierra de las torres no difieren mucho entre sí.

Una línea que actúa como dispersora ofrece una impedancia de (Apéndice II):

$$Z_l = Z_{gg}/2 + \sqrt{Z_{gg} R_t + Z_{gg}^2/4}$$

donde:

R_t : Resistencia de puesta a tierra de la torre en ohm.

Para la línea en la cual se ha producido la falla se puede determinar la siguiente impedancia equivalente que permite calcular la corriente que entra por el cable de guardia (Apéndice I):

$$Z_{lf} = V/I_{g1}$$

$$V \cdot F = I_{g1} Z_{gg} - I_l Z_{ag}$$

$$I_l = V/Z_p + I_{g1}$$

$$V \cdot (F + Z_{ag}/Z_p) = I_{g1} (Z_{gg} - Z_{ag})$$

donde:

Z_p : es la impedancia de la red de tierra de la estación en paralelo con las líneas dispersoras.

$$F = 1 - \exp(-\gamma)$$

$$\gamma = \sqrt{Z_{gg}/R_t}$$

La distribución de la corriente entre red de tierra de la estación, líneas pasivas dispersoras, y líneas en falla se determina calculando la impedancia equivalente del paralelo de las distintas componentes (el símbolo // indica paralelo de elementos).

$$Z = (R_e // Z_l // Z_{lf})$$

$$i_r = Z/R_e \quad (\text{red de la estación})$$

$$i_l = Z/Z_l \quad (\text{línea dispersora})$$

$$i_g = Z/Z_{lf} \quad (\text{línea en falla})$$

También puede calcularse con fórmulas análogas la distribución de corriente en el punto en que se ha producido la falla.

La mínima corriente en el cable de guardia puede calcularse con la relación:

$$i_{g \text{ min.}} = Z_{ag}/Z_{gg}$$

TABLA III-A. — PARAMETROS DE LAS LINEAS

1	2	Valores según fórmulas de Carson			Valores para la zona próxima a la Estación		
		3	4	5	6	7	8
f	Hz	50	50	50	50	50	50
ρ	ohm m	700	30	30	700	30	30
ϕg^1	mm	9,05	9,05	4,50	9,05	9,05	4,50 ¹
rg^2	ohm/km	0,282	0,282	2,99	0,282	0,282	2,99 ²
dg	m	14,0	12,5	—	14,0	12,5	—
dag	m	14,9	14,0	7,0	14,9	14,0	7,0
H	m	20,0	20,0	15,0	20,0	20,0	15,0
Rt	ohm	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
a	km	0,330	0,450	0,260	0,330	0,450	0,260
Z _{gg}	ohm	0,0628 0,1338	0,0657 0,2076	0,7902 0,1906	0,0465 0,0837	0,0635 0,1157	0,7774 0,1328
Z _{ag}	ohm	0,0163 0,1062	0,0222 0,1020	0,0128 0,0703	0,0000 0,0061	0,0000 0,0101	0,0000 0,0125
Z _e	ohm	1,1641 0,9058	1,2876 0,9413	3,2533 0,4419	0,8666 0,5393	1,0203 0,6449	3,2136 0,3106
F	—	0,1101 0,0723	0,1202 0,0735	0,2470 0,0254	0,0620 0,0456	0,0957 0,0530	0,2443 0,0179
Z _{ag} /Z _{gg}	—	0,5445 0,0974	0,4576 0,0818	0,0856 0,0804	0,0557 0,0309	0,0671 0,0368	0,0027 0,0156
F/Z _{gg}	—	0,5355 — 0,4160	0,5067 — 0,3693	0,3027 — 0,0409	0,8322 — 0,5173	0,7009 — 0,4425	0,3092 — 0,0298

Para los valores complejos se muestra parte real arriba (R) parte imaginaria abajo (I).

¹ Para el cable de guardia se considera: Con un solo cable $GMRg = 0,5 \phi g$
Con dos cables $GMRg = \sqrt{0,5 \phi g \cdot dg}$

² El valor corresponde a un cable de guardia.

