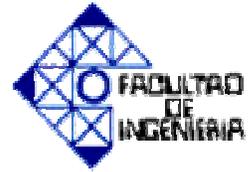




UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN RECINTOS CON SUBESTACIONES COMPACTAS PARA MEDIA TENSIÓN (5 – 36 kV)

Prf. Tutor Ing. FRANCISCO J. NAVEIRA

Br. SAYAGO T. ILIANA R.

BARBULA, 23 DE MAYO 2006



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA



METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN RECINTOS CON SUBESTACIONES COMPACTAS PARA MEDIA TENSIÓN (5 – 36 kV)

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRICISTA

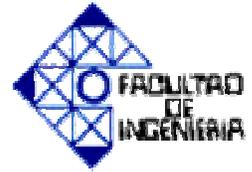
Prf. Tutor Ing. FRANCISCO J. NAVEIRA

Br. SAYAGO T. ILIANA R.

BARBULA, 23 DE MAYO 2006



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes miembros del jurado asignado para evaluar el trabajo especial de grado titulado **“Metodología para el Diseño de un Sistema de Puesta a Tierra en recintos con Subestaciones Compactas para Media Tensión (5 – 36 kV)”**, realizado por la Bachiller: **Iliana R. Sayago Torres**, cédula de identidad: **12.994.641**, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

Prof. Francisco J. Naveira
TUTOR

Prof. Alejandro Sierra
JURADO

Prof. Jorge Gómez
JURADO

BARBULA, 23 DE MAYO 2006

*Dedico este trabajo a mis amadísimos
padres, Carmen Torres y Luis Sayago, y
hermanas Yurimar y Mariana, por todo su
apoyo, comprensión y amor.*

AGRADECIMIENTOS

Mi mayor agradecimiento va a mi Profesor y Tutor Ing. Francisco J. Naviera, por toda su enseñanza y colaboración en la realización es este trabajo.

También quiero extender mi agradecimiento al Ing. Sandalio Rementeria, por el tiempo para brindarme su asesoramiento, el cual fue de gran ayuda.

Agradezco a toda mi familia por su apoyo, a mis padres Carmen Torres y Luis Sayago, hermanas Yurimar Sayago y Mariana Sayago, primos y tíos, y en especial a mi tía Esther Torres por haberme apoyado siempre en el transcurso de mi carrera y en especial en los momentos más difíciles.

A José López por proporcionarme todo su apoyo y no dejarme decaer.

A Danilo Guglienmetti, Silvia Hernández, María Durand y demás amigos y compañeros por estar al pendiente.

Por siempre Gracias...

INDICE GENERAL

Introducción	1
Capítulo I	3
1.1 Planteamiento del Problema	6
1.2 Objetivos	6
1.2.1 Objetivo General	6
1.2.2 Objetivos Específicos	6
1.3 Justificación	7
1.4 Alcance	8
1.5 Delimitaciones	8
Capítulo II	9
2.1 Antecedentes	10
2.1 Bases Teóricas	13
2.2.1 Sistemas de Puesta a Tierra	13
2.2.2 Objetivos de un Sistema de Puesta a Tierra	15
2.2.3 Elementos que Conforman un Sistema de Puesta a Tierra	16
2.2.3.1 Conductores	16
2.2.3.2 Electrodo de Tierra	16
2.2.3.2.1 Barras	17
2.2.3.2.2 Placas	18
2.2.3.2.3 Electrodo Horizontal	18
2.2.3.2.4 Barras Químicas	19
2.2.3.2.5 Mallas a Tierra	20
2.2.3.3 Conexiones	21
2.2.4 Resistividad de los Suelos	22
2.2.4.1 Factores que Influyen en la Resistividad del Terreno	24
2.2.4.1.1 Porcentaje de Humedad	25
2.2.4.1.2 Composición Química	26

2.2.4.1.3 Compactación del Material	27
2.2.4.1.4 Temperatura	27
2.2.4.1.5 Estratificación del Suelo	28
2.2.4.1.6 Mezcla de Diferentes Tipos de Materiales	29
2.2.4.1.7 Variaciones Estacionales	29
2.2.5 Medición de la Resistividad de los Suelos	30
2.2.5.1 Medición de la Resistividad en Suelos Uniformes	31
2.2.5.2 Medición de la Resistividad en Suelos Multiestratificados	32
2.2.6 Tratamiento del Neutro	33
2.2.6.1 Neutro Flotante	33
2.2.6.2 Conexión a Tierra Inductiva	35
2.2.6.3 Conexión Rígida a Tierra	37
2.2.6.4 Conexión a Tierra Semi-Rígida	39
2.2.7 Efectos Fisiológicos	40
2.2.8 Tensiones de Paso y Contacto	42
2.2.8.1 Tensión de Paso	42
2.2.8.2 Tensión de Contacto	43
2.2.9 Métodos de Medición de Resistencia de un Sistema de Puesta a Tierra	43
2.2.9.1 Método General (voltaje, frecuencia y corriente usadas normalmente)	43
2.2.9.2 Métodos de los Dos Puntos	44
2.2.9.3 Método de los Tres Puntos	45
2.2.9.4 Método de la Caída de Potencial	46
2.2.9.5 Método de la Pendiente	46
Capítulo III	48
3.1 Método de Howe	49
3.1.1 Cálculo de los Valores Unitarios k_r , k_p y k_c	51
3.1.1.1 Determinación de la Resistencia Unitaria k_r	52
3.1.1.1.1 Determinación de los Coeficientes A_{ij}	52

3.1.1.2 Determinación de las Tensiones Unitarias de Paso y Contacto k_p Y k_c	55
3.2 Diseño de un Sistema de Puesta a Tierra	57
3.2.1 Tiempo Máximo de Duración de la Falla	57
3.2.2 Cálculo de la Sección Mínima del Conductor	58
3.2.3 Cálculo de la Corriente de Falla	59
3.2.4 Cálculo de la Resistencia de Puesta a Tierra	60
3.2.5 Selección de la Configuración Tipo para el Diseño de Puesta a Tierra	60
3.2.6 Valores de Resistencia de Puesta a Tierra (R'_T) y Tensiones (V'_p , $V'_{p(acc)}$ y V'_c) de la Configuración Tipo Seleccionada, para la Resistividad del Terreno Medido (ρ):	62
3.2.7 Cálculo de los Valores Admisibles de Tensión de Paso y Tensión de Contacto	62
3.2.8 Verificación de los Datos Calculados	64
3.2.9 Correcciones y Ajustes del Diseño Inicial	65
3.2.10 Diagrama de Flujo	66
Capítulo IV	70
4.1 Ejemplo Número 1	71
4.2 Ejemplo Número 2	75
Capítulo V	79
5.1 Conclusiones	80
5.2 Recomendaciones	81
Anexos	82
A.1 Cálculo Manual	83
A.2 Tablas de Configuraciones	89
Bibliografía	139

METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN RECINTOS CON SUBESTACIONES COMPACTAS PARA MEDIA TENSIÓN (5 – 36 kV)

Sayago T. Iliana R. (isayago@uc.edu.ve)
Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Potencia
Barbula 23 de Mayo 2003

Resumen:

Los sistemas de puesta a tierra para subestaciones compactas han sido diseñadas bajo criterios empíricos, por el hecho de que el Std. 80 IEEE no es aplicable. Esto genera numerosos inconvenientes y no brinda confiabilidad en el diseño de puesta a tierra.

1. Introducción:

Los sistemas de puesta a tierra para subestaciones son de gran importancia, ya que su principal objetivo es transportar las corrientes de cortocircuito a tierra. Asimismo, debe proporcionar una superficie equipotencial en el área ocupada por la subestación a fin de garantizar la seguridad del personal que en ella labora.

En el presente trabajo, se desarrollará una metodología para el diseño de un sistema de puesta a tierra confiable en subestaciones compactas, entendiéndose por subestación compacta aquella instalación con tensión hasta 36 kV en el lado primario y hasta 600 V en el secundario y con capacidades de hasta 3.000 kVA, acopladas a los elementos de protección mediante barras tanto de alta como de baja tensión y con dimensiones sumamente reducidas, pues el espacio requerido es aproximadamente de 6 m x 4 m. Esta metodología estará basada en el método de Howe, que supone que la puesta a tierra está formada por barras, y que la corriente se distribuye proporcionalmente la longitud de cada barra.

2. Planteamiento del Problema:

La puesta a tierra es una unión eléctrica directa, sin protección alguna, en una parte del circuito eléctrico, o de una parte metálica no perteneciente al mismo, mediante una toma de tierra con un electrodo o grupos de electrodos enterrados en el suelo.

Los principales objetivos de un sistema de puesta a tierra en una instalación eléctrica, en general, son: salvaguardar a las personas que se encuentren en dicha instalación, o en sus proximidades, para que no sufran una descarga eléctrica peligrosa, garantizar la integridad de los equipos allí existentes y asegurar la continuidad del suministro de energía eléctrica. Para lograr esto, la resistencia equivalente del sistema de puesta a tierra debe ser lo suficientemente baja para que las corrientes de cortocircuito se disipen rápidamente en el terreno, así como las “*tensiones de paso y de contacto*” que una persona pueda recibir, sean inferiores a los límites máximos establecidos por las normativas de seguridad vigentes, tanto nacional como internacionalmente.

Para el diseño del sistema de puesta a tierra, en grandes subestaciones eléctricas, se tiene como norma al Std. 80 IEEE “Guide for Safety in AC Substation Grounding”, que tiene como propósito el de proveer una normativa y brindar la información pertinente para realizar un diseño de puesta a tierra en subestaciones eléctricas. Para “*subestaciones compactas*” el Std. 80 IEEE no es aplicable, ya que en este tipo de instalaciones generalmente se tiene un área disponible muy limitada y las corrientes de cortocircuito y nominales son muy elevadas, esto ocasiona que la cantidad de cobre en la malla de tierra, para poder disipar el calor, sea muy alta.

Existe un gran número de técnicas para la realización del sistema de puesta a tierra en subestaciones compactas, pero la mayoría de estas técnicas son basadas en consideraciones de tipo práctico o en ideas intuitivas ganadas de la experiencia, por lo que el diseño del sistema de puesta a tierra se hace de una forma empírica. Aunque estas técnicas, basadas en la experiencia, suponen un resultado “confiable”, se pueden presentar numerosos inconvenientes que ponen en riesgo los equipos, la continuidad del servicio y, aún más importante, la integridad física de las personas que se encuentren en la subestación en el momento en que ocurra la falla. Esto obliga a la implementación de otros métodos de diseño para realizar dicha puesta a tierra de forma confiable.

Por lo anteriormente dicho, este trabajo de grado plantea la elaboración de una metodología que permita diseñar un sistema de puesta a tierra para recintos con subestaciones compactas, que sea confiable y menos empírica, utilizando para ello tecnología adaptada a los nuevos avances.

3. Objetivo General:

Elaborar una metodología para el diseño de un sistema de puesta a tierra en subestaciones compactas de media tensión para instalaciones residenciales, comerciales y/o industriales.

4. Objetivos Específicos:

- Analizar las normativas y los métodos de cálculo existentes para el diseño de puesta a tierra para subestaciones compactas de media tensión y, las regulaciones establecidas en las Normas de Calidad del Servicio de Distribución Eléctrica.
- Establecer los requerimientos que se deben cumplir para el diseño de un sistema de puesta a tierra para subestaciones compactas.
- Elaborar una metodología acorde a los requerimientos para el diseño de un sistema de puesta a tierra en subestaciones compactas.
- Verificar la metodología para el diseño de un sistema de puesta a tierra en subestaciones.

5. Método Howe:

La metodología que se plantea en este trabajo, se basa en el método Howe, muy extendido dentro de la comunidad Europea, el cual analiza y cuantifica el comportamiento de un electrodo al disipar una corriente en un medio infinito y homogéneo, suponiendo que la corriente se distribuye proporcionalmente por la longitud del electrodo^{[3][6]}.

Esta metodología, consiste en elegir una de las “*configuraciones tipo*”, que son arreglos geométricos formados por conductores unidos a electrodos de tierra. En la Fig. 3.1 se puede observar algunas de dichas configuraciones tipo.

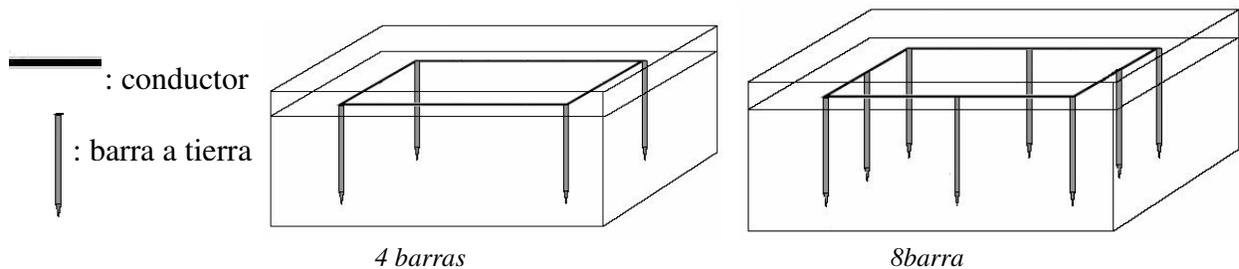


Fig. 3.1: Ejemplos de configuraciones tipo

En cada una de estas configuraciones se calculan parámetros característicos que son denominados “valores unitarios”, k_r , k_p y k_c , para poder realizar el cálculo de la resistencia de puesta a tierra R_t , y las tensiones de paso y contacto, V_c y V_p . Estos valores unitarios son calculados en base a la

resistividad el terreno, ρ , y a la corriente de falla, I_f , y considerando que están enterradas a 0,5 m o 0,8 m

Véase en la tabla 3.1 un ejemplo donde se muestran los valores unitarios, k_r , k_p y k_c , para un sistema de puesta a tierra calculadas con conductores calibre 4/0 AWG/MCM y barras a tierra 5/8'' de diámetro y 2,4 m de longitud, con dos opciones a ser enterrados, 0,5 m y 0,8 m.

Tabla 3.1



Cuadrado de 2 x 2 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,128	0,0315	0,0670
8 barras	2,4	0,101	0,0270	0,0417

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,119	0,0218	0,0614
8 barras	2,4	0,096	0,0192	0,0408

5.1 Determinación de la Resistencia Unitaria k_r :

Del método Howe se tiene que la resistencia unitaria k_r viene dada por la siguiente expresión:

$$k_r = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=2n} A_{ij} \cdot l_j}{n \cdot \sum_{i=1}^{i=n} l_i} \quad (3.1)$$

donde:

- k_r : resistencia "unitaria" que es sólo función del diámetro y la longitud del elemento, en $\Omega/(\Omega \cdot m)$.
- A_{ij} : coeficiente de influencia entre los elementos i -ésima y j -ésima, que sólo es función de la geometría del electrodo.
- l_j : longitud del elemento j -ésima.
- l_i : longitud del elemento i -ésima.

5.1.1 Determinación de los Coeficientes A_{ij} :

Para la determinación del coeficiente A_{ij} , se supone que el elemento a estudiar está compuesto por infinitas esferas diferenciales que disipan corriente.

Si se cumple que todos los elementos de la configuración son paralelos a algunos de los ejes de un sistema coordenado cartesiano ficticio, puede plantearse tres ecuaciones genéricas para la determinación de los correspondientes coeficientes A_{ij} .

a. Coeficiente auto-influencia A_{ii} :

$$A_{ii} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot l_i} \cdot \text{Ln} \left(\frac{2 \cdot l_i}{d_i} \right) \quad (3.2)$$

donde:

- l_i : longitud del elemento en m .
- d_i : diámetro del elemento en m .

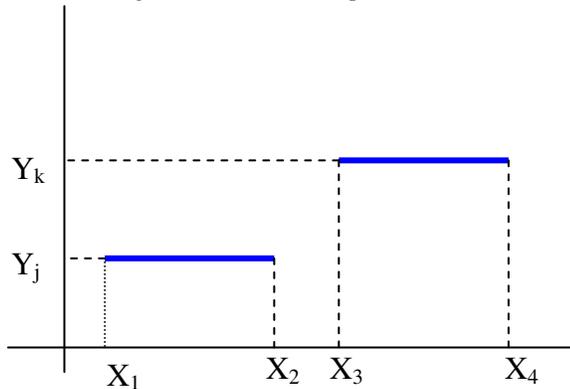
b. Coeficientes de influencia entre conductores paralelos:

$$A_{jk} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot l_j \cdot l_k} [F(x_4, x_1) + F(x_3, x_2) - F(x_3, x_1) - F(x_4, x_2)] \quad (3.3)$$

donde:

$$F(A, B) = (A - B) \cdot \text{Senh}^{-1} \left(\frac{A - B}{Y_k - Y_j} \right) - \sqrt{(Y_k - Y_j)^2 + (A - B)^2}$$

Fig. 3.2: Conductores paralelos



c. Coeficiente de influencia entre conductores perpendiculares:

$$A_{jk} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot l_j \cdot l_k} [F(x_1, y_1) + F(x_2, y_2) - F(x_1, y_2) - F(x_2, y_1)] \quad (3.4)$$

donde:

$$F(A, B) = (B - Y_j) \cdot \text{Ln}[M(A, B)] + (A - X_k) \cdot \text{Ln}[N(A, B)] + 2 \cdot (Z_k - Z_j) \cdot \text{tg}^{-1}[O(A, B)]$$

$$M(A, B) = M_1 + \sqrt{(M_1)^2 + 1}$$

donde:
$$M_1 = \frac{A - X_k}{\sqrt{(B - Y_j)^2 + (Z_k - Z_j)^2}}$$

$$N(A, B) = N_1 + \sqrt{(N_1)^2 + 1}$$

donde:
$$N_1 = \frac{B - Y_j}{\sqrt{(A - X_k)^2 + (Z_k - Z_j)^2}}$$

$$O(A, B) = \frac{1}{Z_k - Z_j} \cdot \left[B - Y_j + A - X_k + \sqrt{(A - X_k)^2 + (B - Y_j)^2 + (Z_k - Z_j)^2} \right]$$

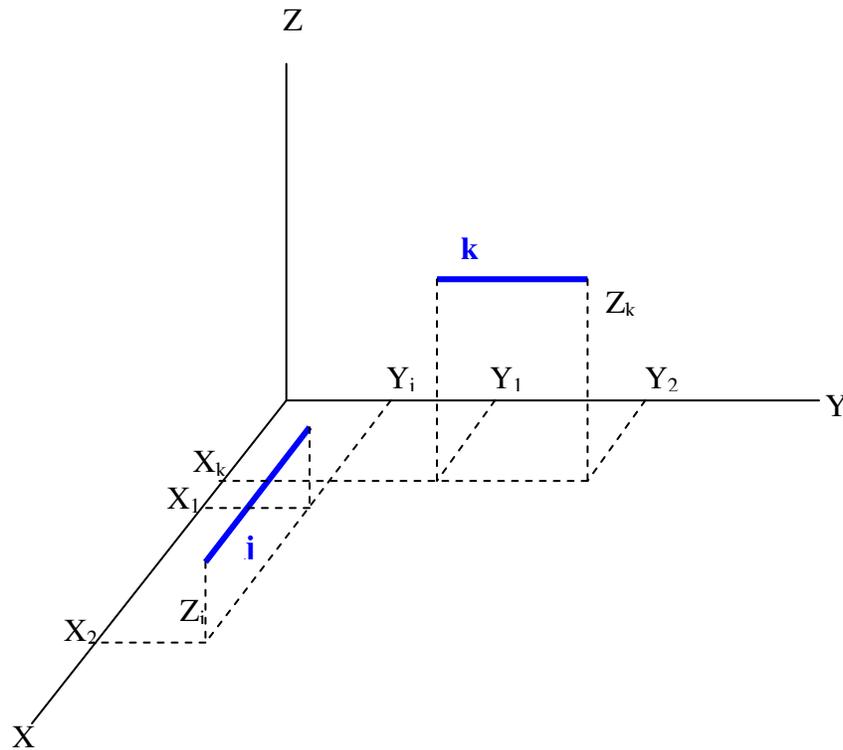


Fig. 3.3: Conductores perpendiculares

5.1.2 Determinación de las Tensiones Unitarias de Paso y Contacto k_p y k_c :

Para calcular las tensiones unitarias de paso y contacto, se necesita calcular el potencial absoluto en un punto cualquiera de la superficie del terreno, como la suma de los potenciales creado por el paso de corriente a cada elemento del diseño de puesta a tierra.

El potencial absoluto se determina situando un elemento lineal en un eje de coordenadas cartesiano ficticio, Fig. 3.4, paralelo al eje coordenado Z, situado entre los puntos (X_1, Y_1, Z_1) y (X_2, Y_2, Z_2) y dividiéndolo en infinitas esferas diferenciales e integrando.

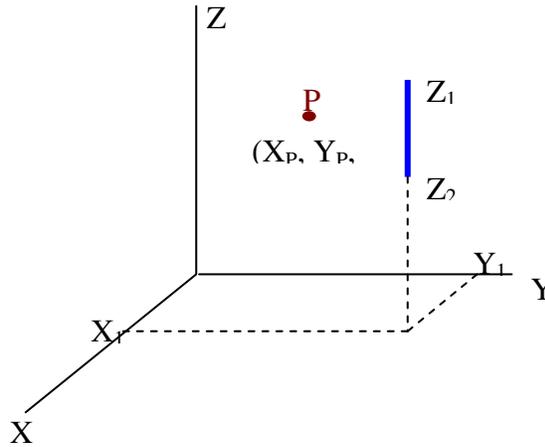


Fig. 3.4: Determinación del potencial absoluto

Por lo que el potencial creado por el elemento i -ésimo en un punto P de coordenadas (X_p, Y_p, Z_p) , se determina mediante la siguiente expresión:

$$V_p = \frac{\rho \cdot I_f}{4 \cdot \pi} \int_{Z=Z_1}^{Z=Z_2} \frac{dZ}{\sqrt{(X_p - X_1)^2 + (Y_p - Y_1)^2 + (Z_p - Z_1)^2}} \quad (3.5)$$

resolviendo la integral se obtiene:

$$V_p = \frac{\rho \cdot I_f}{4 \cdot \pi} \left[\text{Senh}^{-1} \left(\frac{Z_2 - Z_p}{\sqrt{(X_p - X_1)^2 + (Y_p - Y_1)^2}} \right) - \text{Senh}^{-1} \left(\frac{Z_1 - Z_p}{\sqrt{(X_p - X_1)^2 + (Y_p - Y_1)^2}} \right) \right]$$

donde:

- V_p : potencial absoluto en el elemento.
- ρ : resistividad del terreno.
- I_f : corriente de falla que pasa por el elemento i -ésimo.

Relaciones análogas se puede establecer para elemento paralelos a los otros ejes coordenados.

De donde se tiene que:

$$k_{xi} = \frac{1}{4 \cdot \pi} \left[\text{Senh}^{-1} \left(\frac{Z_2 - Z_p}{\sqrt{(X_p - X_1)^2 + (Y_p - Y_1)^2}} \right) - \text{Senh}^{-1} \left(\frac{Z_1 - Z_p}{\sqrt{(X_p - X_1)^2 + (Y_p - Y_1)^2}} \right) \right] \quad (3.6)$$

$$k_X = \sum_{i=1}^{i=2n} k_{Xi} \quad (3.7)$$

- k_X : potencial “unitario” que es sólo función de la longitud del elemento y de la distancia de punto P , en $V/(\Omega \cdot m \cdot A)$.

Con este valor de k_X , junto con la resistencia unitaria k_r , se obtienen los valores unitarios de las tensiones de paso y contacto k_p y k_c :

$$k_p = k_{X1} - k_{X2} \quad (3.8)$$

$$k_c = k_r - k_{X1} \quad (3.9)$$

donde:

- k_p : tensión “unitaria” de paso, en $V/(\Omega \cdot m \cdot A)$.
- k_c : tensión “unitaria” de contacto, en $V/(\Omega \cdot m \cdot A)$.

La tensión unitaria de paso se determina como la diferencia de potencial entre dos puntos de la superficie separados 1m, y la tensión unitaria de contacto se calcula como la diferencia de potencial entre un punto cualquiera de la superficie y el potencial del electrodo.

6. Diseño de un Sistema de Puesta a Tierra:

6.1 Tiempo Máximo de Duración de la Falla:

Cuando se produce una falla a tierra los efectos térmicos y mecánicos sobre los equipos que conforman una subestación, pueden llegar a ser muy destructivos, por lo que su eliminación mediante equipos que despejen dichas fallas, debe ser lo más rápido posible para así limitar sus efectos dañinos.

En media tensión los equipos más utilizados para realizar dicho despeje en las redes son: fusibles, reconectores y seccionadores, y en las subestaciones interruptores o reconectores.

El tiempo máximo que se considera, es el tiempo máximo de actuación de los equipos de despeje usado.

6.2 Cálculo de la Sección Mínima del Conductor^[2]:

Para el cálculo de la sección mínima del conductor de acople, se va a utilizar la versión resumida de la ecuación de Sverak:

$$A_{cmil} = \frac{kVA \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot V_{BT}} \cdot \frac{100\%}{Z\%} \cdot K_f \cdot \sqrt{t} \quad (3.10)$$

donde:

- A_{cmil} : área del conductor en *cmil*.
- kVA : capacidad de la subestación.
- V_{BT} : voltaje entre fases en el lado de baja tensión en V .
- $Z\%$: impedancia del transformador en %.
- K_f : constante obtenida en la tabla 3.2
- t : tiempo de duración de la falla.

Tabla 3.2^[1]

Material	Conductividad (%)	T_m^a (°C)	K_F
Cobre Blando Trenzado	100,0	1083	7,00
Cobre Endurecido Trenzado	97,0	1084	7,06
Copperweld 40%	40,0	1084	10,45
Copperweld 30%	30,0	1084	12,06
Aluminum 6201 Alloy	52,5	654	12,47

A continuación se presenta la tabla 3.3, con los valores correspondientes de calibres de conductores redondos clase B:

Tabla 3.3^[5]

Calibre	Sección	
	CM	mm ²
AWG		
2	66.370	33,82
1/0	105.500	53,49
2/0	133.100	67,43
3/0	167.800	85,01
4/0	211.600	107,20

6.3 Cálculo de la Corriente de Falla^[2]:

En la metodología planteada se va a considerar una barra infinita, ya que no se conoce la impedancia característica desde la fuente a la subestación. Con esta consideración se asegura que la corriente de falla a calcular va a ser superior a la que realmente es, ya que una *barra infinita* tiene una impedancia equivalente igual a cero y una tensión constante.

