



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

"APLICACION DE NORMAS AL DISEÑO DE REDES DE TIERRA EN SISTEMAS ELECTRICOS Y ELECTRONICOS"

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
(AREA ELECTRICA ELECTRONICA)
P R E S E N T A N:

FERNANDO MONTIEL GONZALEZ
ANA LILIA SOLIS HERNANDEZ



DIRECTOR DE TESIS:
M. I. RODOLFO LORENZO BAUTISTA

278794

Ciudad Universitaria, México D: F.

Junio 2000



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS:

A mis Padres,

Javier Solís Guazo y
Teresa Hernández de Solís

Con gran cariño y amor filial,
mi eterno reconocimiento por los
sacrificios que realizaron
para lograr lo que soy.

Gracias por su amor y apoyo que
Siempre tendré de ustedes. . LOS AMO.

A mi Esposo,

Vicente Pérez Tovar

Por el apoyo que me has dado
para dar este paso tan importante en mi vida,,
y en especial gracias por tu amor... TE AMO.

A mis Hermanos,

Judith, Ivan, Marisol, Jessica

Por su comprensión, tolerancia
y sobre todo por su cariño.

A mi Amigo,

Miguel Angel Mendoza García

Por su amistad sincera
y por el gran apoyo que me dio
durante mi vida de estudiante.

Al Ing. Rodolfo Lorenzo Bautista,

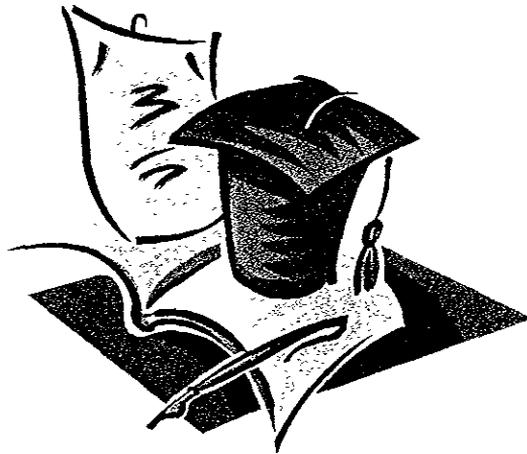
*Por haber tenido la atención y el tiempo
de dirigirme en este proyecto
tan importante en mi vida.*

A todos y cada uno de mis profesores,

Gracias por sus enseñanzas. Respetuosamente,

A la Universidad Nacional Autónoma de México,

*Por ser mi Alma Mater...
por haber permitido que yo
ocupará un lugar dentro
de la Facultad de Ingeniería
y que a pesar de la adversidad
seguirá siendo la Máxima Casa de Estudios*



ANA LILIA SOLIS HERNANDEZ

INDICE

Introducción	1
Capítulo I Sistemas trifásicos	4
I.1. Introducción	4
I.2. Sistemas Trifásicos Balanceados	4
I.3. Sistemas Trifásicos Desbalanceados	6
I.4. Estudio de Corto Circuito	7
I.4.1. Método de las Componentes Simétricas	8
I.4.2. Redes de Secuencia	13
I.4.3. Representación de Impedancia de Elementos de un Sistema Eléctrico en Las Redes de Secuencia Positiva, Negativa y Cero	15
I.5. Análisis de Fallas de Corto Circuito	21
I.5.1. Falla de Fase a Tierra	22
I.5.2. Falla de dos Fases a Tierra	27
Capítulo II. Cables Aislados	33
II.1. Introducción	34
II.2. Cálculo de Impedancias de Secuencias	34
III.2.1. Cables de Energía Aislados	34
II.3. Cables Aislados de Mediana y Alta Tensión	36
III.3.1. Impedancia de Secuencia Positiva y Negativa	36
III.3.2. Impedancia de Secuencia Cero	39
II.4. Cables Aislados de Baja Tensión	46
III.4.1. Impedancia de Secuencia Cero	46
Capítulo III. Sistemas de Tierra	51
III.1. Introducción	51
III.2. Componentes Principales de un Sistema de Tierras	51
III.3. Disposiciones Básicas de las Redes de Tierras	53
III.4. Características de los Elementos del Sistema de Tierras	53