³ Todos los valores corresponden a $f = 50$ Hz.

Resolviendo el circuito equivalente completo puede estudiarse cómo varía la corriente a lo largo del cable de guardia.

La tabla III-A muestra los valores de los parámetros de las líneas calculados con las fórmulas de Carson, y con las fórmulas válidas para la proximidad de la estación, para los datos típicos correspondientes a las cercanías de Futaleufú y Puerto Madryn.

La tabla III-B muestra, para los valores correspondientes a las columnas 4 y 7 de la tabla III-A, la influencia en la variación de cada uno de los parámetros, por variación del dato que en cada caso se detalla.

En esta forma puede apreciarse la influencia que en los resultados pueden tener las variaciones de datos y ponderar la importancia de obtener mejores datos.

La figura 6 muestra el esquema unifilar del sistema que se examina y las corrientes de falla monofásicas adoptadas en las estaciones para el cálculo.

La tabla IV-A muestra la distribución de corriente que corresponde al caso particular de la estación Futaleufú cuando se produce la falla que implica el mayor valor de corriente.

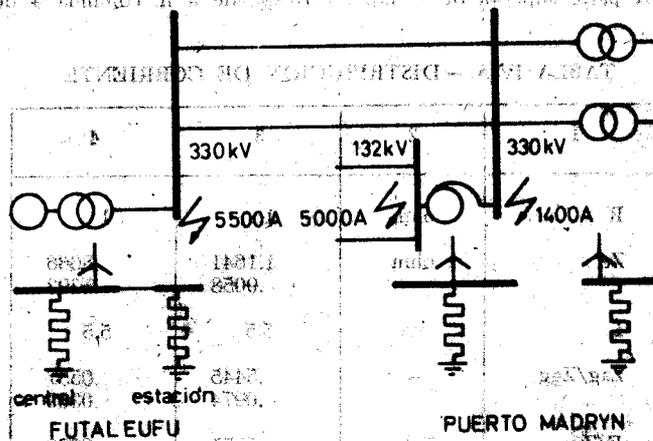


Fig. 6
Esquema unifilar de la red.

Como la red de la estación Futaleufú está conectada metálicamente con la red de tierra de la central se ha supuesto que la resistencia que equivale a ambas redes en conjunto es 1 ohm.

La estación tiene una línea dispersora sin falla (pasiva) y una línea en la que se ha producido la falla (activa).

TABLA III-B. - INFLUENCIA DE VARIACIONES DE LOS PARAMETROS

	ρ	GMRg	rg	dg	dag	H	Rt	α
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Zgg	0 1,3	0 -1,3	15 0	0 -1,3	0 0	0 0	0 0	20 20
Zag	0 2,5	0 0	0 0	0 0	0 -5,1	0 0	0 0	20 20
Ze	0,4 0,9	-0,4 -0,9	3,3 -2,4	-0,4 -0,9	0 0	0 0	9,2 8,4	9,9 10
F	0,3 0,8	-0,4 -0,8	2,4 -3,1	-0,4 -0,8	0 0	0 0	-8,4 -7,8	9,1 8,2
Zag/Zgg	1,3 1,6	1,0 3,7	-3,3 28	1,0 3,7	-4,1 -11	0 0	0 0	-0,1 -0,3
F/Zgg	0,8 -0,6	0,8 0,2	0,8 -5,0	0,8 0,2	0 0	0 0	-8,0 -8,6	-9,6 -8,8
Zgg	0 0	0 -2,2	20 0	0 -2,2	0 0	0 4,5	0 0	20 20
Zag	0 0	0 0	0 0	0 0	0 -52	0 52	0 0	0 20
Ze	0 0	-0,6 -1,7	5,3 -4,1	-0,6 -1,7	0 0	1,1 3,4	9,3 8,6	9,9 11
F	0 0	-0,6 -1,5	4,3 -5,1	-0,6 -1,5	0 0	1,2 3,2	-8,5 -7,9	9,2 8,5
Zag/Zgg	0 0	1,2 3,5	-9,2 9,0	1,2 3,5	-52 -52	48 42	0 0	-0,2 -0,3
F/Zgg	0 0	1,2 -0,1	-0,2 -9,0	1,2 -0,1	0 0	-2,4 -0,3	-8,2 -8,7	-9,4 -8,7

Valores en % para una variación del 20 % del parámetro que encabeza la columna.
La parte superior de la tabla corresponde a la columna 4 de la tabla III-A, la parte inferior a la columna 7.