La corriente de falla simétrica máxima según la norma ANSI/IEEE 141-1986, es:

$$I_f = \frac{100\%}{Z\%} \cdot \frac{kVA \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot V_{AT}} \text{K A} \quad (3.11)$$

donde:

- $Z\%$: impedancia del transformador en %.
- kVA : capacidad de la subestación.
- V_{AT} : voltaje entre fases en el lado de alta tensión en V.

6.4 Cálculo de la Resistencia de Puesta A Tierra:

La resistencia de puesta a tierra, es la resistencia que existe entre el sistema de puesta a tierra (malla a tierra) y un punto lejano del terreno a potencial cero:

$$I_f \cdot R_t \leq U_{BT} \text{K } [\Omega] \quad (3.12)$$

donde:

- R_t : resistencia de puesta a tierra.
- U_{BT} : nivel de aislamiento baja tensión.
- I_f : corriente de cortocircuito.

6.5 Selección de la Configuración Tipo para el Diseño de Puesta a Tierra:

Con la resistencia de tierra ya calculada con (3.12), se selecciona en las tablas, la configuración donde k_r sea menor o igual a la resistencia R_t dividida entre la resistividad del terreno:

$$k_r \leq \frac{R_t}{\rho} \text{K } \Omega / (\Omega \cdot m) \quad (3.13)$$

luego de seleccionar el diseño a usar, se calcula nuevamente R'_t con el valor de k_r de dicho diseño:

$$R'_t = k_r \cdot \rho \text{K } \Omega \quad (3.14)$$

donde:

- k_r : resistencia tomado de la selección del diseño en $\Omega / (\Omega \cdot m)$.
- ρ : resistividad del terreno en $\Omega \cdot m$.

y con este valor se obtiene I'_f :

$$I'_f = \frac{V_{AT}}{R'_t} \text{K A} \quad (3.15)$$

donde:

- V_{AT} : tensión del lado de alta del transformador en V.

6.6 Valores de Resistencia de Puesta a Tierra (R'_T) y Tensiones (V'_P , $V'_{P(acc)}$ y V'_C) de la Configuración Tipo Seleccionada, para la Resistividad del Terreno Medido (ρ):

Estos valores se calculan mediante el uso de los valores unitarios que aparecen en las tablas de la configuración seleccionada, y con estos valores se obtiene:

- Resistencia de puesta a tierra:

$$k_r \cdot \rho = R'_T K (\Omega) \quad (3.14)$$

- Tensión de paso máxima:

$$k_p \cdot \rho \cdot I'_f = V'_p K (V) \quad (3.16)$$

- Tensión de contacto exterior máxima:

$$k_c \cdot \rho \cdot I'_f = V'_c K (V) \quad (3.17)$$

6.7 Cálculo de los Valores Admisibles de Tensión de Paso y Tensión de Contacto^[7]:

En la MIE-RAT 13 apartado 1.1 establece la tensión máxima aplicable al cuerpo humano, entre manos y pies es la siguiente:

$$V_{CA} = \frac{K}{t^n} \quad (3.18)$$

donde:

- V_{CA} : la tensión aplicada en voltios.
- t : duración de la falla en segundos.
- K y n : constantes en función del tiempo. Tablas 3.4 y 3.5:

Tabla 3.4^[16]

$0,9 \geq t \geq 0,1$ s	$K=72$	$n=1$
$3 \geq t > 0,9$ s	$K=78,5$	$n=0,18$

Tabla 3.5^[16]

$5 \geq t > 3$ s	$V_{CA}=64$ V
$t > 5$ s	$V_{CA}=50$ V

Considerando que la tensión máxima aplicable al cuerpo humano entre manos y pies, no supere el valor obtenido en la fórmula anterior para las tensiones de toque, ni supere 10 veces dicho valor para las tensiones de paso, los valores máximos admisibles de las tensiones de paso y toque, y por tanto no pueden ser superadas en una instalación son las siguientes:

- Tensión de Paso:

$$V_p = \frac{10 \cdot K}{t^n} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot \rho}{1000}\right) K [V] \quad (3.19)$$

- Tensión de Toque:

$$V_t = \frac{K}{t^n} \cdot \left(1 + \frac{1,5 \cdot \rho}{1000}\right) K [V] \quad (3.20)$$

donde:

- ρ :resistencia del terreno.

Estas formulas se obtuvieron tomando en cuenta que la resistencia del cuerpo humano es de 1.000Ω y cada pie se ha asimilado a un electrodo en forma de placa de 200 cm^2 de superficie que ejerza sobre el suelo una fuerza de $250N$, lo que representa a una resistencia de contacto con el suelo evaluada en $3\rho_s^{[7]}$.

En caso de que la resistividad del terreno sea distinta para cada pie (en el caso de acceso a la subestación), la tensión de paso será:

$$V_{p(acc)} = \frac{10 \cdot K}{t^n} \cdot \left(1 + \frac{3 \cdot \rho + 3 \cdot \rho_s}{1000}\right) K [V] \quad (3.21)$$

donde ρ y ρ_s son las resistividades superficiales en que se apoya cada pie.
 $\rho_s = 3.000 \Omega.m$ (resistencia superficial del pavimento).

6.8 Verificación de los Datos Calculados^[4]:

Para confirmar que el diseño seleccionado está correcto, los datos calculados deberán cumplir con lo siguiente:

1. Tensión de paso en el exterior calculada sea menor o igual que el valor admisible:

$$V'_p \leq V_p K (V)$$

2. Tensión de contacto calculada sea menor o igual que el valor admisible:

$$V'_c \leq V_c K (V)$$

En caso contrario se adoptarán medidas adicionales de seguridad. En este caso la tensión de paso de acceso es:

$$V'_{p(acc)} \leq V_{p(acc)} K (V)$$

6.9 Correcciones y Ajustes del Diseño Inicial⁴¹:

En el caso en que los cálculos arrojados para la selección del diseño inicial no cumpla alguna de las condiciones anteriormente indicadas, se deberá escoger otra configuración tipo y repetir todo el proceso anteriormente reseñado, aumentando la longitud total del conductor horizontal, el número de barras verticales o su longitud, para que disminuya el valor de R_t , y en consecuencia los valores de V'_p y V'_c .

7. Conclusiones y Recomendaciones:

- Al analizar las normas y métodos de cálculo existentes, se pudo verificar que para el diseño de puesta a tierra en subestaciones compactas, no existe en el país métodos que sea aplicable para este tipo de subestaciones. El Std. 80 IEEE, que es una de las principales normas para el diseño de sistemas de puesta a tierra, no aplica en este tipo de subestaciones, ya que al calcular la malla correspondiente, resulta con separaciones muy pequeñas, y prácticamente queda una lamina, lo que resulta poco útil.
- En el estudio realizado se estableció los requerimientos necesarios para poder realizar el diseño de puesta a tierra, entre estos requerimientos se encuentra el cálculo de la corriente de falla, que es sumamente importante para poder seleccionar la sección de los conductores, y el tipo de conexión a usar. También, entre los requerimientos, se contempla el estudio de la resistividad del terreno donde se va a construir la subestación. Existen tablas donde están tabuladas el rango de resistividad según el terreno.
- La metodología que se planteó consiste en la elaboración de configuraciones tipos, que son usadas en el diseño de puesta a tierra, y se calculó para cada configuración, unos valores unitario, k_r , k_p , $k_{p(acc)}$ y k_p , que se utilizan para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra R_t y las tensiones de paso y contacto, V_p y V_c , estos valores unitarios fueron calculados según el método Howe, muy extendido dentro de la comunidad Europea.
- Se comprobó la metodología mediante unos ejemplos, que fueron tomados de casos reales. Se pudo verificar que las tensiones de paso y contacto, quedaron menores que las admitidas, dando así confiabilidad al diseño.
- Para el calculo de los valores unitarios por medio del método Howe, se recomienda, tanto para el caso de conductores paralelos como perpendiculares, hacer la correcta implementación de las ecuaciones para así simplificar notablemente las expresiones y el número de cálculos que se realizan.
- Antes de realizar cualquier diseño de puesta a tierra, es recomendable hacer las mediciones de la resistividad del terreno, en vez de guiarse por las tablas existentes, para que así tener una

mejor aproximación del valor real y los cálculos para el diseño del sistema de puesta a tierra, sean aun más exactos.

➤ Se recomienda elaborar en un futuro trabajo, un software que ejecute la metodología presentada, con la finalidad de simplificar los cálculos de los valores unitarios y así tener un diseño de un sistema de puesta a tierra más exacto.

8. Referencias:

[1] ANSI/IEEE Std. 80-2000 (*Revision of IEEE Std. 80-1986*) *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*.

[2] ANSI/IEEE Std. 141-1986 *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants (The Red Book)*.

[3] COLOMINAS I., F. Ambarina y M. Casteleiro, *Fórmulas Analíticas de Integración para el Cálculo de Tomas de Tierra Mediante el Método de Elementos de Contorno (BEM)*, E. T. S. de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de La Coruña, Campus de Elviña S/N, 15192 La Coruña, España.

[4] GARCÍA MÁRQUEZ Rogelio, *La Puesta a Tierra de Instalaciones Eléctricas y el R.A.T.*, Barcelona, España, Marcombo Boixareu Editores, 1991

[5] NAVEIRA Francisco. *Guía de Sistema Eléctricos de Distribución*, Valencia, Venezuela, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo.

[6] PILO E., L. Rouco y A. Fernández,. *Cálculo de Tensiones de Paso y de Contacto en Ferrocarriles de Alta Velocidad*, Instituto de Investigación Tecnológicas, E. T. S. de Ingeniería, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España.

[7] REGLAMENTO SOBRE CONDICIONES TÉCNICAS Y GARANTÍAS DE SEGURIDAD EN CENTRALES ELÉCTRICAS. *Instrucción Técnica Complementaria MIE-RAT 13: "INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA"*, España, Ministerio de Energía y Minas, Orden de 27 de Noviembre de 1987

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de puesta a tierra para subestaciones son de gran importancia, ya que su principal objetivo es transportar las corrientes de cortocircuito a tierra. Asimismo, debe proporcionar una superficie equipotencial en el área ocupada por la subestación a fin de garantizar la seguridad del personal que en ella labora.

En el presente trabajo, se desarrollará una metodología para el diseño de un sistema de puesta a tierra confiable en subestaciones compactas, entendiéndose por subestación compacta aquella instalación con tensión hasta 36 kV en el lado primario y hasta 600 V en el secundario y con capacidades de hasta 3.000 kVA, acopladas a los elementos de protección mediante barras tanto de alta como de baja tensión y con dimensiones sumamente reducidas, pues el espacio requerido es aproximadamente de 6 m x 4 m. Esta metodología estará basada en el método de Howe, que supone que la puesta a tierra está formada por barras, y que la corriente se distribuye proporcionalmente la longitud de cada barra.

En el Capítulo 1 se planteará el problema que originó la realización del presente trabajo. Así como también se presentaran los objetivos, su justificación y las delimitaciones del mismo.

En el Capítulo 2 se explicarán los conceptos generales de puesta a tierra.

En el Capítulo 3 se desarrollará la metodología a seguir para el diseño de un sistema de puesta a tierra confiable en subestaciones compactas, fundamentados en el método Howe.

En el Capítulo 4 se presentaran dos ejemplos donde se demostrará el uso de la metodología planteada.

*C
A
P
Í
T
U
L
O
I*

CAPÍTULO I: EL PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:

El globo terráqueo es considerado por la física, específicamente la rama de la electricidad, como un potencial eléctrico (referencial) igual a cero (0V). A la Tierra en sí misma, así como cualquier conductor conectado a ella, se le llaman *tierra*. La energía es transportada por los conductores, pero estos pueden estar sujetos a posibles fallas de aislamiento, fallas a tierra (cortocircuitos) o descargas atmosféricas sobre el sistema eléctrico asociado a una subestación, en este caso, se corre el riesgo de que las partes metálicas que estén cerca de dicha falla, alcancen potenciales peligrosos, pues si hay contacto directo entre una persona y un equipo electrificado, le puede causar desde alteraciones del ritmo cardíaco hasta la muerte, así como también los equipos que pertenecen a dicha subestación pueden sufrir daños severos y producir interrupciones en el servicio. Por tal motivo, la puesta a tierra es necesaria para mantener el potencial de los objetos al mismo nivel de tierra.

La puesta a tierra es una unión eléctrica directa, sin protección alguna, en una parte del circuito eléctrico, o de una parte metálica no perteneciente al mismo, mediante una toma de tierra con un electrodo o grupos de electrodos enterrados en el suelo.

Por otro lado, el suelo está compuesto por muchos materiales, los cuales pueden ser buenos o malos conductores de la electricidad, pero éste se considera como un buen conductor, por esta razón, y por ser un punto de referencia, al potencial de tierra se le asume cero.

Los principales objetivos de un sistema de puesta a tierra en una instalación eléctrica, en general, son: salvaguardar a las personas que se encuentren en dicha instalación, o en sus proximidades, para que no sufran una descarga eléctrica peligrosa, garantizar la integridad de los equipos allí existentes y asegurar la continuidad del suministro de energía eléctrica. Para lograr

esto, la resistencia equivalente del sistema de puesta a tierra debe ser lo suficientemente baja para que las corrientes de cortocircuito se disipen rápidamente en el terreno, así como las “*tensiones de paso y de contacto*” que una persona pueda recibir, sean inferiores a los límites máximos establecidos por las normativas de seguridad vigentes, tanto nacional como internacionalmente.

Las distintas normas, tal como el Código Eléctrico Nacional (COVENIN 200) en la sección 250, establecen que deben conectarse a tierra las partes metálicas de los aparatos que no pertenezcan al circuito de servicio, y puedan entrar en contacto con partes sometidas a tensión, en caso de avería o establecimiento de arcos. Por este motivo, en los equipos y en las partes de la instalación hay que prever un sistema de puesta a tierra, que se conecte directa o indirectamente a la toma de la conexión a tierra, constituida por diferentes elementos como conductores y barras enterrados convenientemente.

Para el diseño del sistema de puesta a tierra, en grandes subestaciones eléctricas, se tiene como norma al Std. 80 IEEE “Guide for Safety in AC Substation Grounding”, que tiene como propósito el de proveer una normativa y brindar la información pertinente para realizar un diseño de puesta a tierra en subestaciones eléctricas. Para “*subestaciones compactas*” el Std. 80 IEEE no es aplicable, ya que en este tipo de instalaciones generalmente se tiene un área disponible muy limitada y las corrientes de cortocircuito y nominales son muy elevadas, esto ocasiona que la cantidad de cobre en la malla de tierra, para poder disipar el calor, sea muy alta.

Existe un gran número de técnicas para la realización del sistema de puesta a tierra en subestaciones compactas, pero la mayoría de estas técnicas son basadas en consideraciones de tipo práctico o en ideas intuitivas ganadas de la experiencia, por lo que el diseño del sistema de puesta a tierra se hace de una forma empírica. Aunque estas técnicas, basadas en la experiencia, suponen un resultado “confiable”, se pueden presentar numerosos inconvenientes que ponen en riesgo los equipos, la continuidad del servicio y, aún más importante, la integridad física de las personas que se encuentren en la subestación en el momento en que ocurra la falla. Esto obliga a

la implementación de otros métodos de diseño para realizar dicha puesta a tierra de forma confiable.

Por lo anteriormente dicho, este trabajo de grado plantea la elaboración de una metodología que permita diseñar un sistema de puesta a tierra para recintos con subestaciones compactas, que sea confiable y menos empírica, utilizando para ello tecnología adaptada a los nuevos avances.

1.2 OBJETIVOS:

1.2.1 OBJETIVO GENERAL:

Elaborar una metodología para el diseño de un sistema de puesta a tierra en subestaciones compactas de media tensión para instalaciones residenciales, comerciales y/o industriales.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Analizar las normativas y los métodos de cálculo existentes para el diseño de puesta a tierra para subestaciones compactas de media tensión y, las regulaciones establecidas en las Normas de Calidad del Servicio de Distribución Eléctrica.
- Establecer los requerimientos que se deben cumplir para el diseño de un sistema de puesta a tierra para subestaciones compactas.
- Elaborar una metodología acorde a los requerimientos para el diseño de un sistema de puesta a tierra en subestaciones compactas.

- Verificar la metodología para el diseño de un sistema de puesta a tierra en subestaciones compactas para media tensión.

1.3 JUSTIFICACIÓN:

En las instalaciones de media tensión, las corrientes nominales y de cortocircuito son muy elevadas, por ser el voltaje en el lado de alta muy bajo, por lo que se necesita una gran cantidad de cobre en la malla para poder disipar el calor, esto hace que el Std. 80 IEEE no se pueda aplicar.

La falta de metodologías que sean aplicables y confiables hace que el sistema de puesta a tierra este diseñada en forma empírica, y esto genera numerosos inconvenientes que pone en riesgo a los equipos, la continuidad del servicio y, la integridad física de personas que puedan estar cerca, lo que obliga a buscar nuevas alternativas para el cálculo y diseño de una puesta a tierra confiable.

En este trabajo se plantea la elaboración de una metodología que permita diseñar un sistema de puesta a tierra confiable en instalaciones de media tensión, proporcionando una herramienta útil que servirá como guía para futuros diseños.

1.4 ALCANCE:

El trabajo que se pretende desarrollar tiene por alcance la elaboración de una metodología para el diseño de un sistema de puesta a tierra para subestaciones compactas con niveles de tensión entre 5kV y 36kV.

La necesidad de dicha metodología se basa en el hecho de que los métodos de diseño de sistemas de puesta a tierra existentes en el país ninguno trata sobre el tema, ya que todas se refieren a grandes subestaciones, y estas son inoperantes para el diseño de sistema de puesta a tierra en subestaciones compactas de media tensión.

1.5 DELIMITACIONES:

El estudio de sistemas de puesta a tierra en subestaciones compactas de media tensión (5-36kV), ha sido poco estudiado en el país y la bibliografía disponible es muy escasa, y cuando se toca el tema en la poca bibliografía disponible, lo hacen de forma muy breve.

Existe información en los países de la comunidad Europea, pero su disponibilidad es poco accesible; así como el contacto con expertos en el tema es sumamente difícil.

*C
A
P
Í
T
U
L
O

I
I*

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES:

➤ El principal instrumento para diseñar un sistema puesta a tierra en subestaciones eléctricas, es el Std. 80 IEEE “Guide for Safety in AC Substation Grounding”. En 1961 se publica la primera edición, que nació del análisis y el compendio de informes elaborados por diferentes autores dedicados al estudio de los sistemas de puesta a tierra, entre ellos están: Sverak Balder Tapar, S. J. Schwarz, E. D. Sunde, F. Dawalibi, A. P. Meliopoulos, R. Rundenburg, entre otros. Esta publicación tiene como propósito el de servir como una normativa e información pertinente para el diseño de puesta a tierra en subestaciones eléctricas.

En el 2000 se publicó la cuarta edición, que es una modificación de las anteriores, en donde se actualizaron tópicos, se redefinieron o simplificaron las ecuaciones para el cálculo de los voltajes de paso y contacto, se presentaron gráficas para ayudar en la determinación de la corriente de falla, así como también cambios en los criterios de selección de conductores y conectores, se adicióno mayor información en la medición de la resistividad, entre otras.

El Std. 80 “IEEE, funciona en combinación con otros estándares asociados, tales como el Std. 81-1983 y Std. 81.2-1991 que da procedimiento para la medición de la resistividad, la resistencia de sistemas de puesta a tierra instalados, los gradientes de superficie y continuidad de los conductores de la rejilla, el Std. 142-1991, se conoce también como Green Book, cubre alguno de los aspectos prácticos de puesta a tierra y el Std. 837 –1989 que da pruebas y criterios para seleccionar las conexiones que se usaran en los sistemas de puesta a tierra. Todas en conjunto brindan la suficiente información para realizar la puesta a tierra en grandes subestaciones eléctricas.

➤ En países como España, por ejemplo, existe el “Reglamento de Centrales Eléctricas y Centros de Transformación” desde el año 1949, que tiene por objeto establecer las condiciones y garantías técnicas que han de someterse las instalaciones eléctricas, dichas instalaciones eléctricas se clasifican en:

- a. Primera categoría. Las de tensión nominal superior a 66 kV.
- b. Segunda categoría. Las de tensión nominal igual o inferior a 66 kV y superior a 30 kV.
- c. Tercera categoría. Las de tensión nominal igual o inferior a 30 kV y superior a 1 kV.

En este reglamento se establece que si en la instalación existen circuitos o elementos en los que se utilicen distintas tensiones, el conjunto del sistema se clasificará, en el grupo correspondiente al valor de la tensión nominal más elevada.

➤ En 1993 José Manuel Aller Castro, Ingeniero Electricista por la Universidad Simón Bolívar, presentó su tesis doctoral “Diseño de Sistemas Complejos de Puesta a Tierra en Terrenos con Estratos Múltiples y con Consideraciones de su Comportamiento en Régimen Transitorio”^[3], donde propuso un método general y sistemático para el cálculo de potenciales en las redes de puesta a tierra, con excitaciones permanentes o transitorias, en terrenos uniformes o multiestratificados horizontalmente.

Como resultado, obtuvo tres algoritmos. El primero determina los parámetros de un terreno multiestratificado a partir de las medidas de resistividad aparente, **RESAPAM** (**RES**istividad **AP**arente **M**ultiestrato). El segundo evalúa el comportamiento en régimen permanente de redes de tierra en subsuelos de varias capas, **TIERRAM** (**TIERRA** Multiestrato). El último algoritmo analiza la red de puesta a tierra en régimen transitorio con modelos uniformes y multiestratificados del subsuelo, **PTT** (**P**rograma **T**ransitorio de **T**ierres).

➤ Ignacio Agullero y Miguel Martínez Lozano presentaron el trabajo “Técnicas Modernas para la Medición de Sistemas de Puesta a Tierra en Zonas Urbanas”^[13], donde el principal objetivo es el de resaltar la importancia de una buena puesta a tierra tanto por razones de seguridad como el

del buen funcionamiento del sistema eléctrico. En este trabajo se recomienda un monitoreo, cada cierto tiempo, para verificar el estado del sistema de puesta a tierra, y así cerciorarse de que se tiene el valor de la resistencia de puesta a tierra deseado.

➤ Hildemaro Briceño M. en la escuela de Ingeniería Eléctrica, de la Universidad de Los Andes, Mérida, presento “Sistemas de Conexión a Tierra”^[4], que tiene como objeto motivar la discusión y reflexión acerca de las necesidades que justifican la existencia de un sistema de puesta a tierra y establecer así sus funciones, haciendo énfasis en como se origina esta necesidad tomando en cuenta si el sistema de distribución de energía eléctrica tiene el neutro conectado a tierra o aislado de éste.

Como se puede observar, existe poca literatura que abarque el tema sobre el diseño de sistemas de puesta a tierra en subestaciones compactas.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

Según la IEEE, un sistema de puesta a tierra es: *“una conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por medio de la cual un circuito eléctrico o equipo se conecta a la tierra o a algún cuerpo conductor de dimensión relativamente grande que cumple la función de la tierra”*.

En Europa, el significado de un sistema de puesta a tierra permanece similar, aunque los términos generalmente aceptados, se reemplazan tal como sigue: *“es una conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por medio de la cual un circuito eléctrico o equipo se conecta a la masa de la tierra o a algún cuerpo conductor de dimensiones relativamente grandes que cumple la misma función que la masa de la tierra”*.

Los sistemas de puesta a tierra conecta una parte del circuito eléctrico, de las partes metálica de los equipos, a un electrodo enterrado en el suelo, que suele ser generalmente, una barra, placa o malla de cobre o hierro galvanizado, o un conjunto de ellas, con el fin de conseguir una unión con la menor resistencia eléctrica posible entre la parte conductora y la tierra. En la figura 2.1 se muestra un ejemplo de un sistema de puesta a tierra.

Los sistemas de puesta a tierra deben ser capaces de tolerar corrientes de cortocircuito durante el tiempo que transcurre entre la falla y la actuación de las protecciones que la despeja, sin producir diferencias de potencial significativas que puedan ocasionar el deterioro prematuro de equipos importantes en la subestación, plantas industriales, edificaciones, entre otros.

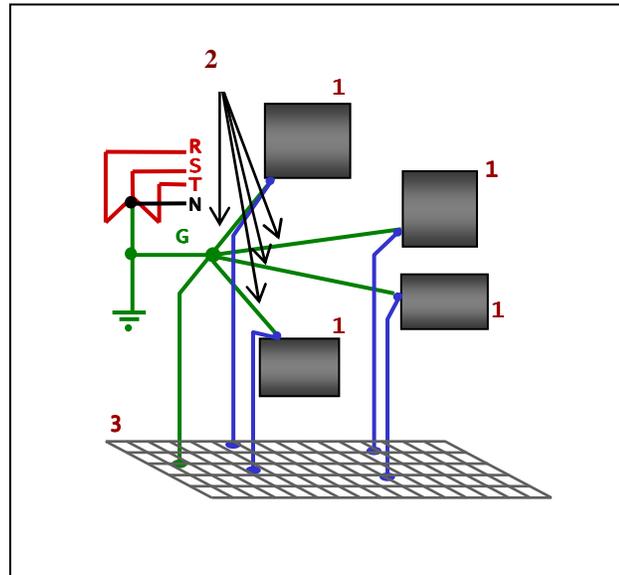


Fig. 2.1: Ejemplo de una sistema de puesta a tierra
1: carcasas o estructuras metálicas, 2: conductores de acoplamiento,
3: malla de tierra

Los sistemas de puesta a tierra, contribuyen de forma importante al buen funcionamiento de los sistemas de energía eléctrica. También tiene la función de garantizar un referencial para el potencial (hay que recordar que el potencial es un diferencial), que se asume cero, y así poder permitir la circulación de corrientes de cortocircuito. Prácticamente todos los equipos eléctricos y electrónicos, necesitan estar conectados a una red de tierra, para poder asegurar su protección. Entre las instalaciones que requieren un sistema de puesta a tierra, las que resaltan son las subestaciones eléctricas que requieren que se garantice un potencial igual a cero, y así asegurar un buen funcionamiento del sistema y la integridad física de las personas y de los equipos que se encuentran en las mismas, en el momento en que ocurra una falla.

Para garantizar lo anterior dicho, cada país posee ciertas normas y recomendaciones, generalmente basadas en las normas internacionales, que recogen una serie de criterios relativos a la seguridad de las personas y a los materiales que deben utilizarse en la construcción de los sistemas de puesta a tierra. En general, estas normas recomiendan máximas “*tensiones de paso* y

contacto” tolerables (explicación de ambas más adelante), así como la revisión de los potenciales transferidos en una subestación o entre una subestación y el medio externo.