III.5. Análisis de la Resistividad del Suelo, Mediciones de Campo y Selección del Modelo del Suelo	53
III 5.1. Resistividad del Suelo	54
III 5.2. Efecto de la Humedad, Temperatura y Contenido Químico sobre la Resistividad	54
III.5.3. Clasificación de los Suelos y sus Rangos de Resistividad	55
III 5.4. Métodos de Medición de la Resistividad del Terreno	56
III.5.5. Modelo del Suelo de Dos Capas	58
III 6. Resistencia a Tierra	58
III 6.1. Medición de la Resistencia a Tierra	58
III 6.2. Resistencia a Tierra de una Varilla	59
III.6.3. Tratamiento Químico del suelo y Uso de la Bentonita	59
Capítulo IV. Diseño de Sistemas de Tierra para Subestaciones	60
IV.1. Introducción	61
IV.2. Criterios de Diseño	61
IV.3. Cálculo de Potenciales Tolerables por el Cuerpo Humano	62
IV.3.1. Efecto de la Frecuencia	62
IV.3.2. Efecto de la Magnitud y la Duración	62
IV.3.3. Límite de la Corriente Permisible por el Cuerpo Humano	63
IV.3.4. Resistencia del Cuerpo Humano	63
IV.3.5. Circuitos Accidentales Equivalentes	64
IV.3.6. Efecto de la Capa de Grava en la Superficie del Terreno	66
IV.3.7. Criterios de Diferencias de Potencial Permisibles	67
IV.4. Procedimiento de Diseño	70
Capítulo V. Aterrizamiento de Equipo Eléctrico	81
V.1. Introducción	82
V.2. Conexión a Tierra de los Sistemas de Alimentación de C.A.	82
V.3. Puesta a Tierra de los Equipos	83
V.3.1. Conexión a Tierra de Equipo Eléctrico	83
V.3.2. Equipos Fijos o Conectados Permanentemente	84

V.3.3. Equipos Fijos Conectados por Metodos de Cableado Permanente	84
V.3.4. Equipos Conectados con Cordón y Clavija	85
V.3.5. Equipos de Medición y Protección	86
V.3.6. Sistemas de Alimentación en C.D	86
V.4. Sistemas de Electrodo de Puesta a Tierra	86
V.5. Metodos de Aterrizamiento del Neutro del Sistema	87
Capitulo VI. Aterrizamiento de Equipo Electrónico	92
VI.1. Introduccion	93
VI.2. Sistemas de Puesta a Tierra	93
VI.3. Circuitos Dedicados y Compartidos	95
VI.4. Conexión a Tierra de Equipo Electrónico	96
VI.5. Sistema de Referencia a Tierra Para Señales de Alta Frecuencia	98
VI.6. Características Generales de un Sistema de Referencia de Tierra	98
VI.7. Resumen de las Prácticas Recomendadas para SRG's y su Instalación	99
VI.8. Resistencia a Tierra	101
Conclusiones	103
Apéndice A. Valores de impedancia de secuencia cero para cables de energía aislados	106
Apéndice B. Cálculo de Corto Circuito Monofásico	140
Apéndice C. Cálculo de un sistema de tierras	161
Bibliografía	171

INTRODUCCION

INTRODUCCIÓN.

El presente trabajo tiene por objeto establecer las especificaciones de carácter técnico que deben satisfacer las instalaciones destinadas al suministro y uso de energía eléctrica, a fin de que ofrezcan condiciones adecuadas de servicio y seguridad para las personas y del equipo.