TABLA IV-A. - DISTRIBUCION DE CORRIENTE

1	2	3	4
R	ohm	1	1
Ze	ohm	1.1641 .9058	3666 5393
I	kA	5.5	5.5
Zag/Zgg	-	.5445 .0974	.0557 .0309
F/Zgg	% km	.5355 .416	.8322 .5173
Ired	kA %	1.148 20.8	1.818 33.1
Ipasiva	kA %	.778 14.1	1.781 32.4
Iactiva	kA %	3.688 67.0	2.057 37.4

Para los valores complejos se muestra parte real arriba, parte imaginaria abajo.
Los datos corresponden a las columnas 3 y 6 de la tabla III-A.

La falla se ha supuesto a suficiente distancia de la estación como para que la corriente que drena la red sea máxima, y lo bastante cerca como para que la longitud de la línea no influya disminuyendo el valor de la corriente.

La tabla IV-B muestra la influencia en los resultados cuando cada parámetro varía en cierto porcentaje.

Los resultados obtenidos llaman a la reflexión acerca de la gran importancia relativa que tienen las líneas en particular cuando la resistencia de puesta a tierra de la estación es mayor.

Los cables de guardia de las líneas colaboran en forma importante en la dispersión de la corriente de tierra y considerando su influencia se justifica un dimensionamiento más ajustado de la red.

Por otra parte la corriente que circula por los cables de guardia en estas condiciones obliga a una cuidadosa verificación de su capacidad de transporte cuando el valor en juego es elevado.

TABLA IV-B. — INFLUENCIA DE VARIACIONES DE LOS PARAMETROS

1	R	Re	Xe	Zag/Zgg		F/Zgg		Referencia
				Real	Imag	Real	Imag	
2	3	4	5	6	7	8	9	
Ired	1,027	1,180	1,183	.887	1,159	1,099	1,132	1,148
Ipasiva	0,836	0,709	0,743	0,602	0,786	0,745	0,767	0,778
Iactiva	3,748	3,691	3,713	4,112	3,681	3,768	3,705	3,686
Ired	- 11	+ 3	+ 3	- 23	+ 1	- 4	- 1	0
Ipasiva	+ 7	- 9	- 5	- 23	+ 1	- 4	- 2	0
Iactiva	+ 2	+ 0.1	+ 1	+ 12	- 0.1	+ 2	+ 1	0

Valores en kA en la parte superior, y variaciones en % en la parte inferior para variaciones del 20 % del parámetro que encabeza la columna.
 Los datos de referencia corresponden a la columna 3 de la tabla IV-A y se han repetido en la columna 9.

El método propuesto permite también evaluar la corriente drenada por cada uno de los soportes en cada condición de falla y encontrar valores que permiten proyectar adecuadamente la puesta a tierra de cada soporte de la línea, verificando que no se presenten situaciones de peligro.

CASO EN QUE VARIAS LINEAS APORTAN CORRIENTE DE FALLA

En el punto anterior se ha examinado el caso en el cual una única línea drena (o aporta) corriente de falla.

Cuando se trata de una estación en la cual varias líneas aportan corriente de falla, y en la estación no se tienen generadores, y en consecuencia no se "generan" corrientes de falla, la máxima corriente total de falla, que afecta la red de tierra como dispersora, se tiene para falla en las barras de la estación.

En estas condiciones los cables de guardia de las líneas que aportan corrientes de falla drenan una parte del aporte de la línea correspondiente, el resto debe ser drenado por los cables de guardia que las líneas pasivas, y por la red de tierra de la estación.