2.2.2 OBJETIVOS DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Los requerimientos de seguridad en las subestaciones exigen la conexión a tierra de todas las partes metálicas y/o carcasas de interruptores, tanques de transformadores, estructuras, calzadas metálicas, cercas, montajes de acero estructural de edificios, tablero de conmutación, entre otros. Un buen sistema de puesta a tierra debe lograr los siguientes objetivos:

- a. Mantener una diferencia de potencial baja entre las distintas estructuras metálicas, para así asegurar que si una persona que se encuentra cerca de las inmediaciones de un sistema de puesta a tierra, y se presente una falla, esta no quede expuesta a un choque eléctrico peligroso para su vida.
- b. Proveer un camino rápido para que las corrientes por el sistema bajo condiciones de falla, puedan circular hacia el terreno, sin exceder cualquier límite de operación de los equipos que afecten adversamente la continuidad del servicio.
- c. Proteger los equipos, para que no sufran ningún daño severo en el momento de que ocurra una falla.

2.2.3 ELEMENTOS QUE CONFORMA UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA:

Los elementos que constituyen un sistema de puesta a tierra, son: los conductores, los electrodos de tierra, así como también el elemento conector entre el conductor y los electrodos.

2.2.3.1 CONDUCTORES:

En un sistema de puesta a tierra se utilizan dos tipos de conductores: los de la malla de tierra, que permiten la unión entre los electrodos que conforman el sistema de puesta a tierra, y los de acoplamiento que aseguran que las partes conductivas expuestas (tales como carcasas metálicas) permanezcan unidas a la malla de tierra y al mismo potencial durante condiciones de falla eléctrica.

Estos conductores suelen ser en forma de cable de cobre trenzado desnudo, y el calibre se selecciona para que este sea capaz de soportar la corriente de falla estimada, por la duración considerada, sin que sufra ningún tipo de deterioro.

2.2.3.2 ELECTRODOS DE TIERRA:

El electrodo es el elemento del sistema de puesta a tierra que está en contacto directo con el terreno. Los electrodos de tierra deben tener propiedades mecánicas y eléctricas apropiadas para responder satisfactoriamente a las solicitudes que los afectan, durante un período de tiempo relativamente largo. El material debe tener buena conductividad eléctrica y no corroerse dentro de un amplio rango de condiciones de suelo, por lo que el material preferido generalmente es el cobre. El electrodo puede tomar diversas formas: barras verticales, conductores horizontales, placas, combinación de conductores horizontales y barras verticales (mallas de tierra).

2.2.3.2.1 BARRAS

Las barras son los electrodos más comúnmente usados en los sistemas de puesta a tierra (Fig. 2.2).

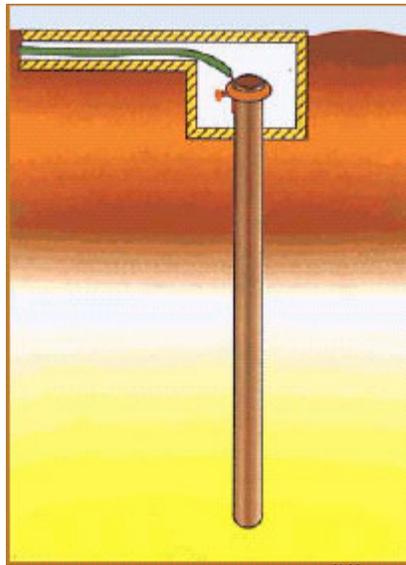


Fig. 2.2: Barra de Tierra^[20]

El material de la barra es de cobre puro o de acero recubierto de cobre. El tipo recubierto se usa cuando la barra se entierra por medios mecánicos (impacto) ya que el acero empleado tiene alta resistencia mecánica. La capa de cobre debe ser de alta pureza y aplicada electrolíticamente para que no se deslice al enterrar la barra.

La resistencia de una barra vertical de radio a [m] y longitud l [m] enterrada desde la superficie en un terreno de resistividad equivalente ρ_e es:

$$R = \frac{\rho_e}{2\pi l} \left[\ln\left(\frac{4l}{a}\right) - 1 \right] \quad [\Omega] \quad (2.1)$$

2.2.3.2.2 PLACAS:

Los electrodos de placa tienen su longitud y ancho mucho mayor que su espesor, son de cobre o de acero galvanizado (Fig. 2.3).

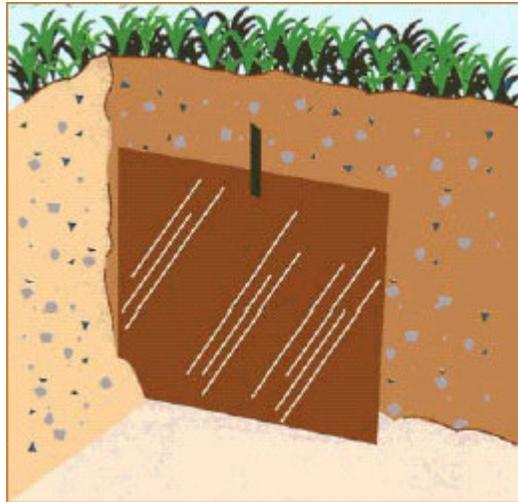


Fig. 2.3: Placa de Tierra^[20]

Una expresión simplificada para determinar su resistencia de puesta a tierra es:

$$R = \frac{0,8\rho_e}{L} \quad [\Omega] \quad (2.2)$$

siendo L [m] la profundidad máxima y ρ_e [Ω -m] la resistividad equivalente del terreno.

2.2.3.2.3 ELECTRODOS HORIZONTALES:

Los electrodos horizontales (Fig. 2.4) están hechos de cintas de cobre de alta conductividad o conductores retorcidos (cables). La cinta es el material más conveniente pues para una sección dada de material presenta una mayor superficie y se considera que tiene un comportamiento mejor a alta frecuencia.

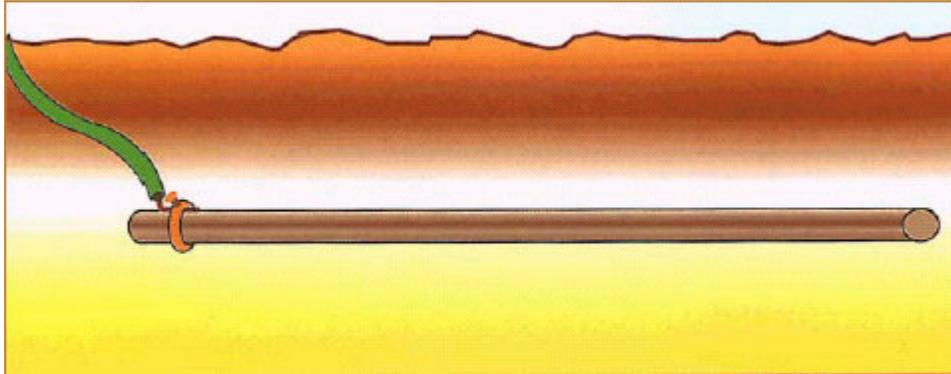


Fig. 2.4: Electrodo Horizontal^[20]

La resistencia de un conductor cilíndrico horizontal de radio $a[m]$ y longitud $l[m]$ enterrado a una profundidad de $h[m]$, con $h < l$, es:

$$R = \frac{\rho_e}{2\pi l} \left[\text{Ln} \left(\frac{2l^2}{ah} \right) - 2 + 2\frac{h}{l} - \frac{h^2}{l^2} + \frac{h^4}{2l^2} \text{K} \right] \quad [\Omega] \quad (2.3)$$

2.2.3.2.4 BARRAS QUÍMICAS:

Este tipo de barra consiste de un tubo de cobre electrolítico relleno en su interior de compuestos químicos, básicamente de sales solubles con el agua o sustancias conductivas, que se incorporan lentamente al terreno mediante perforaciones de drenaje en el tubo. Pueden ser colocados en forma vertical u horizontal dependiendo de las características del terreno (Fig. 2.5).

Estas barras son utilizadas cuando la resistividad del terreno no se logra reducir con electrodos más comúnmente usados, como por ejemplo, las barras verticales.

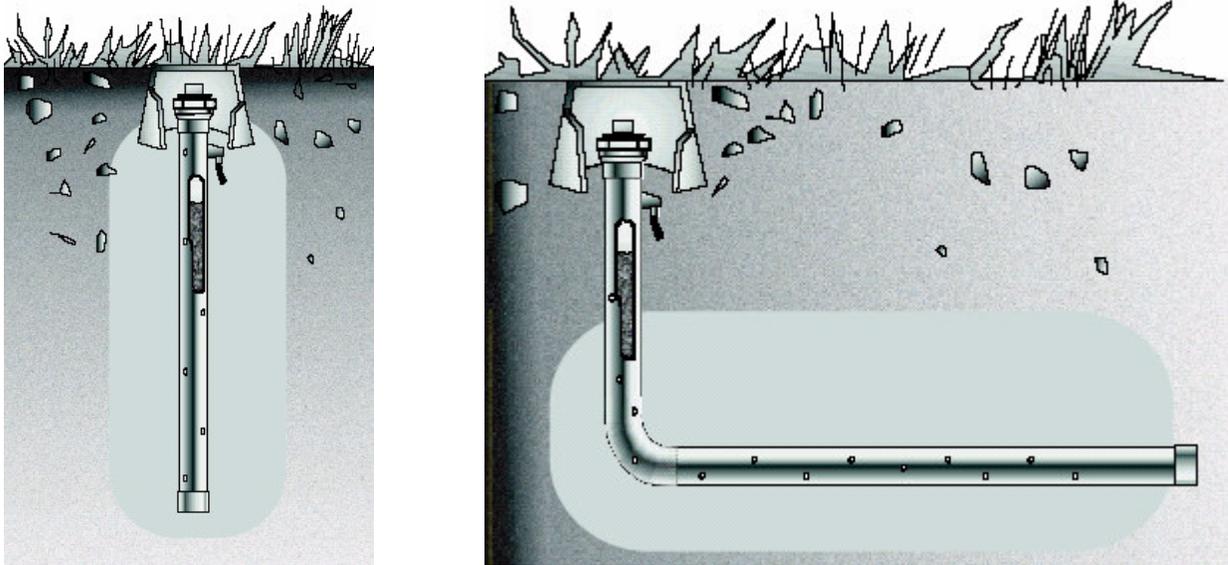


Fig. 2.5: Barras Químicas

Tomado de Catálogo de CHEM-ROD de Engineering Solution to Lightning

2.2.3.2.5 MALLAS A TIERRA:

Las mallas a tierra son redes formadas por la unión de conductores horizontales, normalmente en direcciones perpendiculares y uniformemente espaciados, incluyendo eventualmente conductores verticales (Fig. 2.6).

Para efectuar un cálculo aproximado de su resistencia de puesta a tierra, se utiliza la expresión de Laurent:

$$R = \frac{\rho_e}{4\sqrt{S/\pi}} + \frac{\rho_e}{L} \quad [\Omega] \quad (2.4)$$

donde:

ρ_e : resistividad equivalente del terreno [$\Omega \cdot m$]

S : superficie que cubre la malla [m^2]

L : longitud total de conductor de la malla [m]

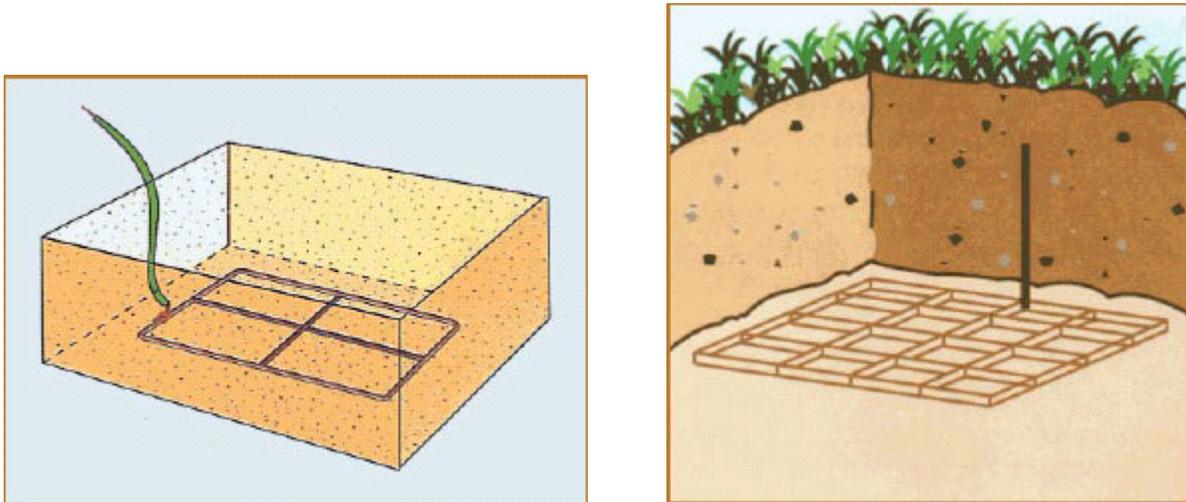


Fig. 2.6: Malla de Tierra^[20]

2.2.3.3 CONEXIONES:

La conexión es el medio mediante el cual se unen los electrodos de tierra a los conductores de acoplamiento, esta conexión debe ser mecánicamente robusta, tener buena resistencia a la corrosión y baja resistividad eléctrica.

El tipo de conector más frecuentemente usado es el de la unión exotérmica, que se basa en propiciar una fusión entre las partes de conductor a conectar mediante elevadas temperaturas, resultante de la reacción de una pólvora especial de óxido de cobre y aluminio dentro de un molde de grafito, logrando formar una unión molecular entre todos los hilos del conductor. En la Fig. 2.7 se muestran unos ejemplos de este tipo de conexión.

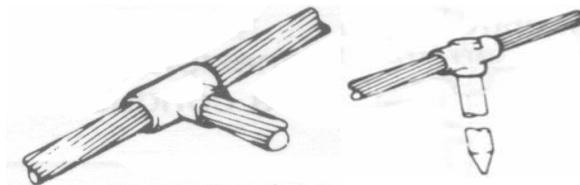


Fig. 2.7: Conexiones Exotérmicas
Tomado de Catálogo de conexiones de Conexweld

2.2.4 RESISTIVIDAD DE LOS SUELOS:

La resistividad ρ , es un parámetro característico de los medios conductores, su unidad en el sistema mks es el $\Omega \cdot m$, y se expresa por medio de^[8]:

$$\rho = \frac{R \cdot q}{l} \quad (2.5)$$

donde:

- R : resistencia eléctrica en Ω .
- q :sección transversal del conductor en m^2 .
- l :longitud del conductor en m .

Siendo también su inversa, la conductividad, σ , que es la propiedad de los cuerpos de transportar electricidad, su unidad es el Siemens por metro, S/m , y su expresión matemática es:

$$\sigma = \frac{G \cdot l}{q} \quad (2.6)$$

donde:

- G : conductancia eléctrica: $G = \frac{1}{R}$

La resistividad eléctrica ρ de cualquier sustancia se determina numéricamente por la resistencia que se obtiene en un cubo de un centímetro cúbico (1 cm^3) de dicha sustancia, Fig. 2.8 a la corriente eléctrica dirigida perpendicularmente de una de las aristas de ese cubo.

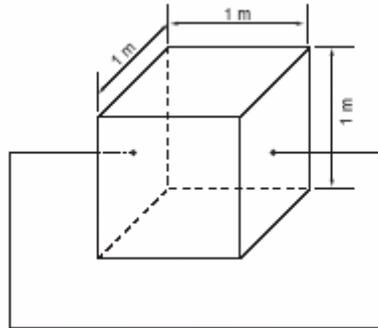


Fig. 2.8

En un medio conductor homogéneo, isotrópico, el valor de la resistividad es constante en cualquier punto y dirección del medio. En la realidad, esto no ocurre, y la naturaleza propia de la constitución del suelo al estar sometido a los efectos climáticos hacen, aun en el caso de tener un terreno constituido por un solo material, que existan variaciones de su resistividad respecto a la profundidad, principalmente por la variación del nivel freático y del grado de compactación del material.

La resistividad del suelo depende de:

- Tipo de suelo.
- Porcentaje de humedad.
- Composición química.
- Compactación del material.
- Temperatura.
- Estratificación del suelo.
- Mezcla de diferentes tipos de materiales.
- Variaciones estacionales.

En la tabla 2.1 se muestran valores típicos medidos que proporcionan valores orientativos:

Tabla 2.1^[10]

Naturaleza del Terreno	Resistividad en $\Omega.m$
Terrenos Pantanosos	De algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arenas arcillosas	50 a 500
Arena silíceas	200 a 300
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	80
Granitos y gres procedentes de alteración	1500 a 10000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600
Hormigón	2000 a 3000
Balasto o grava	3000 a 5000

2.2.4.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO.^[10]

Los suelos tienen conformación estratificada, con capas sobrepuestas de características conductivas propias (Fig. 2.9), esto gracias al transporte y acumulación de productos sólidos a través del tiempo.



Fig. 2.9: Ejemplo de Suelo Estratificado

Los elementos característicos más predominantes de los suelos, son el Silicio (Si) y el Aluminio (Al) en forma de óxidos hidratados, seguida de óxidos de Hierro (Fe) y Magnesio (Mg) y compuestos de Calcio (Ca), Sodio (Na) y Potasio (K), y pequeños porcentajes de sales solubles (entre 0,05 % y 2 %), dependiendo del promedio de humedad: en suelos secos <1 % y, en suelos arcillosos húmedos >15 %.

En su estado normal el suelo no es un buen conductor de la electricidad, sin embargo, la dispersión de la corriente permite una capacidad de conducción aceptable que depende de la porosidad del material que contiene la humedad y las sales solubles, también la resistividad del suelo se ve influenciada por varios factores que pueden hacerla variar, entre los más importantes se encuentran: la naturaleza del terreno, humedad, temperatura, salinidad, estratigrafía, compactación y las variaciones estacionales.

2.2.4.1.1 PORCENTAJE DE HUMEDAD:

El contenido de agua o porcentaje de humedad del terreno, influye de forma apreciable sobre la resistividad. Su valor no es constante, ya que varía con las estaciones

climatológicas, la época del año, naturaleza del subsuelo, la profundidad considerada y el nivel freático pero rara vez es nulo, incluso al referirse a zonas desérticas.

En la Fig. 2.10 se puede apreciar que a medida que el porcentaje de humedad se incrementa, la resistividad del terreno disminuye.

Su principal efecto es disolver las sales solubles, y a medida que el grado de humedad aumenta, la resistividad disminuye.

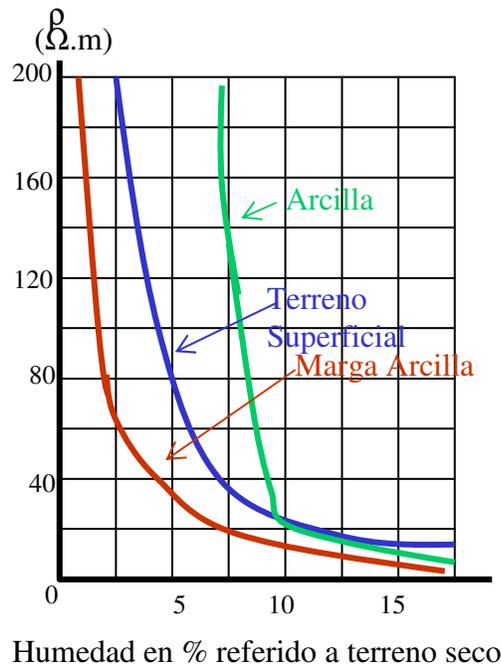


Fig. 2.10: Variación de la Resistividad debido al Porcentaje de Humedad^[10]

2.2.4.1.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA:

La composición química de los suelos se caracteriza por las sales disueltas y su concentración, esta composición puede variar naturalmente por efecto de las lluvias.

También puede hacerse una variación artificial de estos factores mediante la colocación de componentes adicionales, por ejemplo sal, en formas concentradas en puntos estratégicos en el terreno a tratar.

En la Fig. 2.11 se muestra como al incrementar la salinidad del terreno la resistividad disminuye.

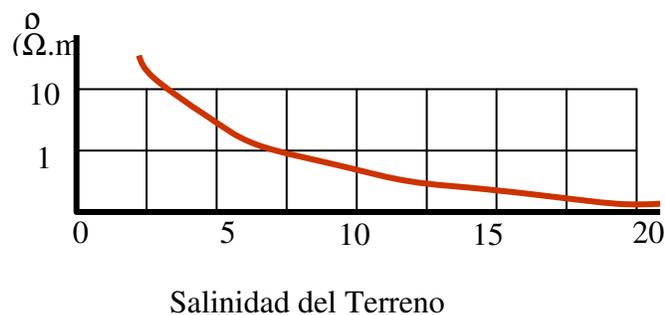


Fig. 2.11: Variación de la Salinidad del terreno.

2.2.4.1.3 COMPACTACIÓN DEL MATERIAL:

La resistividad también se ve afectada por el grado de compactación del terreno, disminuyendo al aumentar éste. Esto se debe a que un suelo más compacto presenta una mayor continuidad física, lo que en principio facilita una mejor conductividad, siempre y cuando se llegue a las capas de menor resistividad.

2.2.4.1.4 TEMPERATURA:

La resistividad del terreno aumenta a medida que desciende la temperatura, Fig. 2.12, y ese aumento es mucho mayor al alcanzar los 0°C, ya que al congelarse el agua que contiene,

desde el punto de vista eléctrico, la movilidad de los iones del terreno a través del agua se ve detenida.

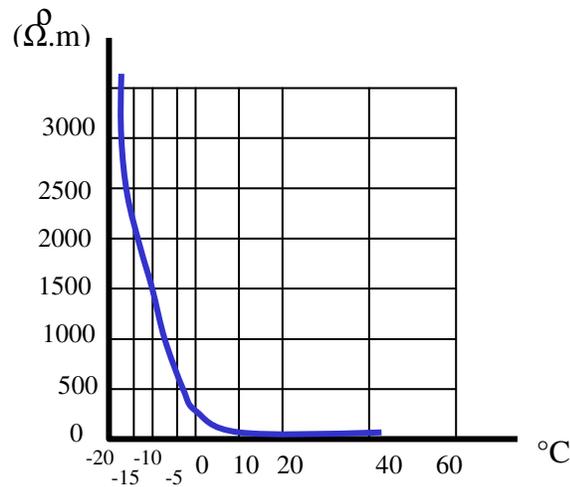


Fig. 2.12: Variación de la Resistividad debido a la Temperatura^[10]

2.2.4.1.5 ESTRATIFICACIÓN DEL SUELO:

La resistividad total de un terreno es la resultante de la combinación a las diversas capas que lo constituyan. Puede suceder que una sola capa presente una resistividad tan baja que la influencia de las demás sea imperceptible, tal como cuando alcanzan zonas de agua o el nivel freático. En la Fig. 2.13 se muestra un ejemplo de como se presenta un suelo multiestratificado.

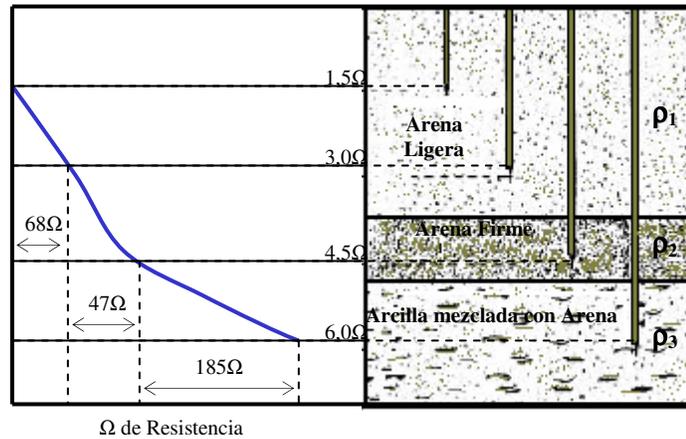


Fig. 2.13: Ejemplo de un terreno multiestratificado.

2.2.4.1.6 MEZCLA DE DIFERENTES TIPOS DE MATERIALES:

La mezcla de diferentes materiales influye sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad y también sobre la calidad del contacto con los electrodos, incrementándose la resistividad con el mayor tamaño de los granos. Esta es la razón de que el valor de la resistividad de la grava sea superior a la arena y que el de ésta sea superior al de la arcilla.

2.2.4.1.7 VARIACIONES ESTACIONALES:

En épocas de lluvia el nivel freático se aproxima a la superficie del terreno, presentando éste una resistividad menor que en el periodo de sequía.

Para conseguir mantener el valor de la resistividad lo más uniforme posible a lo largo del año, es conveniente instalar profundamente los electrodos en terreno y proteger lo más posible el terreno de la inclemencia del tiempo.

En la Fig. 2.14 se puede observar que en verano la resistividad es mayor que en invierno, y que los electrodos enterrados a más profundidad tienen unas variaciones estacionales inferior a la de los electrodos enterrados superficialmente.



Fig. 2.14: Variación de la Resistividad según las variaciones estacionales.

2.2.5 MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DE LOS SUELOS^[3]

La técnica básica utilizada en la determinación de la resistividad de los suelos es el método de la medición directa, el cual consiste en inyectar una corriente continua en la superficie del terreno entre dos electrodos y medir la tensión que aparece.

Es importante para la precisión de la medida que las dimensiones físicas de los electrodos utilizados en la determinación de la resistividad sean pequeñas comparadas con las distancias de separación entre ellos. La distancia de separación entre los electrodos depende de la amplitud de la zona en la cual se desea medir la resistividad. Si el subsuelo es uniforme, la resistividad medida es independiente de la separación de los electrodos utilizada en el ensayo. Sin embargo, en condiciones reales, a medida que aumenta la separación entre los electrodos las características del terreno varían y es habitual que la resistividad sea dependiente de la separación de los electrodos. En estos casos se define la resistividad aparente del terreno en función de la

separación de los electrodos. Con la información obtenida a partir de las medidas de resistividad aparente es posible realizar un modelo en estratos horizontales del terreno. Mediante las técnicas utilizadas en la estimación de estado se puede obtener una estimación paramétrica de las resistividades de todas las capas del modelo del terreno y de sus respectivos espesores.