La temática de la puesta a tierra permite enfoques muy variados. El que se ha elegido en esta tesis es pretender ir introduciendo al lector, de forma paulatina y natural en esta materia.

En los sistemas eléctricos la necesidad de proteger al personal y al equipo de trabajo de una falla eléctrica es de vital importancia; por lo tanto, en toda instalación eléctrica es necesario garantizar la seguridad de las personas que harán uso de ella. Para esto es necesario dotarla de los mecanismos de protección necesarios que correspondan para tal efecto. *Un factor determinante en cualquier sistema de protección eléctrica es la conexión a tierra de los equipos eléctricos.*

Si se quiere obtener medidas adecuadas de seguridad, es de vital importancia el diseño correcto de la conexión a tierra, de ahí que, el propósito de este trabajo es presentar en forma sencilla los estudios convencionales que se hacen en el diseño de un sistema de tierras (partiendo del estudio de *corto circuito*), de tal forma que estén al alcance de las personas interesadas en este tema.

Considerando que, en un sistema eléctrico de potencia, desde la generación hasta el consumo, se requiere mantener el suministro en forma continua, es decir, con un mínimo de interrupciones y en la cantidad y calidad que requieran los distintos tipos de usuarios, es necesario contar con las técnicas apropiadas y la tecnología moderna en la planeación, diseño y operación de éstos sistemas.

Durante la operación de los sistemas eléctricos de potencia se puede decir que el corto circuito es una condición indeseable pero en cierto modo inevitable, ya que por más confiable que sea diseñado un sistema eléctrico de potencia existen muchas causas ajenas al diseño de los mismos, que plantean la *probabilidad de ocurrencia* de una falla por corto circuito.

Las fallas según sea la naturaleza de las mismas pueden ser simétricas y asimétricas. El objetivo del estudio de corto circuito es proporcionar información sobre las corrientes y los voltajes en un sistema eléctrico durante condiciones de falla, dado que es de suma importancia por los valores que se obtienen y que se aplican en la determinación de las capacidades interruptivas, selección y coordinación de protecciones, cálculo de los esfuerzos dinámicos y térmicos en las instalaciones, así como para el diseño adecuado de un sistema de tierras.

Sabemos que un sistema eléctrico trifásico balanceado, al momento de producirse un corto circuito, este se *desbalancea*, ocasionando un desbalance de voltajes y de corrientes en las fases, tanto en magnitud como en ángulo. En el presente trabajo se analizan éstos sistemas en desbalance a través del auxilio del método de las componentes simétricas. Para ello debemos tomar en cuenta las impedancias equivalentes de secuencia del sistema en cuestión. Sabemos que, las impedancias de secuencia de las componentes individuales que conforman al sistema eléctrico en estudio, son determinadas, normalmente a través del uso de tablas y fórmulas.

En este trabajo se establecen las bases matemáticas para la obtención de valores de impedancia de cables aislados de energía con la finalidad de ser utilizados en el cálculo de corto circuito y en la determinación del conductor de regreso por tierra cuando ocurra una falla, en el apéndice A se indican algunos valores de impedancia para cables aislados de energía.

Por otro lado, la resistividad del terreno es un factor de gran importancia para el diseño de un sistema de tierras. Aunque existen tablas con valores de resistividad típicos para diferentes clases de terreno, el procedimiento más confiable es la medición directa en el sitio donde se instalará el sistema de tierras. En el presente trabajo se mencionarán varios métodos para obtener el valor de resistividad.

En toda instalación eléctrica se deberá disponer de una protección o instalación de tierra diseñada en forma tal que, en cualquier punto normalmente accesible del interior o exterior de la misma, donde las personas puedan circular o permanecer, éstas queden sometidas, como máximo, a las tensiones de paso y contacto.