El planteo del problema es similar al caso ya examinado para una sola línea.

La corriente drenada por el cable de guardia de cada línea es

$$I_{gi} = V \cdot F / Z_{gg} + I_i Z_{ag} / Z_{gg}$$

ya que

$$V \cdot F = I_{gi} Z_{gg} - I_i \cdot Z_{ag}$$

Siendo

I_{gi} : corriente drenada por el cable de guardia.

$I_i = 3 I_o$ corriente aportada por la línea.

I_o : corriente homopolar.

V : tensión total que asume la red de tierra.

Para el nodo formado por la estación se tiene

$$I_1 + I_2 + \dots + I_n = V / Z_p + I_{g1} + I_{g2} + \dots + I_{gn}$$

Siendo

$Z_p = R // Z_{ld}$ impedancia equivalente red de tierra, líneas dispersoras.

Resolviendo el sistema de ecuaciones así formado se determinan las corrientes drenadas por los cables de guardia, y la tensión que asume la red, y en consecuencia la corriente drenada por la red.

$$I_r = V / R$$

DISTRIBUCION DE CORRIENTE ENTRE DOS REDES DE TIERRA

El caso de dos redes de tierra unidas entre sí metálicamente se presenta con frecuencia.

Dos redes de tierra próximas interactúan, y la resistencia del conjunto no es igual al paralelo de las resistencias de cada red.

En este caso existe una cierta resistencia "mutua" que puede evaluarse.

La evaluación de la resistencia de cada red y del conjunto se logra con el estudio del campo equipotencial.

Evaluadas las resistencias se conoce el circuito que permite determinar la corriente drenada por cada red. Cuando la falla a tierra se produce en la red más alejada de la fuente, una red asume respecto de la otra un potencial que trataremos de determinar.

Examinaremos el caso particular de Futileufú ya citado antes y para el cual las redes de tierra de Central y Estación se encuentran unidas por un "cable de tierra" (barra supuesta aislada) y por los cables de guardia de las líneas.

La corriente de falla se divide entre la tierra, el cable de tierra, y los cables de guardia.

La figura 7 muestra los componentes que forman el sistema:

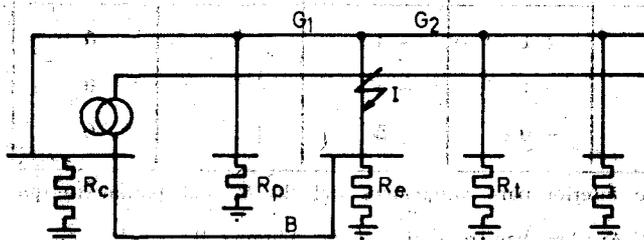


Fig. 7
Componentes de la red.

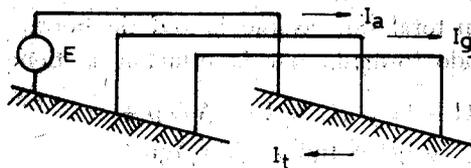


Fig. 8
Modelo simplificado de la red.

Escribiendo explícitamente los parámetros en forma compleja:

$$Z_{aa} = r_{ca} + jx_{ca} = R_c + jX_a$$

$$Z_{ab} = r_{ab} + jx_{ab} = R_t + jX_{ab}$$

el sistema de ecuaciones resulta:

$$E = I_a (R_c + jX_a) + I_g (jX_{ag}) + I_b (jX_{ab}) + I_t R_t$$

$$0 = I_a (jX_{ag}) + I_g (R_g + jX_g) + I_b (jX_{bg}) + I_t R_t$$

$$0 = I_a (jX_{ab}) + I_g (jX_{bg}) + I_b (R_b + jX_b) - I_t R_t$$

$$0 = I_a + I_g + I_b - I_t$$

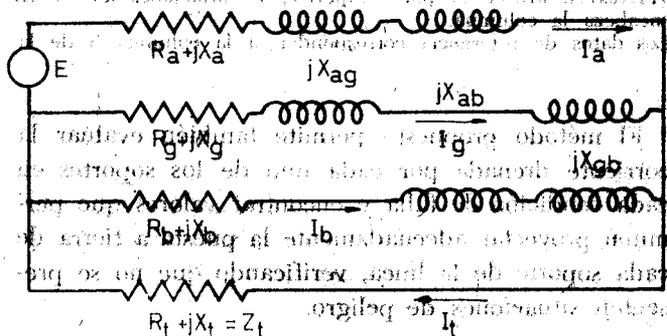


Fig. 9
Circuito equivalente de la red.