2.2.5.1 MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD EN SUELOS UNIFORMES:

El método más difundido para medir la resistividad del subsuelo es el de Wenner, donde los electrodos de inyección de corriente y de medición de potencial se colocan alineados y equidistantes, siempre en el interior los electrodos de potencial separados una distancia “a”, y en el exterior los de inyección de corriente separados una distancia “3a” entre ellos:

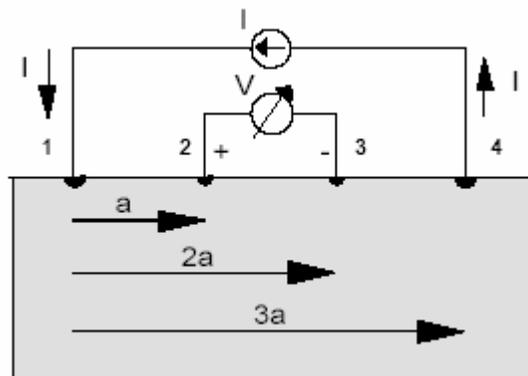


Fig. 2.15: Método de Wenner para la determinación de resistividades en terrenos uniformes^[3]

La resistividad ρ del terreno es:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot \frac{V_{23}}{I} \quad (2.7)$$

Otros métodos de medición utilizados en la práctica, se fundamentan en el mismo principio pero no mantienen equidistante los electrodos. Las ecuaciones para el cálculo de la resistividad

son más complejas pero estos sistemas pueden ofrecer ventajas cuando es difícil mantener constante la separación entre los electrodos.

Cuando se aplica el método de Wenner para el cálculo de la resistividad de un terreno no uniforme, los valores de resistividad obtenidos se denominan resistividades aparentes. La resistividad aparente del subsuelo permite identificar el número de capas, el espesor de cada una y sus resistividades respectivas. Esta expresión queda en este caso:

$$\rho_a(\rho_1, \rho_2, h, a) = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} \right] \right\} \quad (2.8)$$

donde k es el coeficiente de reflexión de los medios 1 y 2 definido mediante la expresión:

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (2.9)$$

2.2.5.2 MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD EN SUELOS MULTISTRATIFICADOS:

Para determinar la resistividad aparente en un terreno con varios estratos horizontales, se plantea la medición de cada una de las capas con diferente resistividad. Se establecen dos condiciones de contorno por cada superficie de separación entre capas, una para el potencial y otra para la densidad de corriente normal a la superficie. Así, para un terreno de n estratos se tienen $2n$ condiciones de contorno. Si se considera el aire como un medio más, existen $n+1$ zonas para el cálculo de potenciales y un número igual de soluciones generales, cada una con dos funciones indeterminadas que es necesario calcular. En definitiva se tienen $2(n+1)$ funciones indeterminadas, $2n$ ecuaciones de contorno y dos condiciones para garantizar que el potencial en el infinito es nulo.

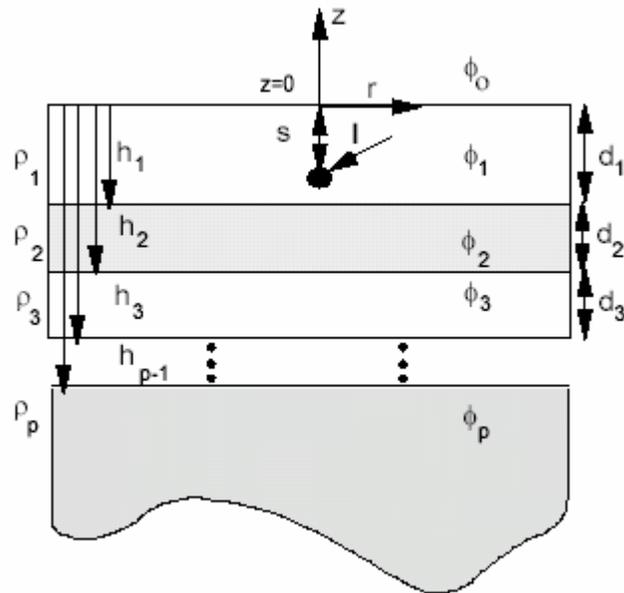


Fig. 2.16: Modelo multiestratificado del terreno^[3]

2.2.6 TRATAMIENTO DEL NEUTRO ^[15]

La más frecuente de las fallas que afronta un sistema de transmisión de energía, es la falla a tierra monofásica. En estas condiciones el tratamiento del neutro del sistema adquiere gran importancia, ya que su puesta a tierra o no, influye determinantemente en el diseño, planificación y operación del sistema.

2.2.6.1 NEUTRO FLOTANTE:

No existe una conexión a tierra formal intencional o deliberada. En caso de ocurrir una falla a tierra monofásica, el neutro adquiere el potencial $V_N = V/\sqrt{3}$ respecto a tierra, ya que la tensión de la fase fallada es de 0V, y manifiesta un desfase de 180° respecto a la fase afectada, como se muestra en la Fig. 2.17. Las tensiones de las fases sanas incrementan su valor en $\sqrt{3}$.

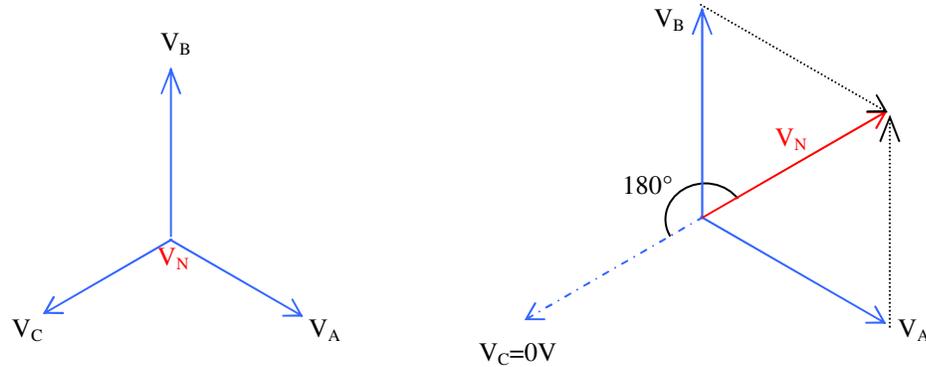


Fig. 2.17

La conexión a tierra flotante del neutro de un sistema de transmisión de energía conlleva a las siguientes ventajas y desventajas:

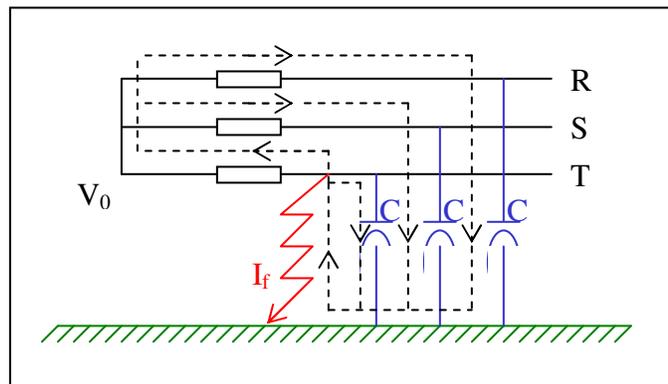


Fig. 2.18: Neutro Flotante

DESVENTAJAS:

1. En caso de falla a tierra monofásica, la tensión en las fases sanas se incrementa en $\sqrt{3}$. Esto limita esta práctica a sólo sistemas de tensiones intermedias (69, 115 y rara veces 230 kV), ya que el aislamiento se tiene que diseñar para ese valor.
2. La corriente de falla a tierra es de naturaleza capacitiva, esto es consecuencia de que la tensión en las fases sanas se incrementan en $\sqrt{3}$, lo cual puede conducir a reencendidos

del arco y desagradables sobretensiones. Esto obliga a reenganches selectivos rápidos, al tratar de despejar la falla por este medio.

3. La intensidad de corriente de la falla es asimétrica, en vista de lo cual se necesita la conexión aditiva de tres transformadores de corriente para su registro.

VENTAJAS:

1. Conexión a tierra sencilla y económica, pues no requiere ningún equipo entre el neutro y la tierra.
2. La tensión de paso y contacto no adquieren valores significativos, debido al relativamente bajo valor de la corriente de falla:

$$I_F = V_N \cdot 3 \cdot \omega \cdot C = \sqrt{3} \cdot V \cdot \omega \cdot C \quad (2.10)$$

donde:

- I_F : corriente de falla.
- V_N : tensión en el neutro.
- V : tensión entre fases.
- $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, donde f es la frecuencia del sistema.
- C : capacitancia presente en las fases.

2.2.6.2 CONEXIÓN A TIERRA INDUCTIVA:

La conexión a tierra inductiva del neutro, consiste en la interconexión de una bobina o reactor entre el centro eléctrico del sistema y tierra. Cuando la falla a tierra ocurre en cualquiera de las fases, el neutro del transformador adquiere el potencial $V_N = V/\sqrt{3}$ contra tierra, el cual obliga la circulación de una corriente inductiva entre la falla a tierra y la bobina (bobina de Petersen, 1916). La bobina, que tiene un entrehierro variable y tomas múltiples (taps), hace posible una compensación automática bastante satisfactoria entre la intensidad de corriente

inductiva, suministrada por la bobina, y la capacitiva, generada por la falla. Debido al desfase existente, ambas intensidades de corriente se cancelan.

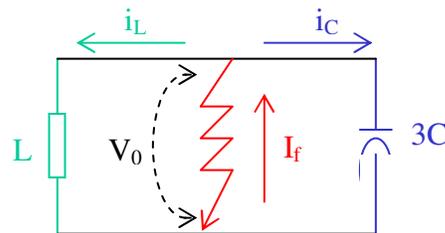


Fig. 2.19: Circuito de Resonancia.
Simulación de Resonancia

VENTAJAS:

1. La bobina Petersen actúa en forma inmediata, sin retraso alguno. Si el centro eléctrico del sistema se desplaza hacia una de las fases afectadas, ella inyecta una intensidad de corriente inductiva en el mismo.
2. Extinción automática de la falla a tierra en un tiempo relativamente corto (0,01 a 0,8 s).
3. La tensión en las fases sanas, una vez despejada la falla, se reestablece lentamente, sin incrementos dinámicos o bruscos, ya que el centro eléctrico del sistema retorna lentamente a su punto de partida.
4. En condiciones de falla monofásica el sistema se puede operar por espacio de horas, aun cuando persista la falla.
5. La bobina Petersen permite derivar a tierra cargas estáticas acumuladas en el sistema, lo que resulta imposible con el neutro flotante.
6. En el lugar de la falla, la tensión de paso y toque no adquieren valores peligrosos, debido a la compensación de la corriente. Esto simplifica el diseño de las conexiones a tierra de patios, estructuras, torres, entre otras.
7. La bobina de Petersen elimina la posibilidad de la falla a tierra intermitente por reencendido del arco eléctrico.

DESVENTAJAS:

1. Durante la falla a tierra, las tensiones en las fases sanas incrementan su valor en $\sqrt{3}$. Esto limita la implementación de este tipo de conexión a tierra sólo a sistemas de tensiones intermedias, ya que de lo contrario resultaría antieconómico.
2. Este tipo de aterramiento demanda la incorporación al sistema de un equipo adicional, no necesariamente barato, además de ocupar un espacio determinado en la subestación, no siempre disponibles.
3. La compensación no se lleva a cabo completamente. Esto no necesariamente es una desventaja, ya que la corriente residual (componente activa) sirve para registrar o ubicar la falla en el sistema. El elevado valor en sistemas extensos y muy mallados sí limita la aplicación de este tipo de conexión a tierra, pues restringen su efectividad.

2.2.6.3 CONEXIÓN RÍGIDA A TIERRA:

Es una conexión inmediata del neutro con tierra, sin intercalar ningún elemento reactivo o estrictamente óhmico entre éste y tierra.

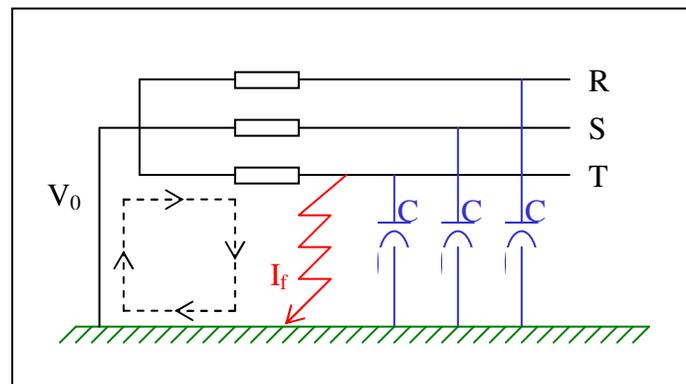


Fig. 2.20: Conexión Rígida a Tierra

Este tipo de conexión a tierra es muy utilizado en los sistemas de extra y ultra alta tensión, ya que en caso de una falla a tierra la tensión de las fases sanas no se incrementa en $\sqrt{3}$.

En vista de que el centro eléctrico del sistema y tierra denotan el mismo potencial, al ocurrir una falla a tierra, en cualquiera de las fases, el centro eléctrico no se desplaza hacia la fase afectada, lo que implica que la falla a tierra venga siendo un corto circuito.

VENTAJAS:

1. La tensión de las fases sanas, al ocurrir una falla monofásica (la más frecuente de todas las fallas), no incrementa su valor en $\sqrt{3}$.
2. No se necesita equipos o dispositivos adicionales para llevar a cabo este tipo de conexión a tierra, pues basta con unir adecuadamente al neutro de los transformadores con tierra.
3. La falla a tierra se despaja como un corto circuito, lo cual simplifica el diseño de la protección del sistema.

DESVENTAJAS:

1. La intensidad de corriente de falla a tierra puede alcanzar valores considerables, en particular en sistemas muy extensos y mallados. Esto demanda una conexión a tierra mucho más costosa.

$$I_F = \frac{3 \cdot E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (2.11)$$

donde:

- E_a : FEM del conductor fallado.
 - Z_1, Z_2, Z_0 : reactancias de secuencias positiva, negativa y cero, respectivamente.
2. Como consecuencia de lo anterior, las tensiones de paso y toque alcanzan igualmente valores muy altos, lo que exige la incorporación de conexiones a tierra con capacidad de regulación de potencial mucho más costoso que los convencionales.

2.2.6.4 CONEXIÓN A TIERRA SEMI-RÍGIDA:

Es una conexión a tierra mediante una resistencia de relativamente bajo valor óhmico entre el neutro y tierra.

La finalidad principal de esta medida es combatir el incremento de tensión de las fases sanas al ocurrir la falla a tierra, pero limitando al mismo tiempo la intensidad de corriente de falla. El centro eléctrico del sistema (neutro) sufre un desplazamiento respecto a su posición de descanso, en caso de simetría, y la tensión en las fases sanas se incrementa ligeramente ($I \cdot R$).

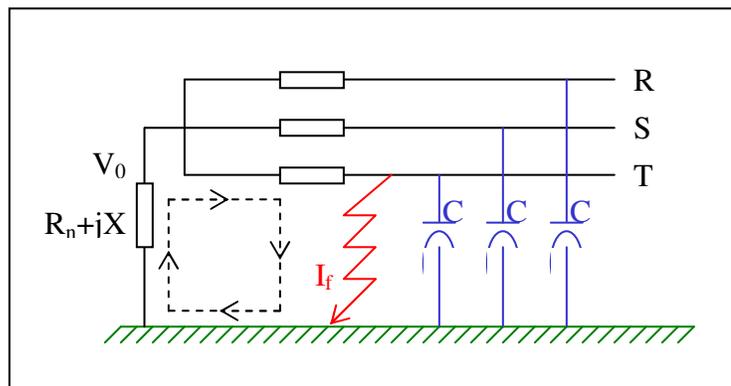


Fig. 2.21: Conexión Semi-rígida a Tierra

Esta modalidad de conexión a tierra del neutro del sistema conlleva a que la protección vea la falla como un corto circuito, el cual se despeja entonces de forma selectiva. También el porcentaje óhmico se le superpone en el lugar de la falla al porcentaje capacitivo de la corriente de falla, la cual deja de tener un desfase de 90° respecto a la tensión. El reencendido del arco eléctrico por este concepto se dificulta.

2.2.7 EFECTOS FISIOLÓGICOS:

Los efectos fisiológicos que produce la corriente eléctrica en el organismo humano, dependen de:

- Camino de circulación de la corriente y distribución de la misma dentro del cuerpo humano.
- Intensidad de la corriente.
- Tiempo de circulación de la corriente en el cuerpo humano.
- Tipo de onda de la corriente: impulso (rayo), corriente alterna, corriente continua.
- Nivel de voltaje aplicado para la circulación de la corriente.
- Humedad de la piel y superficie de contacto con los caminos de circulación de la corriente, externos al cuerpo humano.
- Condiciones orgánicas de la persona bajo el efecto de la corriente eléctrica.

La corriente eléctrica provoca la muerte por fibrilación ventricular, al contrario de la de alta tensión, que lo hace por la destrucción de los órganos o por asfixia, debido al bloqueo del sistema nervioso.

En la tabla 2.2 se resumen los efectos fisiológicos sobre el cuerpo humano según la intensidad y la forma de onda:

La IEEE Std. 80 sugiere como criterio los siguientes valores para el efecto de la corriente en el cuerpo humano:

- 1 mA : Nivel de percepción, ligera sensación de hormigueo.
- $1\text{-}6\text{ mA}$: Desagradable. No se pierde el control muscular.
- $9\text{-}25\text{ mA}$: Dolor. Dificultad o imposibilidad de soltar un objeto energizado agarrado con la mano.
- $25\text{-}60\text{ mA}$: Aparecen contracciones musculares que pueden dificultar la respiración.

Excepto en caso de paro respiratorio, los efectos desaparecen cuando la corriente se

interrumpe. Cuando existe para respiratorio con técnicas de resucitación se puede salvar la persona.

- 60-100 mA : Puede ocurrir fibrilación ventricular, paro cardíaco, paro respiratorio. Los daños causados son severos y puede morir la persona.

Tabla 2.2^[5]

Efecto sobre la persona	Corriente en mA					
	Corriente continua		Corriente alterna onda senoidal			
	Hombres	Mujeres	60 Hz		100 kHz	
Hombres			Mujeres	Hombres	Mujeres	
Sin sensación en la mano	1,0	0,6	0,4	0,3	7,0	5,0
Hormiguea ligero nivel de percepción	5,2	3,5	1,1	0,7	12,0	8,0
Choque no doloroso, no se pierde el control muscular	9,0	6,0	1,8	1,2	17,0	11,0
Choque doloroso. Dolor sin perder el control muscular.	62,0	41,0	9,0	6,0	55,0	37,0
Choque doloroso. Se imposibilita soltar un objeto energizado	76,0	51,0	16,0	10,5	75,0	50,0
Dolor. Choque severo. Contracción muscular. Dificultad para respirar.	90,0	60,0	23,0	15,0	94,0	63,0
Posible fibrilación ventricular debido a choque de corto tiempo.						
Duración de choque 0,3 s	1.300,0	1.300,0	1.000,0	1.000,0	1.100,0	1.100,0
Duración de choque 3,0 s	500,0	500,0	100,0	100,0	500,0	500,0

Debido a la naturaleza aleatoria de las variables que limitan la corriente por el cuerpo humano en una situación de riesgo, se hace difícil establecer un valor máximo de voltaje permitido. Por esta razón los criterios de riesgo para las personas están definidos por valores de corriente.

2.2.8 TENSIONES DE PASO Y CONTACTO^[1]

Dentro del diseño de un sistema de puesta a tierra, las normativas vigentes han establecido que se debe conocer dos variables de suma importancia, las *tensiones de paso y contacto*, estas variables establecen si el sistema de puesta a tierra es aceptable o no, al compararlas con valores máximos permisibles. Estos valores máximos permisibles tienen como fundamento impedir daños al cuerpo humano por el paso de corriente y toman como elementos de cálculo a la magnitud y duración de la corriente de corto circuito.

2.2.8.1 TENSIÓN DE PASO:

Es la diferencia de potencial entre dos puntos de la superficie del terreno, separados por una distancia de un paso, que se asume a un metro (1m), en la dirección del gradiente de potencial máximo.

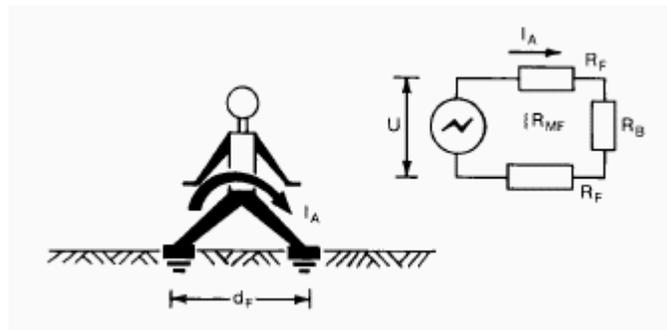


Fig. 2.22: Circuito equivalente de la tensión de paso^[1]

2.2.8.2 TENSION DE CONTACTO:

Es la diferencia de potencial entre una estructura metálica puesta a tierra y un punto de la superficie del terreno a una distancia horizontal máxima que se pueda alcanzar, o sea, aproximadamente de un metro (1m).

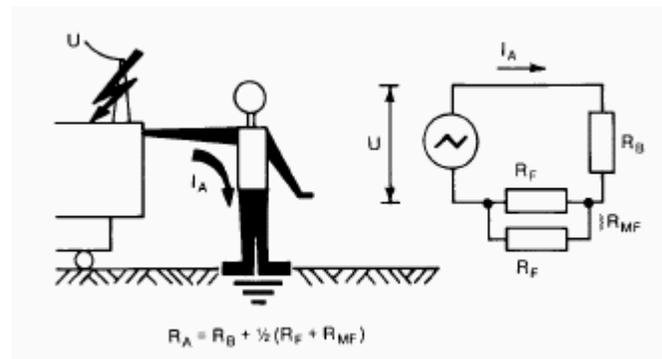


Fig. 2.23: Circuito equivalente de la tensión de toque^[1]

2.2.9 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA^[18]:

La etapa que constituye la verdadera validación del diseño de la instalación del sistema de puesta a tierra. Es la medición de la resistencia del sistema.

2.2.9.1 MÉTODO GENERAL (voltaje, frecuencia y corriente usadas normalmente):

La resistencia de una barra de tierra generalmente es determinada con corriente alterna o corriente continua alternada periódicamente para evitar la polarización de las barras causado por la corriente alterna.

El conocimiento de la frecuencia de medición permite al equipo descartar o neutralizar las tensiones perturbadoras que se acerquen con igual frecuencia, con la tensión generada por el instrumento.

La magnitud de las corrientes utilizadas va desde los pocos miliamperes hasta cientos de miliamperes para sistemas instalados en zonas urbanas, para tratar de evitar posibles potenciales transferidos que son peligrosos para las personas que se encuentren cerca al área del sistema.

Para grandes subestaciones ubicadas fuera de zonas urbanas, donde las posibilidades de potenciales transferidos son mínimas, se pueden inyectar corrientes del orden de decenas de amperes.

2.2.9.2 MÉTODOS DE LOS DOS PUNTOS:

Mide el total de la resistencia en estudio mas la resistencia de un electrodo auxiliar. Generalmente este método se utiliza para determinar la resistencia de un electrodo simple en un área residencial donde exista un sistema de suministro de agua que utiliza tuberías metálicas sin conexiones o aislantes plásticos (electrodo auxiliar). La resistencia de las tuberías metálicas se asume muy pequeña, alrededor de 1Ω , en comparación con la resistencia máxima permitida para un electrodo simple que es alrededor de 25Ω .

Este método presenta algunos inconvenientes, tales como el hecho de que muchos de los sistemas de suministro de agua son hechos por medio de tuberías plásticas, por lo que se hace más difícil conseguir una tierra auxiliar. Además, el método de los dos puntos puede llevar a grandes errores cuando se intenta medir la resistencia de un electrodo simple de pocos Ω , pero puede dar una idea de la resistencia del sistema en estudio.

2.2.9.3 MÉTODO DE LOS TRES PUNTOS:

En este método se usan dos electrodos auxiliares con resistencias R_y y R_z respectivamente, y se colocan de tal manera que formen un triángulo junto con el electrodo en estudio. Se miden las resistencias entre cada electrodo y los otros dos y se calcula la resistencia del electrodo en estudio, R_x , mediante la siguiente fórmula:

$$R_x = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2} \quad (2.12)$$

donde R_1 , R_2 y R_3 se determinan de la siguiente sistema de ecuaciones:

$$(2.13)$$

$$R_1 = R_x + R_y + 0$$

$$R_2 = R_x + 0 + R_z \quad (2.14)$$

$$R_3 = 0 + R_y + R_z \quad (2.15)$$

Para obtener mejores resultados, se trata de utilizar electrodos auxiliares con resistencia similar al electrodo en estudio. Así como también se trata de clavar los electrodos auxiliares de tal modo que queden todos los electrodos lo suficientemente alejados y no se solapen las áreas de influencia de la resistencia de cada uno y evitar resultados absurdos. Se recomienda una distancia de $8m$ o más.

Una de las desventajas de este método, es que existe influencia de los objetos metálicos que están enterrados y no existe forma de evitar dicha influencia. Tampoco es efectivo a la hora de evaluar valores bajos de resistencia o valores muy altos de resistividad del terreno. Otra desventaja es que considera el terreno homogéneo. Sin embargo, puede ser útil cuando hay limitaciones de espacio.

2.2.9.4 MÉTODO DE LA CAÍDA DE POTENCIAL:

Este método consiste en inyectar una corriente a través de un electrodo de prueba denominado de corriente y medir el alza de potencial mediante otro electrodo de potencial denominado de potencial. Conocido el valor del potencial y el valor de la corriente se obtiene el valor de la resistencia por medio de la ley de Ohm. Los tres electrodos se mantienen en una línea recta y se va corriendo el electrodo de potencial hacia el electrodo de corriente para tomar sucesivas mediciones de resistencia. Para realizar las mediciones se utiliza el Megger.

2.2.7.5 MÉTODO DE LA PENDIENTE:

Este método es utilizado para sistema de puesta a tierra grandes, o cuando el centro de la puesta de tierra no es conocido ni accesible (por ejemplo, el sistema está por debajo del suelo de un edificio). También se utiliza cuando los resultados de otros métodos no son razonables, y es más preciso.

La conexión del equipo de medición es similar al método de la caída de potencial, con la diferencia de que se hace un barrido más completo con el electrodo de potencial, entre el electrodo de puesta a tierra bajo estudio y el electrodo de corriente.

Se realiza una medición de resistencia en cada posición del electrodo de potencial y los resultados se grafican (resistencia en función de la distancia del electrodo de potencial). De la gráfica se toman el valor de tres posiciones, que son el valor de las resistencias medidas, y se llaman R_1 , R_2 y R_3 respectivamente y con ello se calcula el coeficiente de la pendiente μ :

$$\mu = \frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1} \quad (2.16)$$

que es una medida del cambio de la pendiente de la curva de resistencia del electrodo de puesta a tierra bajo estudio.