Durante una falla en una subestación, el flujo de las corrientes a tierra produce gradientes de potencial dentro y alrededor de la misma. Los gradientes de potencial sobre la superficie del suelo dan lugar a los potenciales de paso y en los equipos los potenciales de contacto. Para poder entender los conceptos de potencial de paso y de contacto, es necesario entender las características de la parte más importante del circuito eléctrico: el cuerpo humano. Los efectos de la corriente eléctrica sobre las partes vitales del cuerpo humano dependen de lo siguiente: de la magnitud de la corriente eléctrica en el cuerpo, de la duración a la exposición y de la resistencia eléctrica del cuerpo.

En la presente tesis se dan los lineamientos básicos para el aterrizamiento de equipo eléctrico y electrónico, para la operación correcta de éstos y como medio de seguridad para quienes laboran con ellos

El diseño de una red de tierras se considera, por lo general, una tarea fácil, sin embargo, es un problema complejo si se incluyen en forma realista todos los factores que determinan su comportamiento.

Por consiguiente, en los últimos años se han realizado gran cantidad de trabajos de investigación, que por medio del planteamiento de diversas teorías han llegado al desarrollo de procedimientos de cálculo de redes de tierra, por ello, en el presente trabajo se describe una metodología simplificada, capaz de determinar el diseño de un sistema de tierras, así como su comportamiento esperado. En el apéndice B y C se da un ejemplo de ésta metodología.

CAPITULO I

SISTEMAS TRIFASICOS

I. SISTEMAS TRIFÁSICOS

I.1. INTRODUCCIÓN.

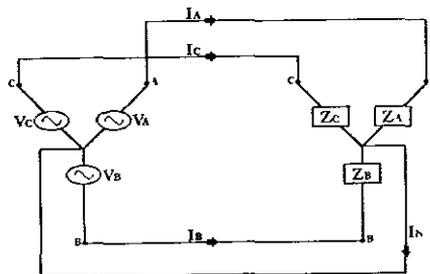
Hoy en día se requiere de sistemas de energía eléctrica cada vez más confiables con la mejor calidad y seguridad que sea posible; de ahí que, el diseño de estos sistemas estén en función de diversos estudios, como lo es el estudio de corto circuito.

En el presente capítulo se proporciona la teoría y las bases matemáticas necesarias para el análisis de un sistema eléctrico trifásico que se encuentra en desequilibrio (desbalanceado), a causa de un corto circuito; con la finalidad de obtener valores de corrientes y de voltajes durante condiciones de falla

El estudio de *corto circuito en un sistema eléctrico de potencia* es de gran interés y fundamental para la aplicación de la determinación de un diseño de tierras, tal como se verá más adelante.

I.2. SISTEMA TRIFÁSICO BALANCEADO.

Dado el siguiente sistema trifásico:



Se dice que un sistema trifásico es balanceado o equilibrado, cuando se cumple:

- a) Las impedancias por fase, son iguales en magnitud y ángulo:

$$Z_A = Z_B = Z_C = |Z| \angle \theta^\circ \quad [\Omega]$$

por lo que, la carga debe estar equitativamente distribuida entre las fases del sistema trifásico.

- b) Las magnitudes de voltaje de fase al neutro, y de voltajes entre fases; respectivamente, en cada punto del sistema, son iguales:

$$|V_A| = |V_B| = |V_C|$$

$$|V_{AB}| = |V_{BC}| = |V_{CA}|$$

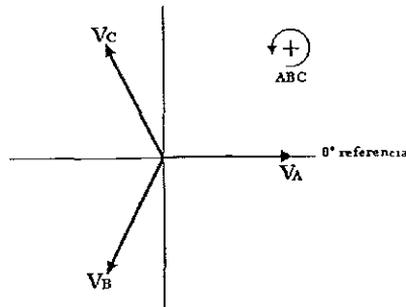
c) Las magnitudes de las corrientes por fases, en un punto del sistema son iguales:

$$|I_A| = |I_B| = |I_C|$$

d) En el caso de que exista el neutro, la corriente del neutro es cero

$$I_N = I_A + I_B + I_C = 0$$

e) Los fasores de voltajes, respectivamente, están defasados un ángulo de 120° uno del otro, cuya secuencia de fases es positiva (+), ABC y sentido levógiro.