La rama en la cual circula I_t debe incluir las resistencias de puesta a tierra de las estaciones, es decir que el valor indicado R_t en rigor es:

$$Z_t = 0,0009882 f_a + R_c + (R_e // Z_1)$$

Donde los valores de las resistencias de las estaciones deben incluir las impedancias en paralelo de las líneas dispersoras que correspondan.

La figura 9 muestra el circuito que corresponde a estas ecuaciones.

Al conocer la corriente I_a las ecuaciones que nos permiten hallar I_g , I_b , I_t son las siguientes:

$$jX_{ag} I_a = (R_g + jX_g) I_g - jX_{gb} I_b - Z_t I_t$$

$$jX_{ab} I_a = -jX_{gb} I_g - (R_b + jX_b) I_b - Z_t I_t$$

$$I_a = I_g + I_b + I_t$$

Si no existieran los soportes de la línea (R_t infinita), y fueran nulas las resistencias de tierra de Central y estación ($R_c = R_e = 0$) sería válido el modelo representado en la figura 8, al cual corresponde el siguiente sistema de ecuaciones:

$$E = I_a Z_{aa} + I_g Z_{ag} + I_b Z_{ab}$$

$$0 = I_a Z_{ag} + I_g Z_{gg} + I_b Z_{bg}$$

$$0 = I_a Z_{ab} + I_g Z_{bg} + I_b Z_{bb}$$

$$I_t = I_a + I_g + I_b$$

En base a los valores de los parámetros mostrados en la tabla V y figuras 10 y 11 se han determinado las corrientes en cables de guardia barras y terreno mostradas en la tabla VI.

De estos valores se concluye que la mayor parte de la corriente retorna en este caso particular por los cables de guardia.

TABLA V. - VALORES DE LOS PARAMETROS PARA DETERMINAR LA DISTRIBUCION DE CORRIENTE

		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	Notas
ρ	ohm	700.						
ab	km	.35	.42					
ag	km	.60						
DMGag	m	15.		18.				2
DMGgb	m	200.						
DMGab	m	200.						
GMRg	m	6.8			8.16			2
GMRb	m	.0123						
Re	ohm	2.45				2.94		
Re	ohm	1.69						
Rl	ohm	.582						3
Xl	ohm	.453						3
rg	ohm/km	.0705					.0846	2
rb	ohm/km	.0734						
Rg	ohm	.0423					.0508	
Xg	ohm	.2222			.2253			
Xgb	ohm	.0552	.0663					
Rt	ohm	2.948	2.952			3.486		
Xt	ohm	.2410						
Rb	ohm	.0257	.0308					
Xb	ohm	.2685	.3222					
Xag	ohm	.1924		.1855				
Xab	ohm	.0552	.0663					

Notas:

1. - Los valores no expresamente indicados son idénticos a los de la columna (1). Las variaciones de datos son del 20 % respecto de la columna (1).
2. - Valor correspondiente a 4 cables de guardia.
3. - Valor correspondiente a 2 líneas en paralelo (tabla III-A columna (3)).
4. - Las variaciones de datos se han elegido para lograr los valores extremos (máximos y mínimos de cada corriente, tabla VI).