*C
A
P
Í
T
U
L
O

I
I
I*

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1 MÉTODO DE HOWE:

La metodología que se plantea en este trabajo, se basa en el método Howe, muy extendido dentro de la comunidad Europea, el cual analiza y cuantifica el comportamiento de un electrodo al disipar una corriente en un medio infinito y homogéneo, suponiendo que la corriente se distribuye proporcionalmente por la longitud del electrodo^{[7] [14]}.

Esta metodología, consiste en elegir una de las “*configuraciones tipo*”, que son arreglos geométricos formados por conductores unidos a electrodos de tierra. En la Fig. 3.1 se puede observar algunas de dichas configuraciones tipo.

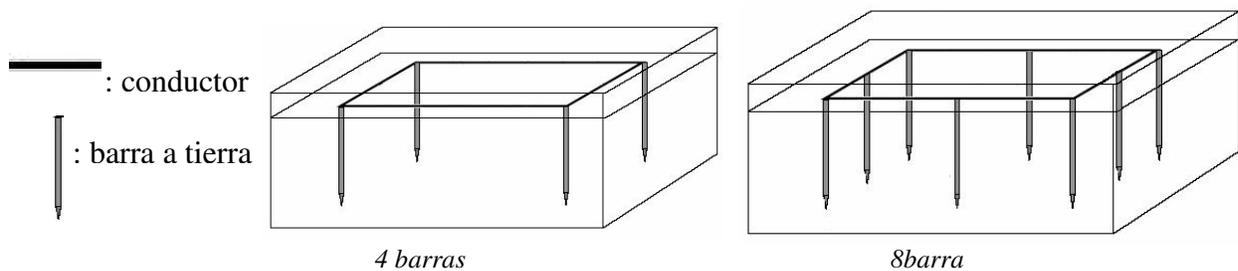


Fig. 3.1: Ejemplos de configuraciones tipo

En cada una de estas configuraciones se calculan parámetros característicos que son denominados “valores unitarios”, k_r , k_p y k_c , para poder realizar el cálculo de la resistencia de puesta a tierra R_t , y las tensiones de paso y contacto, V_c y V_p . Estos valores unitarios son calculados en base a la resistividad del terreno, ρ , y a la corriente de falla, I_f , y considerando que están enterradas a 0,5 m o 0,8 m

En Europa, ya están tabuladas unas configuraciones tipo, donde los cálculos de los valores unitarios fueron hechos para elementos de dimensiones que sólo son utilizados en esa región, por

lo que dichos valores unitarios no son los adecuados para calcular un sistema de puesta a tierra en Venezuela, ya que aquí se utilizan elementos con dimensiones distintas a las usadas en Europa.

Las configuraciones tipos que se presentan en este trabajo, fueron calculadas tomando en cuenta las dimensiones de los elementos existentes en el país, como lo son conductores para la malla y de acople con secciones desde 2 hasta 4/0 AWG/MCM, y barras de puesta a tierra con longitud de 2,4 m, y diámetro de 5/8". Para cada una de estas configuraciones también se considera dos profundidades para enterrar el sistema de puesta a tierra, de 0,5 m y 0,8 m.

El cálculo de los valores unitarios, k_r , k_p y k_c , fueron hechas con la ayuda de computador para poder facilitar dichos cálculos. En los anexos se muestra un ejemplo de cálculo manual de los valores unitarios correspondientes a una configuración tipo, con el fin de ejemplificar el procedimiento.

Véase en la tabla 3.1 un ejemplo donde se muestran los valores unitarios, k_r , k_p y k_c , para un sistema de puesta a tierra calculadas con conductores calibre 4/0 AWG/MCM y barras a tierra 5/8" de diámetro y 2,4 m de longitud, con dos opciones a ser enterrados, 0,5 m y 0,8 m. En los anexos se presentan otras configuraciones tipos que son aptos para el cálculo de sistemas de puesta a tierra en Venezuela.

Tabla 3.1



Cuadrado de 2 x 2 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,128	0,0315	0,0670
8 barras	2,4	0,101	0,0270	0,0417

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,119	0,0218	0,0614
8 barras	2,4	0,096	0,0192	0,0408

Si se diera el caso donde la geometría del terreno en donde se va a la subestación, no coincide con las configuraciones tipo presentadas en los anexos, por lo que se debe seleccionar la configuración tipo con medidas inmediatamente inferiores a la deseada, ya que si la resistencia de puesta a tierra y las tensiones de paso y contacto calculadas con esta configuración cumplen la verificación final del sistema de puesta a tierra, con mayor razón las cumplirá la configuración real a construir, ya que al ser de mayores dimensiones, presentará una menor resistencia de puesta a tierra y una mejor disipación de las corrientes de defecto., porque los valores unitarios de cada una de las configuraciones son inversamente proporcionales a la longitud del elemento.

Para una mejor comprensión se presenta al final de este capítulo, un diagrama de flujo donde se expone de forma simple la metodología planteada.

3.1.1 CÁLCULO DE LOS VALORES UNITARIOS k_r , k_p y k_c :

Los valores unitarios (k_r , k_p y k_c), que se muestran en las diferentes configuraciones presentadas en los anexos, se calculan a partir de variables tales como la sección de los conductores de las malla y acople que van desde 2 hasta 4/0 AWG/MCM, así como también el número, longitud y diámetro de las barras de puesta a tierra (2,4 m y 5/8'' de diámetro).

A continuación se detalla el método de cálculo de dichos valores unitarios k_r , k_p y k_c .

3.1.1.1 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA UNITARIA k_r :

Del método Howe se tiene que la resistencia unitaria k_r viene dada por la siguiente expresión:

$$k_r = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=2n} A_{ij} \cdot l_j}{n \cdot \sum_{i=1}^{i=n} l_i} \quad (3.1)$$

donde:

- k_r : resistencia “unitaria” que es sólo función del diámetro y la longitud del elemento, en $\Omega/(\Omega \cdot m)$.
- A_{ij} : coeficiente de influencia entre los elementos i -ésima y j -ésima, que sólo es función de la geometría del electrodo.
- l_j : longitud del elemento j -ésima.
- l_i : longitud del elemento i -ésima.

3.1.1.1.1 DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES A_{ij} :

Para la determinación del coeficiente A_{ij} , se supone que el elemento a estudiar está compuesto por infinitas esferas diferenciales que disipan corriente.

Si se cumple que todos los elementos de la configuración son paralelos a algunos de los ejes de un sistema coordenado cartesiano ficticio, puede plantearse tres ecuaciones genéricas para la determinación de los correspondientes coeficientes A_{ij} .

a. Coeficiente auto-influencia A_{ii} :

$$A_{ii} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot l_i} \cdot \text{Ln} \left(\frac{2 \cdot l_i}{d_i} \right) \quad (3.2)$$

donde:

- l_i : longitud del elemento en m .
- d_i : diámetro del elemento en m .

b. Coeficientes de influencia entre conductores paralelos:

$$A_{jk} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot l_j \cdot l_k} [F(x_4, x_1) + F(x_3, x_2) - F(x_3, x_1) - F(x_4, x_2)] \quad (3.3)$$

donde:

$$F(A, B) = (A - B) \cdot \text{Senh}^{-1} \left(\frac{A - B}{Y_k - Y_j} \right) - \sqrt{(Y_k - Y_j)^2 + (A - B)^2}$$

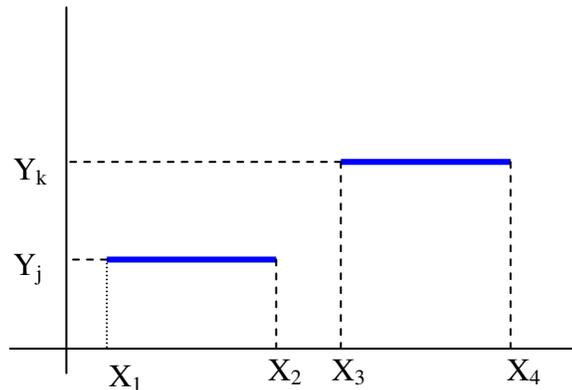


Fig. 3.2: Conductores paralelos

c. Coeficiente de influencia entre conductores perpendiculares:

$$A_{jk} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot l_j \cdot l_k} [F(x_1, y_1) + F(x_2, y_2) - F(x_1, y_2) - F(x_2, y_1)] \quad (3.4)$$

donde:

$$F(A, B) = (B - Y_j) \cdot \text{Ln}[M(A, B)] + (A - X_k) \cdot \text{Ln}[N(A, B)] + 2 \cdot (Z_k - Z_j) \cdot \text{tg}^{-1}[O(A, B)]$$

$$M(A, B) = M_1 + \sqrt{(M_1)^2 + 1}$$

donde:

$$M_1 = \frac{A - X_k}{\sqrt{(B - Y_j)^2 + (Z_k - Z_j)^2}}$$

$$N(A, B) = N_1 + \sqrt{(N_1)^2 + 1}$$

donde:

$$N_1 = \frac{B - Y_j}{\sqrt{(A - X_k)^2 + (Z_k - Z_j)^2}}$$

$$O(A, B) = \frac{1}{Z_k - Z_j} \cdot \left[B - Y_j + A - X_k + \sqrt{(A - X_k)^2 + (B - Y_j)^2 + (Z_k - Z_j)^2} \right]$$

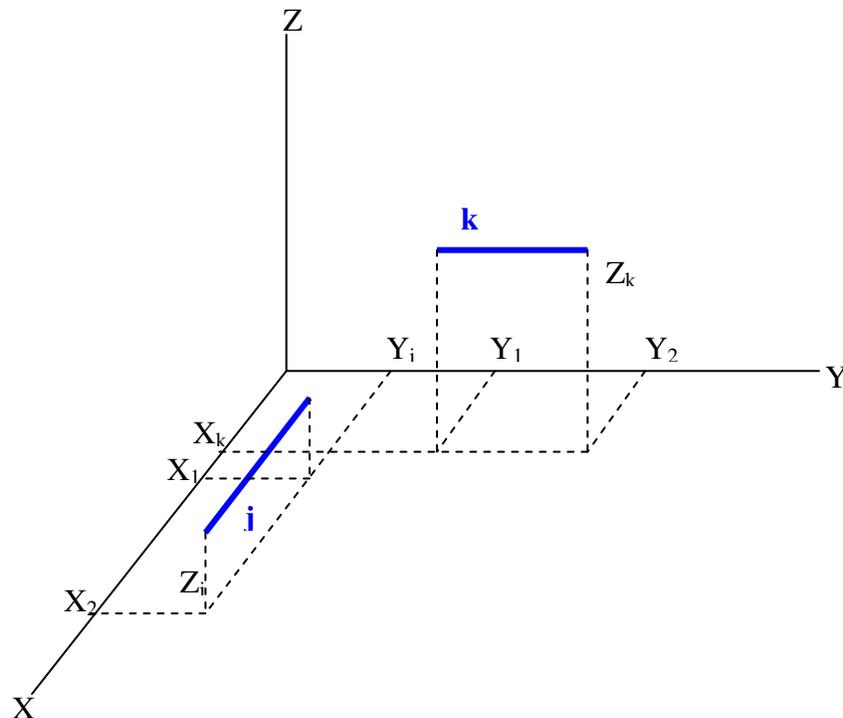


Fig. 3.3: Conductores perpendiculares

3.1.1.2 DETERMINACIÓN DE LAS TENSIONES UNITARIAS DE PASO Y CONTACTO k_p

Y k_c :

Para calcular las tensiones unitarias de paso y contacto, se necesita calcular el potencial absoluto en un punto cualquiera de la superficie del terreno, como la suma de los potenciales creado por el paso de corriente a cada elemento del diseño de puesta a tierra.

El potencial absoluto se determina situando un elemento lineal en un eje de coordenadas cartesiano ficticio, Fig. 3.4, paralelo al eje coordenado Z, situado entre los puntos (X_1, Y_1, Z_1) y (X_2, Y_2, Z_2) y dividiéndolo en infinitas esferas diferenciales e integrando.

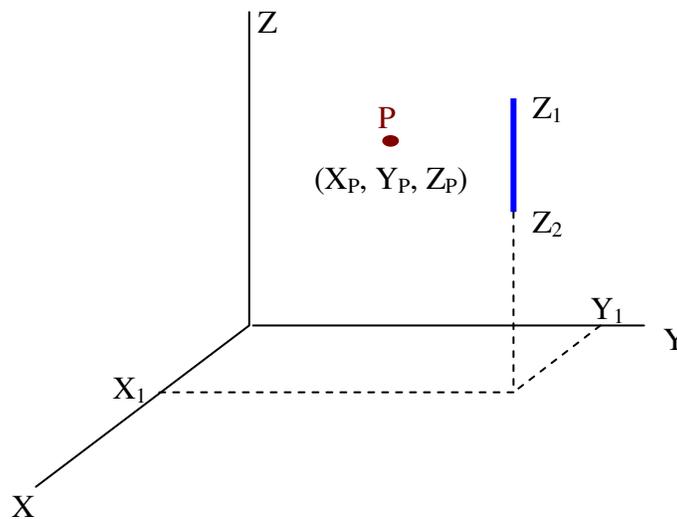


Fig. 3.4: Determinación del potencial absoluto

Por lo que el potencial creado por el elemento i -ésimo en un punto P de coordenadas (X_P, Y_P, Z_P) , se determina mediante la siguiente expresión:

$$V_P = \frac{\rho \cdot I_f}{4 \cdot \pi} \int_{Z=Z_1}^{Z=Z_2} \frac{dZ}{\sqrt{(X_P - X_1)^2 + (Y_P - Y_1)^2 + (Z_P - Z_1)^2}} \quad (3.5)$$

resolviendo la integral se obtiene:

$$V_p = \frac{\rho \cdot I_f}{4 \cdot \pi} \left[\operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{Z_2 - Z_p}{\sqrt{(X_p - X_1)^2 + (Y_p - Y_1)^2}} \right) - \operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{Z_1 - Z_p}{\sqrt{(X_p - X_1)^2 + (Y_p - Y_1)^2}} \right) \right]$$

donde:

- V_p : potencial absoluto en el elemento.
- ρ : resistividad del terreno.
- I_f : corriente de falla que pasa por el elemento i -ésimo.

Relaciones análogas se puede establecer para elemento paralelos a los otros ejes coordenados.

De donde se tiene que:

$$k_{xi} = \frac{1}{4 \cdot \pi} \left[\operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{Z_2 - Z_p}{\sqrt{(X_p - X_1)^2 + (Y_p - Y_1)^2}} \right) - \operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{Z_1 - Z_p}{\sqrt{(X_p - X_1)^2 + (Y_p - Y_1)^2}} \right) \right] \quad (3.6)$$

$$k_x = \sum_{i=1}^{i=2n} k_{xi} \quad (3.7)$$

- k_x : potencial “unitario” que es sólo función de la longitud del elemento y de la distancia de punto P , en $V/(\Omega \cdot m \cdot A)$.

Con este valor de k_x , junto con la resistencia unitaria k_r , se obtienen los valores unitarios de las tensiones de paso y contacto k_p y k_c :

$$k_p = k_{x1} - k_{x2} \quad (3.8)$$

$$k_c = k_r - k_{x1} \quad (3.9)$$

donde:

- k_p : tensión “unitaria” de paso, en $V/(\Omega \cdot m \cdot A)$.
- k_c : tensión “unitaria” de contacto, en $V/(\Omega \cdot m \cdot A)$.

La tensión unitaria de paso se determina como la diferencia de potencial entre dos puntos de la superficie separados 1m, y la tensión unitaria de contacto se calcula como la diferencia de potencial entre un punto cualquiera de la superficie y el potencial del electrodo.

3.2 DISEÑO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA:

Para el diseño de puesta a tierra de una subestación se procede de la siguiente manera:

3.2.1 TIEMPO MÁXIMO DE DURACIÓN DE LA FALLA:

Cuando se produce una falla a tierra los efectos térmicos y mecánicos sobre los equipos que conforman una subestación, pueden llegar a ser muy destructivos, por lo que su eliminación mediante equipos que despejen dichas fallas, debe ser lo más rápido posible para así limitar sus efectos dañinos.

En media tensión los equipos más utilizados para realizar dicho despeje en las redes son: fusibles, reconectores y seccionadores, y en las subestaciones interruptores o reconectores.

El tiempo máximo que se considera, es el tiempo máximo de actuación de los equipos de despeje usado.

3.2.2 CÁLCULO DE LA SECCIÓN MÍNIMA DEL CONDUCTOR^[2]:

Para el cálculo de la sección mínima del conductor de acople, se va a utilizar la versión resumida de la ecuación de Sverak:

$$A_{cmil} = \frac{kVA \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot V_{BT}} \cdot \frac{100\%}{Z\%} \cdot K_f \cdot \sqrt{t} \quad (3.10)$$

donde:

- A_{cmil} : área del conductor en *cmil*.
- kVA : capacidad de la subestación.
- V_{BT} : voltaje entre fases en el lado de baja tensión en V.
- $Z\%$: impedancia del transformador en %.
- K_f : constante obtenida en la tabla 3.2
- t : tiempo de duración de la falla.

Tabla 3.2^[1]

Material	Conductividad (%)	T_m^a (°C)	K_F
Cobre Blando Trenzado	100,0	1083	7,00
Cobre Endurecido Trenzado	97,0	1084	7,06
Copperweld 40%	40,0	1084	10,45
Copperweld 30%	30,0	1084	12,06
Aluminum 6201 Alloy	52,5	654	12,47

A continuación se presenta la tabla 3.3, con los valores correspondientes de calibres de conductores redondos clase B:

Tabla 3.3^[11]

Calibre AWG	Sección	
	CM	mm ²
2	66.370	33,82
1/0	105.500	53,49
2/0	133.100	67,43
3/0	167.800	85,01
4/0	211.600	107,20

3.2.3 CÁLCULO DE LA CORRIENTE DE FALLA^[2]:

El aspecto más importante que se debe tener en cuenta para el cálculo de la corriente de falla, es el tratamiento que se le da al neutro del transformador, ya que si existe una conexión a tierra la corriente de falla puede alcanzar valores considerables, y si por el contrario el neutro del transformador no está conectado a tierra la corriente es relativamente baja de naturaleza capacitivas, que están asociadas entre las partes energizadas y el terreno.

En la metodología planteada se va a considerar una barra infinita, ya que no se conoce la impedancia característica desde la fuente a la subestación. Con esta consideración se asegura que la corriente de falla a calcular va a ser superior a la que realmente es, ya que una *barra infinita* tiene una impedancia equivalente igual a cero y una tensión constante.

La corriente de falla simétrica máxima según la norma ANSI/IEEE 141-1986, es:

$$I_f = \frac{100\%}{Z\%} \cdot \frac{kVA \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot V_{AT}} \text{K A} \quad (3.11)$$

donde:

- $Z\%$: impedancia del transformador en %.
- kVA : capacidad de la subestación.
- V_{AT} : voltaje entre fases en el lado de alta tensión en V .

3.2.4 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA:

La resistencia de puesta a tierra, es la resistencia que existe entre el sistema de puesta a tierra (malla a tierra) y un punto lejano del terreno a potencial cero:

$$I_f \cdot R_t \leq U_{BT} \text{ K } [\Omega] \quad (3.12)$$

donde:

- R_t : resistencia de puesta a tierra.
- U_{BT} : nivel de aislamiento baja tensión.
- I_f : corriente de cortocircuito.

3.2.5 SELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN TIPO PARA EL DISEÑO DE PUESTA A TIERRA:

La configuraciones tipo que se utilizan para la selección del diseño del sistema de puesta a tierra, está constituido por elementos de geometría simple, como por ejemplo, una o más barras a tierra y uno o varios conductores horizontales. Dichas configuraciones se expresa en valores “unitarios” que se calculan según el método de Howe anteriormente señalado.

Para la selección de la configuración, se calcularon una serie de tablas que se presentan en los anexos, aplicables en el país, para diferentes geometrías de diseño, donde se especifican los siguientes parámetros, expresados en los valores “unitarios” indicados:

- k_r en $\Omega/(\Omega \cdot m)$: resistencia unitaria de puesta a tierra.
- k_p en $V/(\Omega \cdot m) \cdot (A)$: tensión unitaria de paso máxima.
- k_c en $V/(\Omega \cdot m) \cdot (A)$: tensión unitaria de contacto exterior máxima, que va a ser igual a $k_{p(acc)}$.

Con la resistencia de tierra ya calculada con (3.13), se selecciona en las tablas (anexo), la configuración donde k_r sea menor o igual a la resistencia R_t dividida entre la resistividad del terreno:

$$k_r \leq \frac{R_t}{\rho} \text{ K } \Omega/(\Omega \cdot m) \quad (3.13)$$

luego de seleccionar el diseño a usar, se calcula nuevamente R'_t con el valor de k_r de dicho diseño:

$$R'_t = k_r \cdot \rho \text{ K } \Omega \quad (3.14)$$

donde:

- k_r : resistencia tomado de la selección del diseño en $\Omega/(\Omega \cdot m)$.
- ρ : resistividad del terreno en $\Omega \cdot m$.

y con este valor se obtiene I'_f :

$$I'_f = \frac{V_{AT}}{R'_t} \text{ K } A \quad (3.15)$$

donde:

- V_{AT} : tensión del lado de alta del transformador en V.

3.2.6 VALORES DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA (R'_t) Y TENSIONES (V'_p , $V'_{p(acc)}$ y V'_c) DE LA CONFIGURACIÓN TIPO SELECCIONADA, PARA LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO MEDIDO (ρ):

Estos valores se calculan mediante el uso de los valores unitarios que aparecen en las tablas de la configuración seleccionada (anexos), y con estos valores se obtiene:

- Resistencia de puesta a tierra:

$$k_r \cdot \rho = R'_t K (\Omega) \quad (3.14)$$

- Tensión de paso máxima:

$$k_p \cdot \rho \cdot I'_f = V'_p K (V) \quad (3.16)$$

- Tensión de contacto exterior máxima:

$$k_c \cdot \rho \cdot I'_f = V'_c K (V) \quad (3.17)$$

3.2.7 CÁLCULO DE LOS VALORES ADMISIBLES DE TENSIÓN DE PASO Y TENSIÓN DE CONTACTO^[16]:

En la MIE-RAT 13 apartado 1.1 establece la tensión máxima aplicable al cuerpo humano, entre manos y pies es la siguiente:

$$V_{CA} = \frac{K}{t^n} \quad (3.18)$$

donde:

- V_{CA} : la tensión aplicada en voltios.
- t : duración de la falla en segundos.
- K y n : constantes en función del tiempo. Tablas 3.4 y 3.5:

Tabla 3.4^[16]

$0,9 \geq t \geq 0,1$ s	$K=72$	$n=1$
$3 \geq t > 0,9$ s	$K=78,5$	$n=0,18$

Tabla 3.5^[16]

$5 \geq t > 3$ s	$V_{CA}=64$ V
$t > 5$ s	$V_{CA}=50$ V

Considerando que la tensión máxima aplicable al cuerpo humano entre manos y pies, no supere el valor obtenido en la formula anterior para las tensiones de toque, ni supere 10 veces dicho valor para las tensiones de paso, los valores máximos admisibles de las tensiones de paso y toque, y por tanto no pueden ser superadas en una instalación son las siguientes:

- Tensión de Paso:

$$V_p = \frac{10 \cdot K}{t^n} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot \rho}{1000}\right) K [V] \quad (3.19)$$

- Tensión de Toque:

$$V_t = \frac{K}{t^n} \cdot \left(1 + \frac{1,5 \cdot \rho}{1000}\right) K [V] \quad (3.20)$$

donde:

- ρ :resistencia del terreno.

Estas formulas se obtuvieron tomando en cuenta que la resistencia del cuerpo humano es de 1.000Ω y cada pie se ha asimilado a un electrodo en forma de placa de 200 cm^2 de superficie que ejerza sobre el suelo una fuerza de $250N$, lo que representa a una resistencia de contacto con el suelo evaluada en $3\rho_s$ ^[16].

En caso de que la resistividad del terreno sea distinta para cada pie (en el caso de acceso a la subestación), la tensión de paso será:

$$V_{p(acc)} = \frac{10 \cdot K}{t^n} \cdot \left(1 + \frac{3 \cdot \rho + 3 \cdot \rho_s}{1000} \right) K [V] \quad (3.21)$$

donde ρ y ρ_s son las resistividades superficiales en que se apoya cada pie.

$\rho_s = 3.000 \Omega.m$ (resistencia superficial del pavimento).