TABLA VI. - DISTRIBUCION DE CORRIENTES

Parámetros		1	2	3	4	5	6	Diferencia
Ig	%	90.49	91.05	88.71 *	92.10 *	90.56	90.04	2 %
Ib	%	13.27	12.24 *	14.35	12.56	13.20	15.02 *	13 %
It	%	0.96	1.06	1.04	.91	0.83 *	1.00 *	13 %

- Nota: 1 Los valores se han calculado en base a los parámetros de la tabla V y corresponden a cada columna.
 2 Las diferencias máximas están referidas a los valores de columna 1.
 3 El asterisco evidencia los valores extremos.

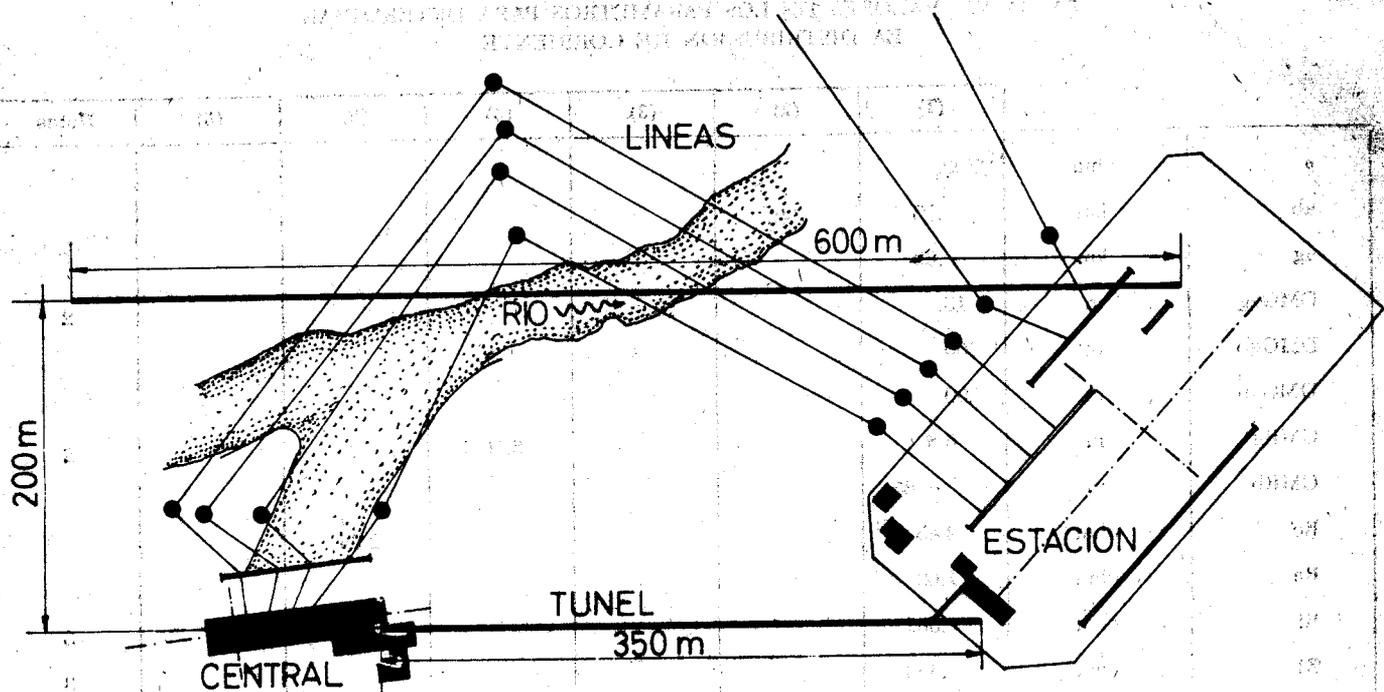


Fig. 10
Esquematación de la conexión entre redes de tierra.

En cambio por la tierra de la estación y de la central prácticamente no circula corriente y en consecuencia cuando se produce este tipo de falla las tensiones de paso y contacto son muy limitadas.

A su vez entre las dos redes de tierra se produce una diferencia de potencial que puede ser evaluada y que solicita la aislación de todos los cables del sistema de comando.

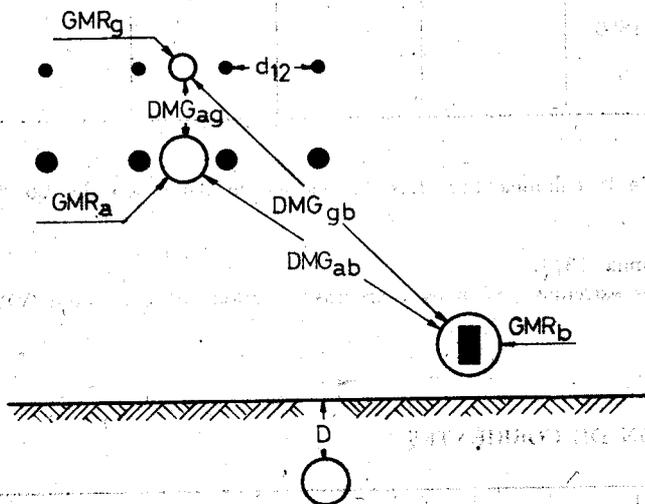


Fig. 11
Esquematación de parámetros geométricos.

Si bien los modelos examinados son aproximaciones satisfactorias, deben tenerse en cuenta que las evaluaciones que se hacen son en general bastante groseras y en consecuencia debe tomarse suficiente margen de seguridad en los cálculos, para cubrir los errores de evaluación de los parámetros.

APENDICE I

Impedancia ofrecida por la línea en la que se ha producido la falla (Bibl. 1)

La tensión hacia tierra que asume un soporte (n) de la línea es:

$$V_n = J_n R_t$$

Donde:

J_n : es la corriente que drena el soporte.

R_t : es la resistencia de puesta a tierra del soporte.

La tensión que asume el cable de guarda en un vano (entre los soportes n, n-1) es:

$$Z_{gg} I_g - Z_{gg} I_{gn} = V_n - V_{(n-1)}$$

Además en otro vano (entre n+1, n)

$$Z_{gg} I_g - Z_{gg} I_{g(n+1)} = V_{(n+1)} - V_n$$

Donde I_{gn} , $I_{g(n+1)}$ corriente en el cable de guarda en cada vano

$$I_{gn} - I_{g(n+1)} = J_n$$

$$V_{(n+1)} - 2V_n + V_{(n-1)} = Z_{gg} (I_{gn} - I_{g(n+1)}) = Z_{gg} V_n / R_t$$

Esta relación es satisfecha por los siguientes valores de V_n :

$$V_n = V_a \exp(-\gamma n) + V_b \exp(\gamma n)$$

$$\gamma = \sqrt{Z_{gg} / R_t}$$

Los valores de contorno para $n=0$ (estación) y $n=N$ (punto en falla de la línea) permiten determinar las constantes V_a y V_b

$$V_0 = V_a + V_b \quad \text{para } n=0$$

$$V_N = V_a \exp(-\gamma N) + V_b \exp(\gamma N) \quad \text{para } n=N$$

Cuando el tramo de línea es de gran longitud se tiene que

$$V_a \gg V_b$$

$$V_0 = V_a$$

$$V_N = V_b \exp(\gamma N)$$

ya que

$$V_a \exp(-\gamma N) \ll V_b \exp(\gamma N)$$

La corriente que drena el cable de guardia en la estación está dada por

$$I - I_{g1} = V_a / Z_p$$

$$V_1 - V_0 = Z_{ag} I - Z_{gg} I_{g1}$$

$$V_1 = V_0 \exp(-\gamma)$$

De éstas surge

$$Z_l I = V_0 / I_{g1} = (Z_{gg} - Z_{ag}) / (F + Z_{ag} / Z_p)$$

Siendo: $F = 1 - \exp(-\gamma)$.

APENDICE II

Impedancia ofrecida por una línea pasiva (Bibl. 1).