3.2.8 VERIFICACIÓN DE LOS DATOS CALCULADOS^[7]:

Para confirmar que el diseño seleccionado está correcto, los datos calculados deberán cumplir con lo siguiente:

1. Tensión de paso en el exterior calculada sea menor o igual que el valor admisible:

$$V'_p \leq V_p K (V)$$

2. Tensión de contacto calculada sea menor o igual que el valor admisible:

$$V'_c \leq V_c K (V)$$

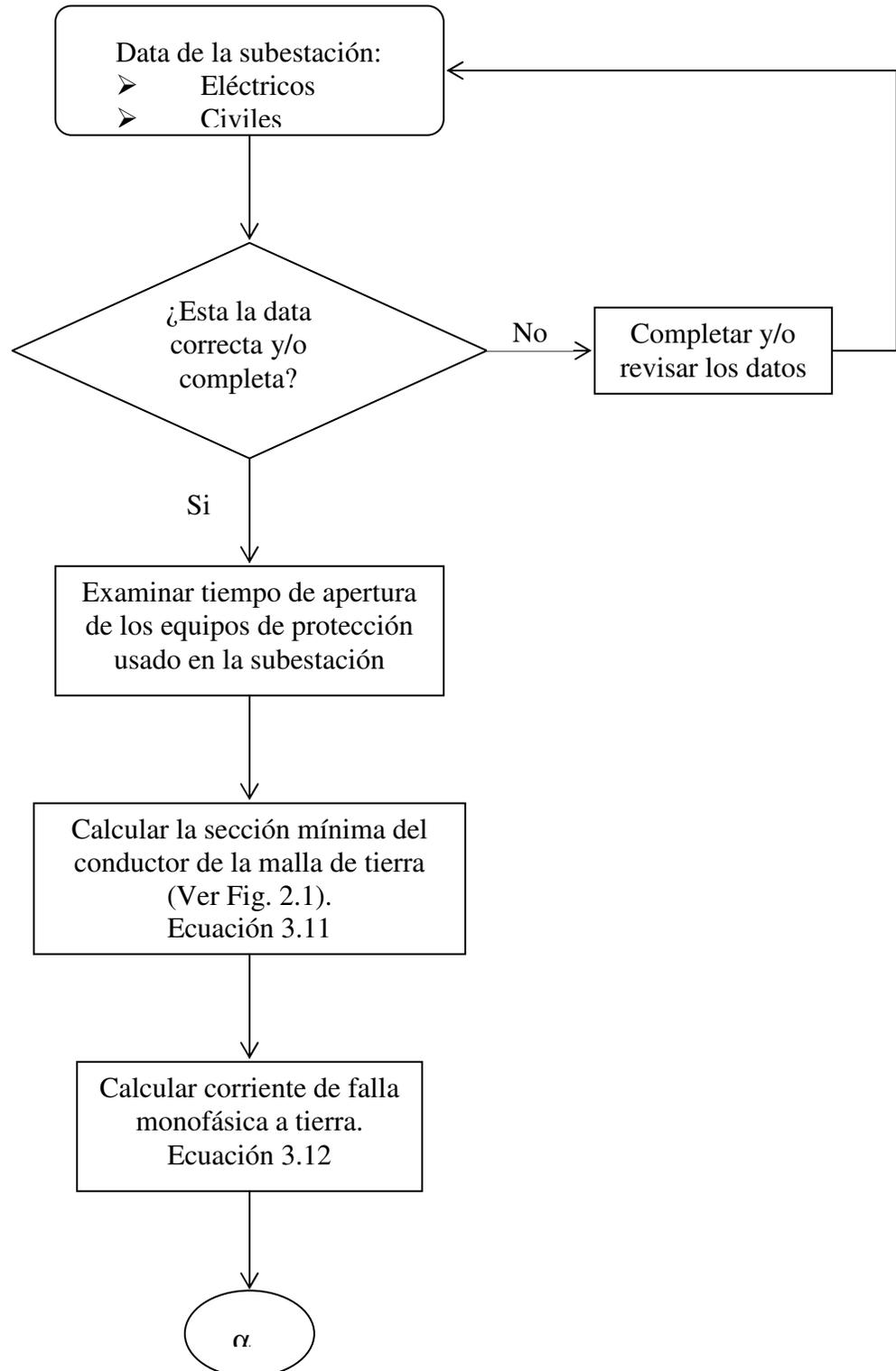
En caso contrario se adoptarán medidas adicionales de seguridad. En este caso la tensión de paso de acceso es:

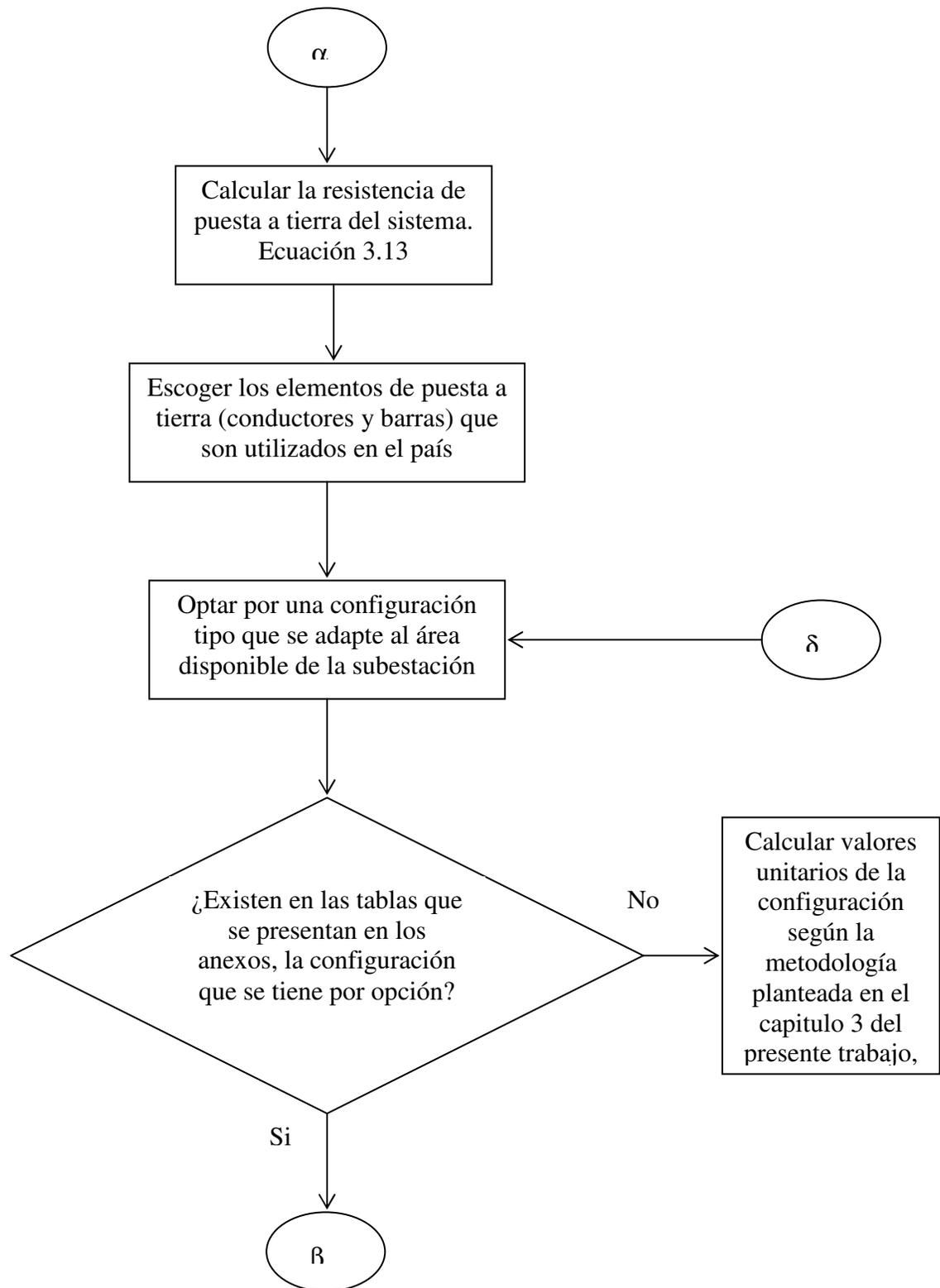
$$V'_{p(acc)} \leq V_{p(acc)} K (V)$$

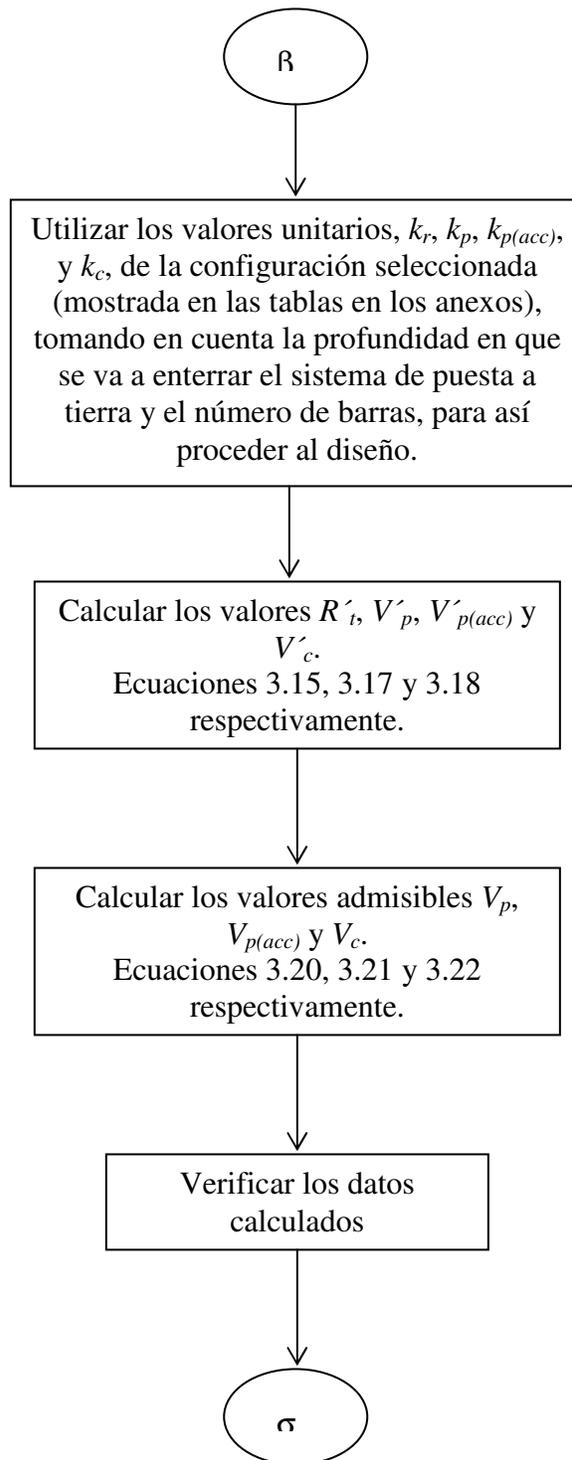
3.2.9 CORRECCIONES Y AJUSTES DEL DISEÑO INICIAL^[7]:

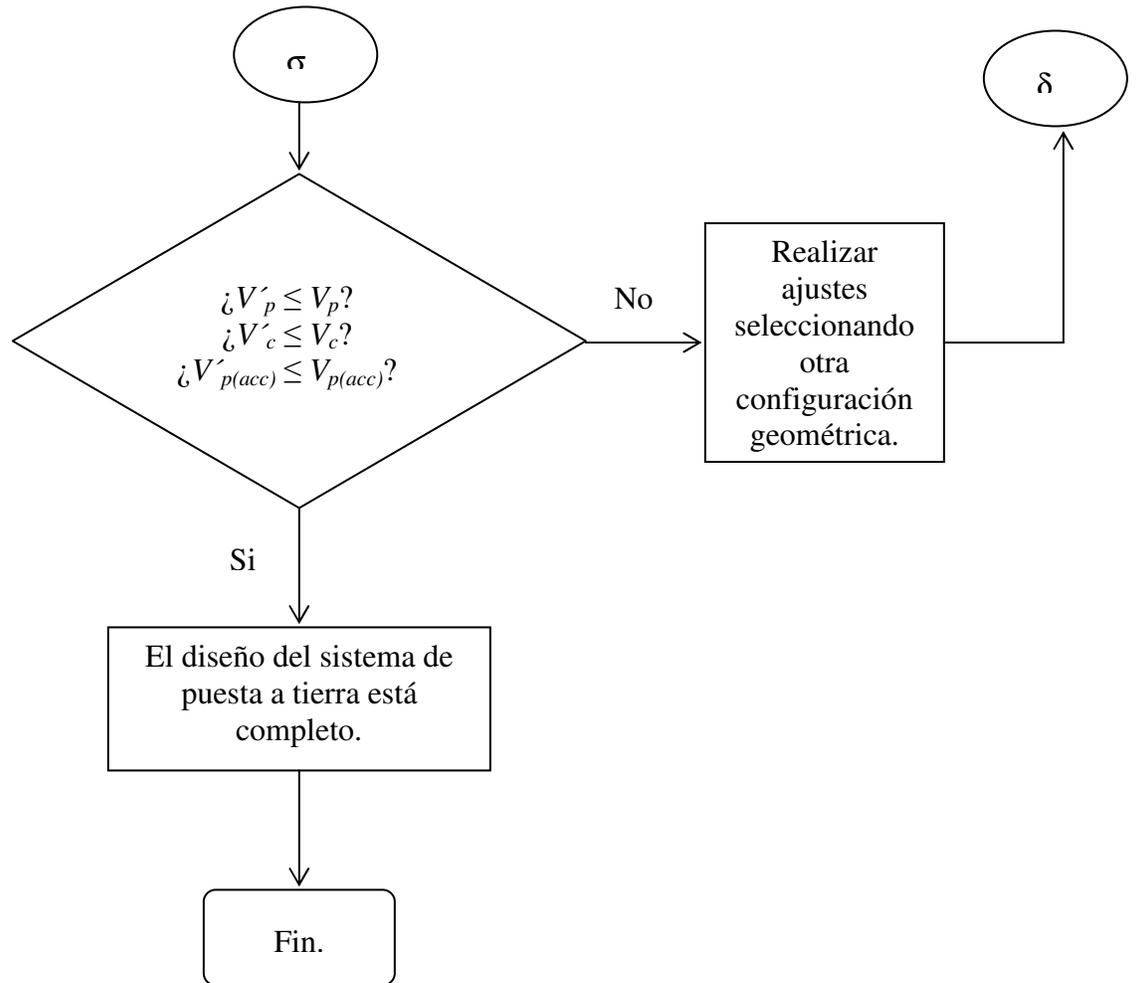
En el caso en que los cálculos arrojados para la selección del diseño inicial no cumpla alguna de las condiciones anteriormente indicadas, se deberá escoger otra configuración tipo y repetir todo el proceso anteriormente reseñado, aumentando la longitud total del conductor horizontal, el número de barras verticales o su longitud, para que disminuya el valor de R_t , y en consecuencia los valores de V'_p y V'_c .

3.2.10 DIAGRAMA DE FLUJO:









*C
A
P
Í
T
U
L
O
I
V*

CAPÍTULO IV: EJEMPLOS DE APLICACIÓN

4.1 EJEMPLO NÚMERO 1:

Diseño de un sistema de puesta a tierra para un subestación compacta en edificio residencial, con una capacidad de 1.250 kVA , y relación de transformación de $13.800/120-208 \text{ V}$, el transformador tiene una impedancia de 5% . La subestación estará ubicada en un área de $6 \text{ m} \times 4 \text{ m}$, con un terreno húmedo, por lo que la resistividad será igual a $100 \Omega \cdot \text{m}$ y estará sobre una capa superficial de concreto (ρ_s) de $3.000 \Omega \cdot \text{m}$. Tiempo de duración de la falla de 8 ciclos .

4.1.1 CÁLCULO DE LA SECCIÓN MÍNIMA DEL CONDUCTOR

Según la ecuación (3.10), se tiene:

$$A_{cmil} = \frac{1.250 \cdot 1.000}{\sqrt{3} \cdot 208} \cdot \frac{100\%}{5\%} \cdot 7 \cdot \sqrt{0,13} = 175.140 \text{ cmil}$$

y de la tabla 3.3 se tiene que el conductor a usar es el $4/0 \text{ AWG/MCM}$, por lo que las tablas a usar (anexos) son las realizadas con dicho conductor.

4.1.2 CÁLCULO DE LA CORRIENTE DE FALLA:

Utilizando la ecuación (3.11), se tiene:

$$I_f = \frac{100\%}{5\%} \cdot \frac{1.250 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 13.800} = 1.046 \text{ A}$$

4.1.3 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

De la ecuación (3.12) podemos decir:

$$R_t = \frac{17.000}{1.046} = 16,25\Omega$$

4.1.4 SELECCIÓN DEL TIPO DEL DISEÑO A USAR:

El diseño se selecciona mediante la ecuación (3.13):

$$k_r \leq \frac{16,25}{100} = 0,163\Omega/(\Omega \cdot m)$$

al buscar en las tablas de las configuraciones una que se adapte al área disponible, que es un rectángulo de $6\text{ m} \times 4\text{ m}$, el diseño seleccionado es la configuración con 4 barras y $0,5\text{ m}$ de profundidad, por lo que los valores unitarios quedan:

- $k_r = 0,077\ \Omega/(\Omega \cdot m)$
- $k_p = 0,0170\ \text{V}/(\Omega \cdot m) \cdot (A)$
- $k_c = 0,0365\ \text{V}/(\Omega \cdot m) \cdot (A)$

y el nuevo valor de R'_t es según la ecuación (3.14):

$$R'_t = 0,077 \cdot 100 = 7,7\Omega$$

y la I'_f queda (ecuación (3.15)):

$$I'_f = \frac{13.800}{7,7} = 1.792A$$

las tensiones de paso y contacto quedan, utilizando las ecuaciones (3.16) y (3.17):

$$V'_p = 0,0170 \cdot 100 \cdot 1.792 = 3.046(V)$$

$$V'_{p(acc)} = 0,0365 \cdot 100 \cdot 1.792 = 6.541(V)$$

4.1.5 CÁLCULO DE LOS VALORES ADMISIBLES DE TENSIÓN DE PASO Y TENSIÓN DE CONTACTO:

La tensión máxima aplicable al cuerpo humano, entre manos y pies es, según la ecuación (3.18), y de la tabla 3.4 se tiene que $K = 72$ y $n = 1$:

$$V_{CA} = \frac{72}{0,13^1} = 554V$$

y las tensiones de paso y contacto admisibles en la subestación son:

- Tensión de Paso, ecuación (3.19):

$$V_p = \frac{10 \cdot 72}{0,13^1} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot 100}{1000}\right) = 8.862[V]$$

- Tensión de Paso en el acceso, ecuación (3.20):

$$V_{p(acc)} = \frac{10 \cdot 72}{0,13^1} \cdot \left(1 + \frac{3 \cdot 100 + 3 \cdot 3.000}{1000} \right) = 12.185[V]$$

4.1.6 VERIFICACIÓN DE LOS DATOS CALCULADOS:

Para confirmar que el diseño seleccionado está correcto, los datos calculados deberán cumplir con lo siguiente:

1. $3.046 \leq 8.862$ $V'_p \leq V_p$ Si se cumple.
2. $6.541 \leq 12.185$ $V'_{p(acc)} \leq V_{p(acc)}$ Si se cumple.

Se concluye que el diseño a utilizar en la subestación dada, es en forma rectangular de $6 m \times 4 m$, con 4 barras tipo Copperweld de $5/8''$ de diámetro, unidas por medio de un conductor de cobre blando clase B calibre $4/0 AWG/MCM$, conectadas mediante conexión exotérmica, y enterrada a $0,5 m$ de profundidad.

4.2 EJEMPLO NÚMERO 2:

Diseño de un sistema de puesta a tierra para un subestación compacta en edificio residencial, con una capacidad de 900 kVA , y relación de transformación de $13.800/265-460 \text{ V}$, el transformador tiene una impedancia de 5% . La subestación estará ubicada en un área de $6 \text{ m} \times 4 \text{ m}$, con un terreno no tan húmedo, por lo que la resistividad será igual a $250 \ \Omega \cdot \text{m}$ y estará sobre una capa superficial de concreto (ρ_s) de $3.000 \ \Omega \cdot \text{m}$. Tiempo de duración de la falla de 8 ciclos .

4.2.1 CÁLCULO DE LA SECCIÓN MÍNIMA DEL CONDUCTOR

Según la ecuación (3.10), se tiene:

$$A_{\text{cmil}} = \frac{900 \cdot 1.000}{\sqrt{3} \cdot 460} \cdot \frac{100\%}{5\%} \cdot 7 \cdot \sqrt{0,13} = 57.020 \text{cmil}$$

y de la tabla 3.3 se tiene que el conductor a usar es el 2 AWG/MCM, por lo que las tablas a usa (anexos) son las realizadas con dicho conductor.

4.2.2 CÁLCULO DE LA CORRIENTE DE FALLA:

Utilizando la ecuación (3.11), se tiene:

$$I_f = \frac{100\%}{5\%} \cdot \frac{900 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 13.800} = 753 \text{A}$$

4.2.3 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

De la ecuación (3.12) podemos decir:

$$R_t = \frac{17.000}{753} = 22,581\Omega$$

4.2.4 SELECCIÓN DEL TIPO DEL DISEÑO A USAR:

El diseño se selecciona mediante la ecuación (3.13):

$$k_r \leq \frac{22,58}{250} = 0,090 \Omega/(\Omega \cdot m)$$

al buscar en las tablas de las configuraciones una que se adapte al área disponible, que es un rectángulo de $6 m \times 4 m$, el diseño seleccionado es la configuración con 4 barras y $0,5 m$ de profundidad, por lo que los valores unitarios quedan:

- $k_r = 0,079 \Omega/(\Omega \cdot m)$
- $k_p = 0,0170 V/(\Omega \cdot m) \cdot (A)$
- $k_c = 0,0385 V/(\Omega \cdot m) \cdot (A)$

y el nuevo valor de R'_t es según la ecuación (3.14):

$$R'_t = 0,079 \cdot 250 = 19,75\Omega$$

y la I'_f queda (ecuación (3.15)):

$$I'_f = \frac{13.800}{19,75} = 700A$$

las tensiones de paso y contacto quedan, utilizando las ecuaciones (3.16) y (3.17):

$$V'_p = 0,0170 \cdot 250 \cdot 700 = 2.975(V)$$

$$V'_{p(acc)} = 0,0385 \cdot 250 \cdot 700 = 6.738(V)$$

4.2.5 CÁLCULO DE LOS VALORES ADMISIBLES DE TENSIÓN DE PASO Y TENSIÓN DE CONTACTO:

La tensión máxima aplicable al cuerpo humano, entre manos y pies es, según la ecuación (3.18), y de la tabla 3.4 se tiene que $K = 72$ y $n = 1$:

$$V_{CA} = \frac{72}{0,13^1} = 554V$$

y las tensiones de paso y contacto admisibles en la subestación son:

- Tensión de Paso, ecuación (3.19):

$$V_p = \frac{10 \cdot 72}{0,13^1} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot 100}{1000}\right) = 8.862[V]$$

- Tensión de Paso en el acceso, ecuación (3.20):

$$V_{p(acc)} = \frac{10 \cdot 72}{0,13^1} \cdot \left(1 + \frac{3 \cdot 100 + 3 \cdot 3.000}{1000} \right) = 12.185[V]$$

4.2.6 VERIFICACIÓN DE LOS DATOS CALCULADOS:

Para confirmar que el diseño seleccionado está correcto, los datos calculados deberán cumplir con lo siguiente:

3. $2.975 \leq 8.862 \quad V'_p \leq V_p$ Si se cumple.
4. $6.738 \leq 12.185 \quad V'_{p(acc)} \leq V_{p(acc)}$ Si se cumple.

Se concluye que el diseño a utilizar en la subestación dada, es en forma rectangular de $6 m \times 4 m$, con 4 barras tipo Copperweld de $5/8''$ de diámetro, unidas por medio de un conductor de cobre blando clase B calibre 2 AWG/MCM, conectadas mediante conexión exotérmica, y enterrada a $0,5 m$ de profundidad.

*C
A
P
Í
T
U
L
O
V*

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES:

- Al analizar las normas y métodos de cálculo existentes, se pudo verificar que para el diseño de puesta a tierra en subestaciones compactas, no existe en el país métodos que sea aplicable para este tipo de subestaciones. El Std. 80 IEEE, que es una de las principales normas para el diseño de sistemas de puesta a tierra, no aplica en este tipo de subestaciones, ya que al calcular la malla correspondiente, resulta con separaciones muy pequeñas, y prácticamente queda una lamina, lo que resulta poco útil.
- En el estudio realizado se estableció los requerimientos necesarios para poder realizar el diseño de puesta a tierra, entre estos requerimientos se encuentra el cálculo de la corriente de falla, que es sumamente importante para poder seleccionar la sección de los conductores, y el tipo de conexión a usar. También, entre los requerimientos, se contempla el estudio de la resistividad del terreno donde se va a construir la subestación. Existen tablas donde están tabuladas el rango de resistividad según el terreno.
- La metodología que se planteó consiste en la elaboración de configuraciones tipos, que son usadas en el diseño de puesta a tierra, y se calculó para cada configuración, unos valores unitario, k_r , k_p , $k_{p(acc)}$ y k_p , que se utilizan para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra R_t y las tensiones de paso y contacto, V_p y V_c , estos valores unitarios fueron calculados según el método Howe, muy extendido dentro de la comunidad Europea.
- Se comprobó la metodología mediante unos ejemplos, que fueron tomados de casos reales. Se pudo verificar que las tensiones de paso y contacto, quedaron menores que las admitidas, dando así confiabilidad al diseño.

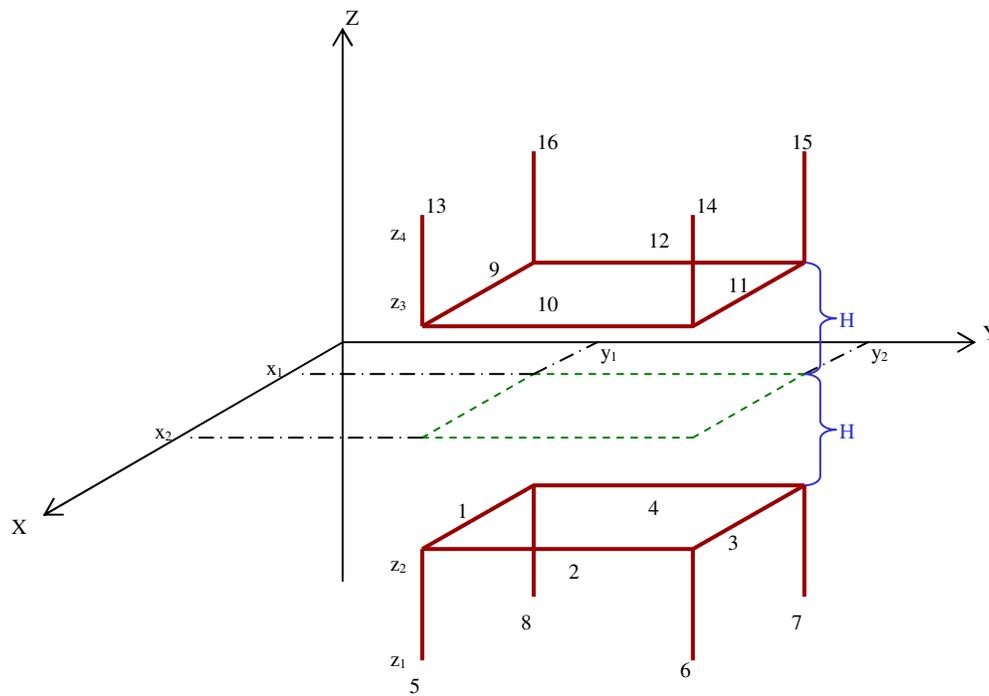
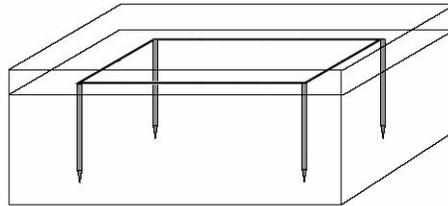
5.2 RECOMENDACIONES:

- Para el cálculo de los valores unitarios por medio del método Howe, se recomienda, tanto para el caso de conductores paralelos como perpendiculares, hacer la correcta implementación de las ecuaciones para así simplificar notablemente las expresiones y el número de cálculos que se realizan.
- Antes de realizar cualquier diseño de puesta a tierra, es recomendable hacer las mediciones de la resistividad del terreno, en vez de guiarse por las tablas existentes (tabla 2.1), para que así tener una mejor aproximación del valor real y los cálculos para el diseño del sistema de puesta a tierra, sean aun más exactos.
- Se recomienda elaborar en un futuro trabajo, un software que ejecute la metodología presentada, con la finalidad de simplificar los cálculos de los valores unitarios y así tener un diseño de un sistema de puesta a tierra más exacto.

A
N
E
X
O
S

A.1 CÁLCULO MANUAL:

A continuación se presenta un ejemplo de los cálculos de los valores unitarios en una configuración tipo de $6\text{ m} \times 4\text{ m}$ en una profundidad de $0,5\text{ m}$.



Configuración tipo conformada por conductores $4/0\text{ AWG}$ y 8 barras de $5/8''$ de diámetro con longitud de $2,4\text{ m}$, por lo que el número de elementos es de 8

La resistencia unitaria k_r se calcula mediante la ecuación 3.1:

$$k_r = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=2n} A_{ij} \cdot l_j}{n \cdot \sum_{i=1}^{i=n} l_i}$$

donde:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{16} A_{ij} \cdot l_j = & A_{11} \cdot l_1 + A_{12} \cdot l_2 + A_{13} \cdot l_3 + A_{14} \cdot l_4 + A_{15} \cdot l_5 + A_{16} \cdot l_6 + A_{17} \cdot l_7 + A_{18} \cdot l_8 + \\ & + A_{19} \cdot l_9 + A_{110} \cdot l_{10} + A_{111} \cdot l_{11} + A_{112} \cdot l_{12} + A_{113} \cdot l_{13} + A_{114} \cdot l_{14} + A_{115} \cdot l_{15} + A_{116} \cdot l_{16} + \\ & + A_{21} \cdot l_1 + A_{22} \cdot l_2 + A_{23} \cdot l_3 + A_{24} \cdot l_4 + A_{25} \cdot l_5 + A_{26} \cdot l_6 + A_{27} \cdot l_7 + A_{28} \cdot l_8 + \\ & + A_{29} \cdot l_9 + A_{210} \cdot l_{10} + A_{211} \cdot l_{11} + A_{212} \cdot l_{12} + A_{213} \cdot l_{13} + A_{214} \cdot l_{14} + A_{215} \cdot l_{15} + A_{216} \cdot l_{16} + \\ & + A_{31} \cdot l_1 + A_{32} \cdot l_2 + A_{33} \cdot l_3 + A_{34} \cdot l_4 + A_{35} \cdot l_5 + A_{36} \cdot l_6 + A_{37} \cdot l_7 + A_{38} \cdot l_8 + \\ & + A_{39} \cdot l_9 + A_{310} \cdot l_{10} + A_{311} \cdot l_{11} + A_{312} \cdot l_{12} + A_{313} \cdot l_{13} + A_{314} \cdot l_{14} + A_{315} \cdot l_{15} + A_{316} \cdot l_{16} + \\ & + A_{41} \cdot l_1 + A_{42} \cdot l_2 + A_{43} \cdot l_3 + A_{44} \cdot l_4 + A_{45} \cdot l_5 + A_{46} \cdot l_6 + A_{47} \cdot l_7 + A_{48} \cdot l_8 + \\ & + A_{49} \cdot l_9 + A_{410} \cdot l_{10} + A_{411} \cdot l_{11} + A_{412} \cdot l_{12} + A_{413} \cdot l_{13} + A_{414} \cdot l_{14} + A_{415} \cdot l_{15} + A_{416} \cdot l_{16} + \\ & + A_{51} \cdot l_1 + A_{52} \cdot l_2 + A_{53} \cdot l_3 + A_{54} \cdot l_4 + A_{55} \cdot l_5 + A_{56} \cdot l_6 + A_{57} \cdot l_7 + A_{58} \cdot l_8 + \\ & + A_{59} \cdot l_9 + A_{510} \cdot l_{10} + A_{511} \cdot l_{11} + A_{512} \cdot l_{12} + A_{513} \cdot l_{13} + A_{514} \cdot l_{14} + A_{515} \cdot l_{15} + A_{516} \cdot l_{16} + \\ & + A_{61} \cdot l_1 + A_{62} \cdot l_2 + A_{63} \cdot l_3 + A_{64} \cdot l_4 + A_{65} \cdot l_5 + A_{66} \cdot l_6 + A_{67} \cdot l_7 + A_{68} \cdot l_8 + \\ & + A_{69} \cdot l_9 + A_{610} \cdot l_{10} + A_{611} \cdot l_{11} + A_{612} \cdot l_{12} + A_{613} \cdot l_{13} + A_{614} \cdot l_{14} + A_{615} \cdot l_{15} + A_{616} \cdot l_{16} + \\ & + A_{71} \cdot l_1 + A_{72} \cdot l_2 + A_{73} \cdot l_3 + A_{74} \cdot l_4 + A_{75} \cdot l_5 + A_{76} \cdot l_6 + A_{77} \cdot l_7 + A_{78} \cdot l_8 + \\ & + A_{79} \cdot l_9 + A_{710} \cdot l_{10} + A_{711} \cdot l_{11} + A_{712} \cdot l_{12} + A_{713} \cdot l_{13} + A_{714} \cdot l_{14} + A_{715} \cdot l_{15} + A_{716} \cdot l_{16} + \\ & + A_{81} \cdot l_1 + A_{82} \cdot l_2 + A_{83} \cdot l_3 + A_{84} \cdot l_4 + A_{85} \cdot l_5 + A_{86} \cdot l_6 + A_{87} \cdot l_7 + A_{88} \cdot l_8 + \\ & + A_{89} \cdot l_9 + A_{810} \cdot l_{10} + A_{811} \cdot l_{11} + A_{812} \cdot l_{12} + A_{813} \cdot l_{13} + A_{814} \cdot l_{14} + A_{815} \cdot l_{15} + A_{816} \cdot l_{16} \end{aligned}$$

a) Auto-influencia:

$$A_{ii} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot l_i} \cdot \text{Ln} \left(\frac{2 \cdot l_i}{d_i} \right)$$

se tiene que:

$$A_{11} = A_{33} = 0,2598$$

$$A_{22} = A_{44} = 0,1840$$

$$A_{55} = A_{66} = A_{77} = A_{88} = 0,3787$$

b) Conductores Paralelos:

$$A_{jk} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot l_j \cdot l_k} [F(x_4, x_1) + F(x_3, x_2) - F(x_3, x_1) - F(x_4, x_2)]$$

se tiene que:

$$A_{13} = A_{31} = 0,0124$$

$$A_{19} = A_{311} = 4,3628 \times 10^{-2}$$

$$A_{111} = A_{39} = 1,2242 \times 10^{-2}$$

$$A_{24} = A_{42} = 1,8588 \times 10^{-2}$$

$$A_{210} = A_{412} = 5,228 \times 10^{-2}$$

$$A_{212} = A_{410} = 1,8093 \times 10^{-2}$$

$$A_{56} = A_{65} = A_{87} = A_{78} = 1,3094 \times 10^{-2}$$

$$A_{57} = A_{68} = A_{75} = A_{86} = 7,9202 \times 10^{-3}$$

$$A_{58} = A_{67} = A_{76} = A_{85} = 1,9353 \times 10^{-2}$$

$$A_{513} = A_{614} = A_{715} = A_{816} = 1,3534 \times 10^{-2}$$

$$A_{514} = A_{613} = A_{716} = A_{815} = 9,4717 \times 10^{-3}$$

$$A_{515} = A_{616} = A_{713} = A_{814} = 8,5518 \times 10^{-3}$$

$$A_{516} = A_{615} = A_{714} = A_{813} = 1,1189 \times 10^{-3}$$

c) Conductores Perpendiculares:

$$A_{jk} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot l_j \cdot l_k} [F(x_4, x_1) + F(x_3, x_2) - F(x_3, x_1) - F(x_4, x_2)]$$

se tiene que:

$$A_{12} = A_{14} = A_{21} = A_{23} = A_{32} = A_{34} = A_{41} = A_{43} = 2,8283x10^{-2}$$

$$A_{15} = A_{18} = A_{36} = A_{37} = A_{51} = A_{63} = A_{73} = A_{81} = 4,44x10^{-2}$$

$$A_{25} = A_{26} = A_{47} = A_{48} = A_{52} = A_{62} = A_{74} = A_{84} = 3,478x10^{-2}$$

$$A_{16} = A_{17} = A_{35} = A_{38} = A_{53} = A_{61} = A_{71} = A_{83} = 1,84x10^{-3}$$

$$A_{110} = A_{112} = A_{29} = A_{211} = A_{310} = A_{312} = A_{49} = A_{411} = 2,3568x10^{-2}$$

$$A_{27} = A_{28} = A_{45} = A_{46} = A_{54} = A_{64} = A_{72} = A_{82} = 5,4757x10^{-3}$$

$$A_{113} = A_{114} = A_{115} = A_{116} = A_{313} = A_{314} = A_{315} = A_{316} = A_{59} = A_{511} = A_{69} = A_{611} = \\ = A_{79} = A_{711} = A_{89} = A_{811} = 3,3341x10^{-2}$$

$$A_{213} = A_{214} = A_{215} = A_{216} = A_{413} = A_{414} = A_{415} = A_{416} = A_{510} = A_{512} = A_{610} = A_{612} = \\ = A_{710} = A_{712} = A_{810} = A_{812} = 2,73071x10^{-2}$$

por lo que queda:

$$\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{16} A_{ij} \cdot l_j = (2 \cdot A_{11} + 2 \cdot A_{13} + 2 \cdot A_{19} + 2 \cdot A_{111} + 4 \cdot A_{12} + 4 \cdot A_{110} + 4 \cdot A_{15} + 4 \cdot A_{16} + 8 \cdot A_{113}) \cdot 4 + \\ + (4 \cdot A_{12} + 4 \cdot A_{110} + 2 \cdot A_{22} + 2 \cdot A_{24} + 2 \cdot A_{210} + 2 \cdot A_{212} + 4 \cdot A_{25} + 4 \cdot A_{27} + 8 \cdot A_{213}) \cdot 6 + \\ + (4 \cdot A_{15} + 4 \cdot A_{16} + 8 \cdot A_{113} + 4 \cdot A_{25} + 4 \cdot A_{27} + 8 \cdot A_{213} + 4 \cdot A_{55} + 4 \cdot A_{56} + 4 \cdot A_{57} + \\ + 4 \cdot A_{58} + 4 \cdot A_{513} + 4 \cdot A_{514} + 4 \cdot A_{515} + 4 \cdot A_{513}) \cdot 2,4 = 18,6753$$

también:

$$\sum_{i=1}^8 l_i = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6 + l_7 + l_8 = 29,6$$

resultando:

$$k_r = \frac{\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{16} A_{ij} \cdot l_j}{8 \cdot \sum_{i=1}^8 l_i} = \frac{18,6753}{8 \cdot 29,6} = 0,078$$

Para el cálculo de las tensiones unitarias de paso y contacto, k_p y k_c , se calcula primero el potencial unitario k_x , mediante la ecuación 3.7:

$$k_x = \sum_{i=1}^{16} k_i$$

donde

$$k_{x1} = k_{x9} = \frac{1}{4 \cdot \pi} \left[\operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{x_2 - x_p}{\sqrt{(y_p - y_1)^2 + H^2}} \right) - \operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{x_1 - x_p}{\sqrt{(y_p - y_1)^2 + H^2}} \right) \right]$$

$$k_{x2} = k_{x10} = \frac{1}{4 \cdot \pi} \left[\operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{y_2 - y_p}{\sqrt{(x_p - x_2)^2 + H^2}} \right) - \operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{y_1 - y_p}{\sqrt{(x_p - x_2)^2 + H^2}} \right) \right]$$

$$k_{x3} = k_{x11} = \frac{1}{4 \cdot \pi} \left[\operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{x_2 - x_p}{\sqrt{(y_p - y_2)^2 + H^2}} \right) - \operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{x_1 - x_p}{\sqrt{(y_p - y_2)^2 + H^2}} \right) \right]$$

$$k_{x4} = k_{x12} = \frac{1}{4 \cdot \pi} \left[\operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{y_2 - y_p}{\sqrt{(x_p - x_1)^2 + H^2}} \right) - \operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{y_1 - y_p}{\sqrt{(x_p - x_1)^2 + H^2}} \right) \right]$$

$$k_{x5} = \frac{1}{4 \cdot \pi} \left[\operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{z_2 - z_p}{\sqrt{(x_p - x_2)^2 + (y_p - y_1)^2}} \right) - \operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{z_1 - z_p}{\sqrt{(x_p - x_2)^2 + (y_p - y_1)^2}} \right) \right]$$

$$k_{x6} = \frac{1}{4 \cdot \pi} \left[\operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{z_2 - z_p}{\sqrt{(x_p - x_2)^2 + (y_p - y_2)^2}} \right) - \operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{z_1 - z_p}{\sqrt{(x_p - x_2)^2 + (y_p - y_2)^2}} \right) \right]$$

$$k_{x7} = \frac{1}{4 \cdot \pi} \left[\operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{z_2 - z_P}{\sqrt{(x_P - x_1)^2 + (y_P - y_2)^2}} \right) - \operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{z_1 - z_P}{\sqrt{(x_P - x_1)^2 + (y_P - y_2)^2}} \right) \right]$$

$$k_{x8} = \frac{1}{4 \cdot \pi} \left[\operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{z_2 - z_P}{\sqrt{(x_P - x_1)^2 + (y_P - y_1)^2}} \right) - \operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{z_1 - z_P}{\sqrt{(x_P - x_1)^2 + (y_P - y_1)^2}} \right) \right]$$

$$k_{x13} = \frac{1}{4 \cdot \pi} \left[\operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{z_4 - z_P}{\sqrt{(x_P - x_2)^2 + (y_P - y_1)^2}} \right) - \operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{z_3 - z_P}{\sqrt{(x_P - x_2)^2 + (y_P - y_1)^2}} \right) \right]$$

$$k_{x14} = \frac{1}{4 \cdot \pi} \left[\operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{z_4 - z_P}{\sqrt{(x_P - x_2)^2 + (y_P - y_2)^2}} \right) - \operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{z_3 - z_P}{\sqrt{(x_P - x_2)^2 + (y_P - y_2)^2}} \right) \right]$$

$$k_{x15} = \frac{1}{4 \cdot \pi} \left[\operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{z_4 - z_P}{\sqrt{(x_P - x_1)^2 + (y_P - y_2)^2}} \right) - \operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{z_3 - z_P}{\sqrt{(x_P - x_1)^2 + (y_P - y_2)^2}} \right) \right]$$

$$k_{x16} = \frac{1}{4 \cdot \pi} \left[\operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{z_4 - z_P}{\sqrt{(x_P - x_1)^2 + (y_P - y_1)^2}} \right) - \operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{z_3 - z_P}{\sqrt{(x_P - x_1)^2 + (y_P - y_1)^2}} \right) \right]$$

A.2 TABLAS DE CONFIGURACIONES:

 Conductor calibre 2 AWG/MCM (33,82 mm²) Barras Copperweld de 5/8'' de diámetro


Cuadrado de 2 x 2 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k _r	k _p	k _c
4 barras	2,4	0,130	0,0315	0,0690
8 barras	2,4	0,102	0,0270	0,0427

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k _r	k _p	k _c
4 barras	2,4	0,122	0,0218	0,0644
8 barras	2,4	0,097	0,0192	0,0418



Rectángulo de 2 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k _r	k _p	k _c
4 barras	2,4	0,124	0,0294	0,0650
8 barras	2,4	0,098	0,0251	0,0413

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k _r	k _p	k _c
4 barras	2,4	0,117	0,0203	0,0615
8 barras	2,4	0,093	0,0180	0,0402



Rectángulo de 2 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k _r	k _p	k _c
4 barras	2,4	0,117	0,0275	0,0606
8 barras	2,4	0,093	0,0234	0,0383

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k _r	k _p	k _c
4 barras	2,4	0,112	0,0191	0,0585
8 barras	2,4	0,089	0,0169	0,0376



Cuadrado de 2,5 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,117	0,0275	0,0607
8 barras	2,4	0,092	0,0236	0,0382

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,111	0,0191	0,0576
8 barras	2,4	0,088	0,0169	0,0366



Rectángulo de 2,5 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,112	0,0260	0,0578
8 barras	2,4	0,088	0,0221	0,0358

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,106	0,0180	0,0547
8 barras	2,4	0,084	0,0159	0,0348



Cuadrado de 3 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,106	0,0245	0,0536
8 barras	2,4	0,084	0,0209	0,0342

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,101	0,0169	0,0515
8 barras	2,4	0,081	0,0151	0,0337



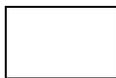
Rectángulo de 3 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,102	0,0232	0,0513
8 barras	2,4	0,081	0,0198	0,0331

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,097	0,0160	0,0487
8 barras	2,4	0,078	0,0142	0,0318



Rectángulo de 4 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,102	0,0232	0,0515
8 barras	2,4	0,081	0,0199	0,0322

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,098	0,0160	0,0498
8 barras	2,4	0,078	0,0142	0,0319



Rectángulo de 4 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,098	0,0220	0,0496
8 barras	2,4	0,078	0,0189	0,0314

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,094	0,0153	0,0480
8 barras	2,4	0,075	0,0135	0,0309



Rectángulo de 4 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,094	0,0210	0,0470
8 barras	2,4	0,075	0,0179	0,0297

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,090	0,0145	0,0455
8 barras	2,4	0,072	0,0129	0,0292



Cuadrado de 4 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,090	0,0201	0,0449
8 barras	2,4	0,072	0,0171	0,0282

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,087	0,0138	0,0434
8 barras	2,4	0,070	0,0123	0,0280



Rectángulo de 5 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,094	0,0211	0,0463
8 barras	2,4	0,076	0,0180	0,0306

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,091	0,0145	0,0458
8 barras	2,4	0,073	0,0129	0,0296



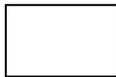
Rectángulo de 5 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,090	0,0201	0,0439
8 barras	2,4	0,073	0,0172	0,0290

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,087	0,0139	0,0434
8 barras	2,4	0,070	0,0123	0,0278



Rectángulo de 5 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,087	0,0192	0,0428
8 barras	2,4	0,070	0,0165	0,0275

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,084	0,0132	0,0415
8 barras	2,4	0,068	0,0118	0,0274



Rectángulo de 5 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,084	0,0184	0,0408
8 barras	2,4	0,068	0,0157	0,0272

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,081	0,0127	0,0398
8 barras	2,4	0,065	0,0112	0,0253



Cuadrado de 5 x 5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,078	0,0170	0,0376
8 barras	2,4	0,065	0,0146	0,0260

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,076	0,0117	0,0374
8 barras	2,4	0,062	0,0104	0,0250



Rectángulo de 6 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,088	0,0193	0,0429
8 barras	2,4	0,071	0,0166	0,0278

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,085	0,0133	0,0418
8 barras	2,4	0,068	0,0118	0,0268



Rectángulo de 6 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,084	0,0185	0,0402
8 barras	2,4	0,068	0,0158	0,0262

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,081	0,0127	0,0397
8 barras	2,4	0,066	0,0113	0,0262



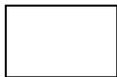
Rectángulo de 6 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,081	0,0178	0,0391
8 barras	2,4	0,066	0,0152	0,0259

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,078	0,0122	0,0379
8 barras	2,4	0,064	0,0108	0,0250



Rectángulo de 6 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,079	0,0170	0,0385
8 barras	2,4	0,064	0,0146	0,0249

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,076	0,0117	0,0366
8 barras	2,4	0,062	0,0104	0,0249



Cuadrado de 6 x 6 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,069	0,0149	0,0321
8 barras	2,4	0,057	0,0128	0,0221

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,067	0,0102	0,0314
8 barras	2,4	0,056	0,0090	0,0224



Rectángulo de 7 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,083	0,0178	0,0405
8 barras	2,4	0,067	0,0154	0,0254

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,079	0,0123	0,0388
8 barras	2,4	0,065	0,0109	0,0254



Rectángulo de 7 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,079	0,0171	0,0376
8 barras	2,4	0,065	0,0147	0,0250

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,076	0,0117	0,0365
8 barras	2,4	0,062	0,0105	0,0241



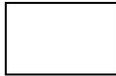
Rectángulo de 7 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,077	0,0164	0,0371
8 barras	2,4	0,063	0,0142	0,0248

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,074	0,0113	0,0352
8 barras	2,4	0,061	0,0100	0,0241



Rectángulo de 7 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,074	0,0159	0,0348
8 barras	2,4	0,061	0,0136	0,0238

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,072	0,0109	0,0348
8 barras	2,4	0,059	0,0096	0,0231



Rectángulo de 8 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,078	0,0166	0,0373
8 barras	2,4	0,064	0,0143	0,0243

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,075	0,0115	0,0356
8 barras	2,4	0,062	0,0102	0,0244



Rectángulo de 8 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,075	0,0159	0,0350
8 barras	2,4	0,061	0,0138	0,0231

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,072	0,0109	0,0341
8 barras	2,4	0,059	0,0097	0,0223



Rectángulo de 8 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,072	0,0153	0,0336
8 barras	2,4	0,059	0,0132	0,0220

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,070	0,0105	0,0335
8 barras	2,4	0,058	0,0094	0,0224



Rectángulo de 8 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,070	0,0149	0,0323
8 barras	2,4	0,058	0,0128	0,0220

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,068	0,0102	0,0323
8 barras	2,4	0,056	0,0091	0,0213

Conductor calibre 1/0 AWG/MCM (53,49 mm²)

Barras Copperweld de 5/8'' de diámetro



Cuadrado de 2 x 2 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,129	0,0315	0,0680
8 barras	2,4	0,102	0,0270	0,0427

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,121	0,0218	0,0634
8 barras	2,4	0,096	0,0192	0,0408



Rectángulo de 2 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,123	0,0294	0,0640
8 barras	2,4	0,097	0,0251	0,0403

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,116	0,0203	0,0605
8 barras	2,4	0,092	0,0180	0,0392



Rectángulo de 2 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,116	0,0275	0,0596
8 barras	2,4	0,093	0,0234	0,0383

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,111	0,0191	0,0575
8 barras	2,4	0,088	0,0169	0,0366



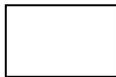
Cuadrado de 2,5 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,116	0,0275	0,0597
8 barras	2,4	0,092	0,0236	0,0382

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,110	0,0191	0,0566
8 barras	2,4	0,087	0,0169	0,0356



Rectángulo de 2,5 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,111	0,0260	0,0568
8 barras	2,4	0,088	0,0221	0,0358

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,105	0,0180	0,0537
8 barras	2,4	0,084	0,0159	0,0348



Cuadrado de 3 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,105	0,0245	0,0526
8 barras	2,4	0,084	0,0209	0,0342

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,101	0,0169	0,0515
8 barras	2,4	0,080	0,0151	0,0327



Rectángulo de 3 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,101	0,0232	0,0503
8 barras	2,4	0,081	0,0198	0,0331

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,096	0,0160	0,0477
8 barras	2,4	0,077	0,0142	0,0308



Rectángulo de 4 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,101	0,0232	0,0505
8 barras	2,4	0,081	0,0199	0,0322

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,097	0,0160	0,0488
8 barras	2,4	0,077	0,0142	0,0309



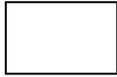
Rectángulo de 4 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,097	0,0220	0,0486
8 barras	2,4	0,077	0,0189	0,0304

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,093	0,0153	0,0470
8 barras	2,4	0,074	0,0135	0,0330



Rectángulo de 4 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,093	0,0210	0,0460
8 barras	2,4	0,075	0,0179	0,0297

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,089	0,0145	0,0445
8 barras	2,4	0,072	0,0129	0,0292



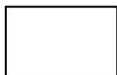
Cuadrado de 4 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,089	0,0201	0,0439
8 barras	2,4	0,072	0,0171	0,0282

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,086	0,0138	0,0424
8 barras	2,4	0,069	0,0123	0,0270



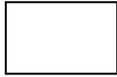
Rectángulo de 5 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,094	0,0211	0,0463
8 barras	2,4	0,075	0,0180	0,0296

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,090	0,0145	0,0448
8 barras	2,4	0,072	0,0129	0,0286



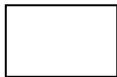
Rectángulo de 5 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,090	0,0201	0,0439
8 barras	2,4	0,072	0,0172	0,0280

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,086	0,0139	0,0424
8 barras	2,4	0,070	0,0123	0,0278



Rectángulo de 5 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,086	0,0192	0,0418
8 barras	2,4	0,070	0,0165	0,0275

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,083	0,0132	0,0405
8 barras	2,4	0,067	0,0118	0,0264



Rectángulo de 5 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,083	0,0184	0,0398
8 barras	2,4	0,067	0,0157	0,0262

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,080	0,0127	0,0388
8 barras	2,4	0,065	0,0112	0,0253



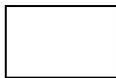
Cuadrado de 5 x 5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,078	0,0170	0,0376
8 barras	2,4	0,063	0,0146	0,0240

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,075	0,0117	0,0364
8 barras	2,4	0,061	0,0104	0,0240



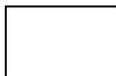
Rectángulo de 6 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,087	0,0193	0,0419
8 barras	2,4	0,071	0,0166	0,0278

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,084	0,0133	0,0408
8 barras	2,4	0,068	0,0118	0,0268



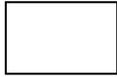
Rectángulo de 6 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,084	0,0185	0,0402
8 barras	2,4	0,068	0,0158	0,0262

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,081	0,0127	0,0397
8 barras	2,4	0,066	0,0113	0,0262



Rectángulo de 6 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,081	0,0178	0,0391
8 barras	2,4	0,066	0,0152	0,0259

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,078	0,0122	0,0379
8 barras	2,4	0,063	0,0108	0,0240



Rectángulo de 6 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,078	0,0170	0,0375
8 barras	2,4	0,064	0,0146	0,0249

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,075	0,0117	0,0356
8 barras	2,4	0,062	0,0104	0,0249



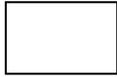
Cuadrado de 6 x 6 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,069	0,0149	0,0321
8 barras	2,4	0,057	0,0128	0,0221

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,067	0,0102	0,0314
8 barras	2,4	0,055	0,0090	0,0214



Rectángulo de 7 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,082	0,0178	0,0395
8 barras	2,4	0,067	0,0154	0,0254

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,079	0,0123	0,0388
8 barras	2,4	0,064	0,0109	0,0244