En este caso se tiene

$$I = 0$$

$$Z_{gg} I_{gn} = V(n-1) - V_n$$

$$Z_{gg} I_{g1} = V_0 - V_0 \exp(-\gamma)$$

De éstas surge

$$Z_l = V_0 / I_{g1} = Z_{gg} / F$$

Planteando el problema en otra forma se tiene:

$$Z_l = Z_{gg} + 1 / (1/R_t + 1/(Z_{gg} + 1/(1/R_t + \dots)))$$

$$Z_l = Z_{gg} + 1 / (1/R_t + 1/Z_l)$$

Siendo esta última una ecuación de segundo grado en Z_l que resulta así:

$$Z_l = Z_{gg}/2 + \sqrt{Z_{gg} R_t + Z_{gg}^2/4}$$

APENDICE III

Determinación de la distancia equivalente

Cuando la distancia es variable se puede realizar el siguiente razonamiento para determinar una distancia equivalente que se introducirá en los cálculos.

La figura 12 muestra el significado de los símbolos

$$a \cdot \ln \frac{1}{DMG} = \int_0^a \ln \frac{1}{d} dx$$

Donde: $d = D_0 + \alpha x$

$$a \cdot \ln \frac{1}{DMG} =$$

$$= (D_0 + \alpha x) \left(1 + \ln \left(\frac{1}{D_0 + \alpha x} \right) \right) dx$$

Resulta

$$DMG = D_0 (1 + \alpha a / D_0) (1 + \alpha a / D_0)^{D_0 / \alpha a} / e$$

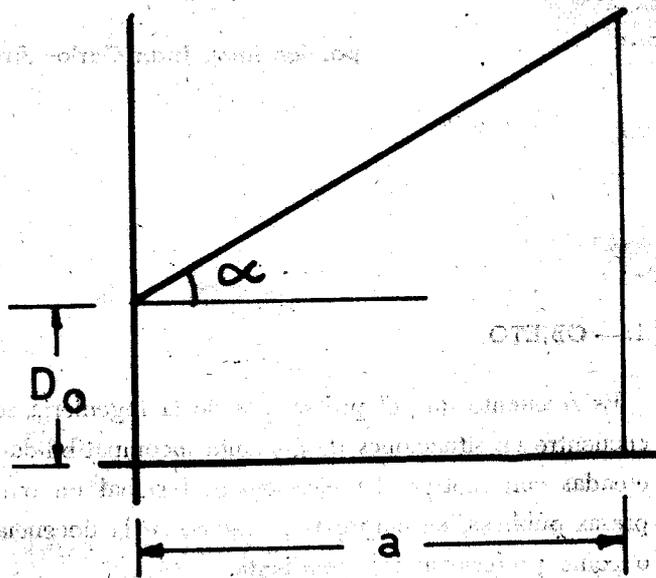


Fig. 12

Ley de variación de d en función de x

TABLA VII

VALORES DE DMG/D₀ EN FUNCIÓN DE $\alpha a / D_0$

$\alpha a / D_0$	DMG/D ₀
0,2	1.098
0,4	1.194
0,6	1.288
0,8	1.380
1,0	1.471
1,2	1.561
1,4	1.650
1,6	1.738
1,8	1.825
2,0	1.911
2,2	1.997
2,4	2.082
2,6	2.167
2,8	2.252
3,0	2.336
3,2	2.419
3,4	2.503
3,6	2.588
3,8	2.668
4,0	2.750

BIBLIOGRAFIA

1. B. Colombo. *Le funi di guardia delle linee aeree e le guaine metalliche dei cavi interrati come dispersori ausiliari di terra*. Rendiconti AEI, 1968.
2. Institute of Electrical and Electronics Engineers. *Guide for Safety in Alternating Current Substation Grounding*, Std. 80.
3. Faletti Rossignani Malaman. *Impianti di terra nelle centrali e Stazioni Elettriche*. L'Elettrotecnica, ottobre, 1935.
4. Mainardi. *Centrali Elettriche*, Cap. XI.
5. Westinghouse. *Electrical transmission and distribution*. Reference Book, Ch. 3.
6. Wagner and Evans. *Symmetrical Components*. Ch. VII-VIII.
7. Antonio Carrer. *Note di Elettrotecnica*, Cap. VI.