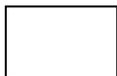
Rectángulo de 7 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,079	0,0171	0,0376
8 barras	2,4	0,064	0,0147	0,0240

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,076	0,0117	0,0365
8 barras	2,4	0,062	0,0105	0,0241



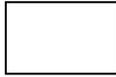
Rectángulo de 7 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,076	0,0164	0,0361
8 barras	2,4	0,062	0,0142	0,0238

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,073	0,0113	0,0342
8 barras	2,4	0,060	0,0100	0,0231



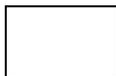
Rectángulo de 7 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,073	0,0159	0,0338
8 barras	2,4	0,060	0,0136	0,0228

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,071	0,0109	0,0338
8 barras	2,4	0,058	0,0096	0,0221



Rectángulo de 8 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,077	0,0166	0,0363
8 barras	2,4	0,063	0,0143	0,0233

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,074	0,0115	0,0346
8 barras	2,4	0,061	0,0102	0,0234



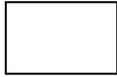
Rectángulo de 8 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,074	0,0159	0,0340
8 barras	2,4	0,061	0,0138	0,0231

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,072	0,0109	0,0341
8 barras	2,4	0,059	0,0097	0,0223



Rectángulo de 8 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,072	0,0153	0,0336
8 barras	2,4	0,059	0,0132	0,0220

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,069	0,0105	0,0325
8 barras	2,4	0,057	0,0094	0,0214



Rectángulo de 8 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,069	0,0149	0,0313
8 barras	2,4	0,057	0,0128	0,0210

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,067	0,0102	0,0313
8 barras	2,4	0,056	0,0091	0,0213

Conductor calibre 2/0 AWG/MCM (67,43 mm²)

Barras Copperweld de 5/8'' de diámetro



Cuadrado de 2 x 2 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,129	0,0315	0,0680
8 barras	2,4	0,109	0,0270	0,0497

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,120	0,0218	0,0624
8 barras	2,4	0,096	0,0192	0,0408



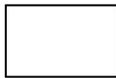
Rectángulo de 2 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,122	0,0294	0,0630
8 barras	2,4	0,097	0,0251	0,0403

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,115	0,0203	0,0583
8 barras	2,4	0,092	0,0180	0,0353



Rectángulo de 2 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,116	0,0275	0,0596
8 barras	2,4	0,093	0,0234	0,0383

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,110	0,0191	0,0565
8 barras	2,4	0,088	0,0169	0,0366



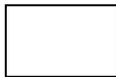
Cuadrado de 2,5 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,116	0,0275	0,0597
8 barras	2,4	0,092	0,0236	0,0382

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,110	0,0191	0,0566
8 barras	2,4	0,087	0,0169	0,0356



Rectángulo de 2,5 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,110	0,0260	0,0558
8 barras	2,4	0,088	0,0221	0,0358

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,105	0,0180	0,0537
8 barras	2,4	0,084	0,0159	0,0348



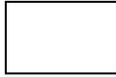
Cuadrado de 3 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,105	0,0245	0,0526
8 barras	2,4	0,084	0,0209	0,0342

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,100	0,0169	0,0505
8 barras	2,4	0,080	0,0151	0,0327



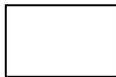
Rectángulo de 3 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,100	0,0232	0,0493
8 barras	2,4	0,081	0,0198	0,0331

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,096	0,0160	0,0477
8 barras	2,4	0,077	0,0142	0,0308



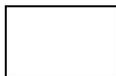
Rectángulo de 4 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,101	0,0232	0,0505
8 barras	2,4	0,080	0,0199	0,0312

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,096	0,0160	0,0478
8 barras	2,4	0,077	0,0142	0,0309



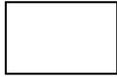
Rectángulo de 4 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,096	0,0220	0,0476
8 barras	2,4	0,077	0,0189	0,0304

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,092	0,0153	0,0460
8 barras	2,4	0,074	0,0135	0,0299



Rectángulo de 4 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,092	0,0210	0,0450
8 barras	2,4	0,074	0,0179	0,0287

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,089	0,0145	0,0445
8 barras	2,4	0,072	0,0129	0,0292



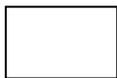
Cuadrado de 4 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,089	0,0201	0,0439
8 barras	2,4	0,072	0,0171	0,0282

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,085	0,0138	0,0414
8 barras	2,4	0,069	0,0123	0,0270



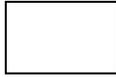
Rectángulo de 5 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,093	0,0211	0,0453
8 barras	2,4	0,075	0,0180	0,0296

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,084	0,0145	0,0388
8 barras	2,4	0,072	0,0129	0,0286



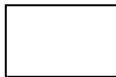
Rectángulo de 5 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,089	0,0201	0,0429
8 barras	2,4	0,072	0,0172	0,0280

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,086	0,0139	0,0424
8 barras	2,4	0,069	0,0123	0,0268



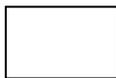
Rectángulo de 5 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,086	0,0192	0,0418
8 barras	2,4	0,070	0,0165	0,0275

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,083	0,0132	0,0405
8 barras	2,4	0,067	0,0118	0,0264



Rectángulo de 5 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,083	0,0184	0,0398
8 barras	2,4	0,067	0,0157	0,0262

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,080	0,0127	0,0388
8 barras	2,4	0,065	0,0112	0,0253



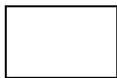
Cuadrado de 5 x 5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,077	0,0170	0,0366
8 barras	2,4	0,063	0,0146	0,0240

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,075	0,0117	0,0364
8 barras	2,4	0,061	0,0104	0,0240



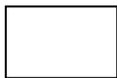
Rectángulo de 6 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,087	0,0193	0,0419
8 barras	2,4	0,070	0,0166	0,0268

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,084	0,0133	0,0408
8 barras	2,4	0,068	0,0118	0,0268



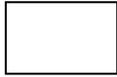
Rectángulo de 6 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,083	0,0185	0,0392
8 barras	2,4	0,068	0,0158	0,0262

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,082	0,0127	0,0407
8 barras	2,4	0,065	0,0113	0,0252



Rectángulo de 6 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,080	0,0178	0,0381
8 barras	2,4	0,065	0,0152	0,0249

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,078	0,0122	0,0379
8 barras	2,4	0,063	0,0108	0,0240



Rectángulo de 6 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,078	0,0170	0,0375
8 barras	2,4	0,063	0,0146	0,0239

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,075	0,0117	0,0356
8 barras	2,4	0,061	0,0104	0,0239



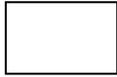
Cuadrado de 6 x 6 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,069	0,0149	0,0321
8 barras	2,4	0,057	0,0128	0,0221

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,066	0,0102	0,0304
8 barras	2,4	0,055	0,0090	0,0214



Rectángulo de 7 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,082	0,0178	0,0395
8 barras	2,4	0,067	0,0154	0,0254

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,078	0,0123	0,0378
8 barras	2,4	0,064	0,0109	0,0244



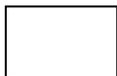
Rectángulo de 7 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,078	0,0171	0,0366
8 barras	2,4	0,064	0,0147	0,0240

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,076	0,0117	0,0365
8 barras	2,4	0,062	0,0105	0,0241



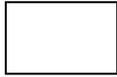
Rectángulo de 7 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,076	0,0164	0,0361
8 barras	2,4	0,062	0,0142	0,0238

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,073	0,0113	0,0342
8 barras	2,4	0,060	0,0100	0,0231



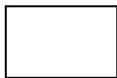
Rectángulo de 7 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,073	0,0159	0,0338
8 barras	2,4	0,060	0,0136	0,0228

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,071	0,0109	0,0338
8 barras	2,4	0,058	0,0096	0,0221



Rectángulo de 8 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,077	0,0166	0,0363
8 barras	2,4	0,063	0,0143	0,0233

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,074	0,0115	0,0346
8 barras	2,4	0,061	0,0102	0,0234



Rectángulo de 8 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,074	0,0159	0,0340
8 barras	2,4	0,061	0,0138	0,0231

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,071	0,0109	0,0331
8 barras	2,4	0,059	0,0097	0,0223



Rectángulo de 8 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,071	0,0153	0,0326
8 barras	2,4	0,059	0,0132	0,0220

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,069	0,0105	0,0325
8 barras	2,4	0,057	0,0094	0,0214



Rectángulo de 8 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,069	0,0149	0,0313
8 barras	2,4	0,057	0,0128	0,0210

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,067	0,0102	0,0313
8 barras	2,4	0,056	0,0091	0,0213

Conductor calibre 3/0 AWG/MCM (85,01 mm²)

Barras Copperweld de 5/8'' de diámetro



Cuadrado de 2 x 2 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,128	0,0315	0,0670
8 barras	2,4	0,101	0,0270	0,0417

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,120	0,0218	0,0607
8 barras	2,4	0,096	0,0192	0,0408



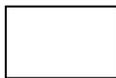
Rectángulo de 2 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,122	0,0294	0,0630
8 barras	2,4	0,097	0,0251	0,0403

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,115	0,0203	0,0595
8 barras	2,4	0,092	0,0180	0,0392



Rectángulo de 2 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,116	0,0275	0,0596
8 barras	2,4	0,092	0,0234	0,0373

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,110	0,0191	0,0565
8 barras	2,4	0,088	0,0169	0,0366



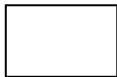
Cuadrado de 2,5 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,115	0,0275	0,0587
8 barras	2,4	0,091	0,0236	0,0372

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,109	0,0191	0,0556
8 barras	2,4	0,087	0,0169	0,0356



Rectángulo de 2,5 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,110	0,0260	0,0558
8 barras	2,4	0,088	0,0221	0,0358

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,104	0,0180	0,0527
8 barras	2,4	0,084	0,0159	0,0348



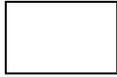
Cuadrado de 3 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,105	0,0245	0,0526
8 barras	2,4	0,084	0,0209	0,0342

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,100	0,0169	0,0505
8 barras	2,4	0,080	0,0151	0,0327



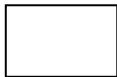
Rectángulo de 3 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,100	0,0232	0,0493
8 barras	2,4	0,081	0,0198	0,0331

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,096	0,0160	0,0477
8 barras	2,4	0,077	0,0142	0,0308



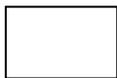
Rectángulo de 4 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,100	0,0232	0,0495
8 barras	2,4	0,080	0,0199	0,0312

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,096	0,0160	0,0478
8 barras	2,4	0,077	0,0142	0,0309



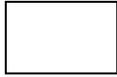
Rectángulo de 4 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,096	0,0220	0,0476
8 barras	2,4	0,077	0,0189	0,0304

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,092	0,0153	0,0460
8 barras	2,4	0,074	0,0135	0,0299



Rectángulo de 4 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,092	0,0210	0,0450
8 barras	2,4	0,074	0,0179	0,0287

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,088	0,0145	0,0435
8 barras	2,4	0,071	0,0129	0,0282



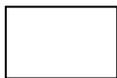
Cuadrado de 4 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,089	0,0201	0,0439
8 barras	2,4	0,072	0,0171	0,0282

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,085	0,0138	0,0414
8 barras	2,4	0,069	0,0123	0,0270



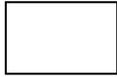
Rectángulo de 5 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,093	0,0211	0,0453
8 barras	2,4	0,075	0,0180	0,0296

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,089	0,0145	0,0438
8 barras	2,4	0,072	0,0129	0,0286



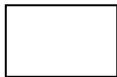
Rectángulo de 5 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,089	0,0201	0,0429
8 barras	2,4	0,072	0,0172	0,0280

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,085	0,0139	0,0414
8 barras	2,4	0,069	0,0123	0,0268



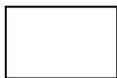
Rectángulo de 5 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,086	0,0192	0,0418
8 barras	2,4	0,069	0,0165	0,0265

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,082	0,0132	0,0395
8 barras	2,4	0,067	0,0118	0,0264



Rectángulo de 5 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,082	0,0184	0,0388
8 barras	2,4	0,067	0,0157	0,0262

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,079	0,0127	0,0378
8 barras	2,4	0,065	0,0112	0,0253



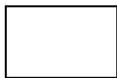
Cuadrado de 5 x 5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,077	0,0170	0,0366
8 barras	2,4	0,063	0,0146	0,0240

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,074	0,0117	0,0354
8 barras	2,4	0,061	0,0104	0,0240



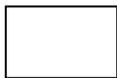
Rectángulo de 6 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,087	0,0193	0,0419
8 barras	2,4	0,070	0,0166	0,0268

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,083	0,0133	0,0398
8 barras	2,4	0,068	0,0118	0,0268



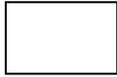
Rectángulo de 6 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,083	0,0185	0,0392
8 barras	2,4	0,068	0,0158	0,0262

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,080	0,0127	0,0387
8 barras	2,4	0,065	0,0113	0,0252



Rectángulo de 6 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,080	0,0178	0,0381
8 barras	2,4	0,065	0,0152	0,0249

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,077	0,0122	0,0369
8 barras	2,4	0,063	0,0108	0,0240



Rectángulo de 6 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,077	0,0170	0,0365
8 barras	2,4	0,063	0,0146	0,0239

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,075	0,0117	0,0356
8 barras	2,4	0,061	0,0104	0,0239



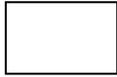
Cuadrado de 6 x 6 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,068	0,0149	0,0311
8 barras	2,4	0,057	0,0128	0,0221

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,066	0,0102	0,0304
8 barras	2,4	0,055	0,0090	0,0214



Rectángulo de 7 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,081	0,0178	0,0385
8 barras	2,4	0,066	0,0154	0,0244

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,078	0,0123	0,0378
8 barras	2,4	0,064	0,0109	0,0244



Rectángulo de 7 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,078	0,0171	0,0366
8 barras	2,4	0,064	0,0147	0,0240

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,075	0,0117	0,0355
8 barras	2,4	0,062	0,0105	0,0241



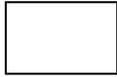
Rectángulo de 7 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,075	0,0164	0,0351
8 barras	2,4	0,062	0,0142	0,0238

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,073	0,0113	0,0342
8 barras	2,4	0,060	0,0100	0,0231



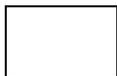
Rectángulo de 7 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,073	0,0159	0,0338
8 barras	2,4	0,060	0,0136	0,0228

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,070	0,0109	0,0328
8 barras	2,4	0,058	0,0096	0,0221



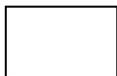
Rectángulo de 8 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,077	0,0166	0,0363
8 barras	2,4	0,063	0,0143	0,0233

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,074	0,0115	0,0346
8 barras	2,4	0,061	0,0102	0,0234



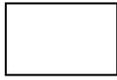
Rectángulo de 8 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,074	0,0159	0,0340
8 barras	2,4	0,061	0,0138	0,0231

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,071	0,0109	0,0331
8 barras	2,4	0,059	0,0097	0,0223



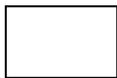
Rectángulo de 8 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,071	0,0153	0,0326
8 barras	2,4	0,059	0,0132	0,0220

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,069	0,0105	0,0325
8 barras	2,4	0,057	0,0094	0,0214



Rectángulo de 8 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,069	0,0149	0,0313
8 barras	2,4	0,057	0,0128	0,0210

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,067	0,0102	0,0313
8 barras	2,4	0,055	0,0091	0,0203

Conductor calibre 4/0 AWG/MCM (107,20 mm²)

Barras Copperweld de 5/8'' de diámetro



Cuadrado de 2 x 2 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,128	0,0315	0,0670
8 barras	2,4	0,101	0,0270	0,0417

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,119	0,0218	0,0614
8 barras	2,4	0,096	0,0192	0,0408



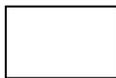
Rectángulo de 2 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,121	0,0294	0,0620
8 barras	2,4	0,096	0,0251	0,0393

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,114	0,0203	0,0585
8 barras	2,4	0,092	0,0180	0,0392



Rectángulo de 2 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,115	0,0275	0,0586
8 barras	2,4	0,092	0,0234	0,0373

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,109	0,0191	0,0555
8 barras	2,4	0,088	0,0169	0,0366



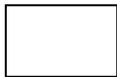
Cuadrado de 2,5 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,115	0,0275	0,0587
8 barras	2,4	0,091	0,0236	0,0372

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,109	0,0191	0,0556
8 barras	2,4	0,087	0,0169	0,0356



Rectángulo de 2,5 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,109	0,0260	0,0548
8 barras	2,4	0,087	0,0221	0,0348

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,104	0,0180	0,0527
8 barras	2,4	0,083	0,0159	0,0338



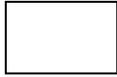
Cuadrado de 3 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,104	0,0245	0,0516
8 barras	2,4	0,083	0,0209	0,0332

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,099	0,0169	0,0495
8 barras	2,4	0,080	0,0151	0,0327



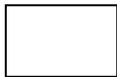
Rectángulo de 3 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,100	0,0232	0,0493
8 barras	2,4	0,080	0,0198	0,0321

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,095	0,0160	0,0467
8 barras	2,4	0,077	0,0142	0,0308



Rectángulo de 4 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,100	0,0232	0,0495
8 barras	2,4	0,080	0,0199	0,0312

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,096	0,0160	0,0478
8 barras	2,4	0,077	0,0142	0,0309



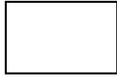
Rectángulo de 4 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,096	0,0220	0,0476
8 barras	2,4	0,077	0,0189	0,0304

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,092	0,0153	0,0460
8 barras	2,4	0,074	0,0135	0,0299



Rectángulo de 4 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,092	0,0210	0,0450
8 barras	2,4	0,074	0,0179	0,0287

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,088	0,0145	0,0435
8 barras	2,4	0,071	0,0129	0,0282



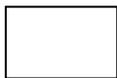
Cuadrado de 4 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,088	0,0201	0,0429
8 barras	2,4	0,072	0,0171	0,0282

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,085	0,0138	0,0414
8 barras	2,4	0,069	0,0123	0,0270



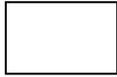
Rectángulo de 5 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,093	0,0211	0,0453
8 barras	2,4	0,075	0,0180	0,0296

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,089	0,0145	0,0438
8 barras	2,4	0,072	0,0129	0,0286



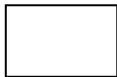
Rectángulo de 5 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,089	0,0201	0,0429
8 barras	2,4	0,072	0,0172	0,0280

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,085	0,0139	0,0414
8 barras	2,4	0,069	0,0123	0,0268



Rectángulo de 5 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,085	0,0192	0,0408
8 barras	2,4	0,069	0,0165	0,0265

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,082	0,0132	0,0395
8 barras	2,4	0,067	0,0118	0,0264



Rectángulo de 5 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,082	0,0184	0,0388
8 barras	2,4	0,067	0,0157	0,0262

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,079	0,0127	0,0378
8 barras	2,4	0,065	0,0112	0,0253



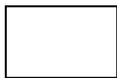
Cuadrado de 5 x 5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,077	0,0170	0,0366
8 barras	2,4	0,063	0,0146	0,0240

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,074	0,0117	0,0354
8 barras	2,4	0,061	0,0104	0,0240



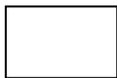
Rectángulo de 6 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,086	0,0193	0,0409
8 barras	2,4	0,070	0,0166	0,0268

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,083	0,0133	0,0398
8 barras	2,4	0,068	0,0118	0,0268



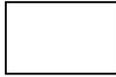
Rectángulo de 6 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,083	0,0185	0,0392
8 barras	2,4	0,068	0,0158	0,0262

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,080	0,0127	0,0387
8 barras	2,4	0,065	0,0113	0,0252



Rectángulo de 6 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,080	0,0178	0,0381
8 barras	2,4	0,065	0,0152	0,0249

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,077	0,0122	0,0369
8 barras	2,4	0,063	0,0108	0,0240



Rectángulo de 6 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,077	0,0170	0,0365
8 barras	2,4	0,063	0,0146	0,0239

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,074	0,0117	0,0346
8 barras	2,4	0,061	0,0104	0,0239



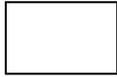
Cuadrado de 6 x 6 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,068	0,0149	0,0311
8 barras	2,4	0,056	0,0128	0,0211

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,066	0,0102	0,0304
8 barras	2,4	0,055	0,0090	0,0214



Rectángulo de 7 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,081	0,0178	0,0385
8 barras	2,4	0,066	0,0154	0,0244

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,078	0,0123	0,0378
8 barras	2,4	0,064	0,0109	0,0244



Rectángulo de 7 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,078	0,0171	0,0366
8 barras	2,4	0,064	0,0147	0,0240

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,075	0,0117	0,0355
8 barras	2,4	0,062	0,0105	0,0241



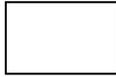
Rectángulo de 7 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,075	0,0164	0,0351
8 barras	2,4	0,062	0,0142	0,0238

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,072	0,0113	0,0332
8 barras	2,4	0,060	0,0100	0,0231



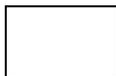
Rectángulo de 7 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,072	0,0159	0,0328
8 barras	2,4	0,060	0,0136	0,0228

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,070	0,0109	0,0328
8 barras	2,4	0,058	0,0096	0,0221



Rectángulo de 8 x 2,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,076	0,0166	0,0353
8 barras	2,4	0,063	0,0143	0,0233

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,073	0,0115	0,0336
8 barras	2,4	0,061	0,0102	0,0234



Rectángulo de 8 x 3 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,073	0,0159	0,0330
8 barras	2,4	0,061	0,0138	0,0231

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,071	0,0109	0,0331
8 barras	2,4	0,059	0,0097	0,0223



Rectángulo de 8 x 3,5 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,071	0,0153	0,0326
8 barras	2,4	0,059	0,0132	0,0220

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,069	0,0105	0,0325
8 barras	2,4	0,057	0,0094	0,0214



Rectángulo de 8 x 4 m

H = 0,5

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,069	0,0149	0,0313
8 barras	2,4	0,057	0,0128	0,0210

H = 0,8

Configuración	L barra (m)	k_r	k_p	k_c
4 barras	2,4	0,066	0,0102	0,0303
8 barras	2,4	0,055	0,0091	0,0203

*B
I
B
L
I
O
G
R
A
F
Í
A*

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ANSI/IEEE Std. 80-2000 (*Revision of IEEE Std. 80-1986*) *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*.
- [2] ANSI/IEEE Std. 141-1986 *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants (The Red Book)*.
- [3] ALLER CASTRO José Manuel, *Diseño de Sistemas Complejos de Puesta a Tierra en Terrenos con Estratos Múltiples y con Consideraciones de su Comportamiento en Régimen Transitorio*, Madrid, España, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Noviembre de 1993.
- [4] BAROHONA C., R. Cideos y C. Marroquin, *Manuel para Aterrizajes en Subestaciones y Sistemas Eléctricos*, Antiguo Cuscatlan, La Libertad, El Salvador, Trabajo de Graduación, Universidad Albert Einstein, Facultad de Ingeniería, Marzo 2003.
- [5] BRICEÑO M. J. Hildemaro, *Sistemas de Conexión a Tierra en 60hz*, Mérida Venezuela, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Los Andes.
- [6] CASAS O. Favio, *TIERRAS. Soporte de la Seguridad Eléctrica*, Santa Fe de Bogotá Colombia, Primera Edición, Seguridad Eléctrica Ltda. Mayo 1998.
- [7] COLOMINAS I., F. Ambarina y M. Casteleiro, *Fórmulas Analíticas de Integración para el Cálculo de Tomas de Tierra Mediante el Método de Elementos de Contorno (BEM)*, E. T. S. de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de La Coruña, Campus de Elviña S/N, 15192 La Coruña, España.
- [8] DE LA VEGA O. Miguel. *Problemas de Ingeniería de Puesta a Tierra*, México D.F., México, Editorial LIMUSA, S.A. de C.V., Grupo Noriega Editores, 2002
- [9] E. E. Staff del MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (M.I.T.), *Circuito Magnético y Transformadores*, Editorial Reveté, S. A., Noviembre 1981.
- [10] GARCÍA MÁRQUEZ Rogelio, *La Puesta a Tierra de Instalaciones Eléctricas y el R.A.T.*, Barcelona, España, Marcombo Boixareu Editores, 1991

- [11] FINK, DONALD G. y H. Wayne Beaty. *Manual de Ingeniería Eléctrica*, México, Editorial McGraw-Hill Interamericana de México, S.A., Décimo tercera edición, Tomo III, 2000
- [12] MÉNDEZ A. Carlos E. *Metodología. Diseño y Desarrollo del Proceso de Investigación*, Bogotá Colombia, Editorial McGraw-Hill Interamericana S.A., Tercera Edición, 2001.
- [13] NAVEIRA Francisco. *Guía de Sistema Eléctricos de Distribución*, Valencia, Venezuela, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo.
- [14] PILO E., L. Rouco y A. Fernández,. *Cálculo de Tensiones de Paso y de Contacto en Ferrocarriles de Alta Velocidad*, Instituto de Investigación Tecnológicas, E. T. S. de Ingeniería, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España.
- [15] SIEGERT C. Luis A., *Alta Tensión Y Sistemas De Transmisión*, México D.F., México, Editorial LIMUSA, S.A. de C.V., Grupo Noriega Editores, 2002
- [16] REGLAMENTO SOBRE CONDICIONES TÉCNICAS Y GARANTÍAS DE SEGURIDAD EN CENTRALES ELÉCTRICAS. *Instrucción Técnica Complementaria MIE-RAT 13: "INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA"*, España, Ministerio de Energía y Minas, Orden de 27 de Noviembre de 1987
- [17] WINBURD, D. C.,. *Practical Electrical Safety*, Marcel Dekker 1988
- [18] AGULLERO Ignacio y Miguel Martínez Lozano. *Técnicas Modernas para la Medición de Sistemas de Puesta a Tierra en Zonas Urbanas*,
<http://prof.usb.ve/mmlozano/DOCS/MMPAT.pdf> 26 de Abril del 2005
- [19] MINISTERIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA, *Instalaciones de Puesta a Tierra*,
http://www.ffii.nova.es/puntoinfomcyt/Archivos/rbt/ITC_BT_18.pdf 07 de Junio de 2005
- [20] PROCOBRE. *Mallas de Tierra*,
http://www.procobre.org/pe/_configStuff/docs/uploaded/c_mallas.pdf 13 de Julio del 2005
- [21] 13 de Julio de 2005
http://www.saber.ula.ve/db/ssaber/Edocs/monografias/ingenieria/electrica/sct/2_criterios_sct.pdf
-