Donde:

$$V_A = |V_A| \angle 0^\circ$$

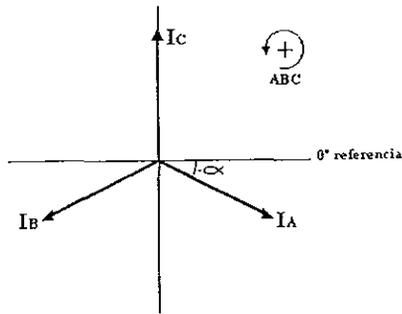
$$V_B = |V_B| \angle -120^\circ = |V_B| \angle 240^\circ = |V_A| \angle -120^\circ = V_A \angle -120^\circ$$

$$V_C = |V_C| \angle 120^\circ = |V_C| \angle -240^\circ = |V_A| \angle 120^\circ = V_A \angle 120^\circ$$

por lo que también, se cumple

$$V_A + V_B + V_C = 0$$

f) Los fasores de corrientes, respectivamente, están defasados un ángulo de 120° uno del otro, cuya secuencia de fases es positiva (+), ABC y sentido levógiro.



Donde:

$$I_A = |I_A| \angle -\alpha^\circ$$

$$I_B = |I_B| \angle -120^\circ - \alpha^\circ = |I_B| \angle 240^\circ - \alpha^\circ = |I_A| \angle -120^\circ - \alpha^\circ$$

$$I_C = |I_C| \angle 120^\circ - \alpha^\circ = |I_C| \angle -240^\circ - \alpha^\circ = |I_A| \angle 120^\circ - \alpha^\circ$$

por lo que también, se cumple:

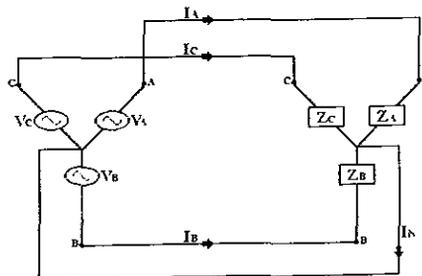
$$I_A + I_B + I_C = 0$$

En general, un sistema trifásico es balanceado cuando todos los voltajes, ya sean de fase al neutro o entre fases, son iguales en magnitud y están defasados 120° entre sí; y además, las impedancias de la carga por fase son iguales en magnitud y ángulo; por consiguiente, las corrientes son iguales en magnitud y 120° desfasadas.

Por lo tanto, un sistema trifásico balanceado o equilibrado, en condiciones normales de operación es simétrico.

1.3. SISTEMA TRIFÁSICO DESBALANCEADO.

Dado el siguiente sistema trifásico:



Se dice que un sistema trifásico es desbalanceado o desequilibrado, cuando

a) Las impedancias por fase, son desiguales en magnitud o en ángulo:

$$\begin{aligned} Z_A &= |Z_A| \angle \theta^\circ & Z_A &= |Z| \angle \theta^\circ \\ Z_B &= |Z_B| \angle \alpha^\circ & \text{ó,} & Z_B &= |Z| \angle \alpha^\circ \\ Z_C &= |Z_C| \angle \beta^\circ & & Z_C &= |Z| \angle \beta^\circ \end{aligned}$$

o bien, en magnitud como en ángulo:

$$\begin{aligned} Z_A &= |Z_A| \angle \theta^\circ \\ Z_B &= |Z_B| \angle \alpha^\circ \\ Z_C &= |Z_C| \angle \beta^\circ \end{aligned}$$

por lo que, la carga está desbalanceada.

b) En un sistema trifásico balanceado, al momento de producirse un corto circuito: simétrico (trifásico) o asimétrico (fase a tierra, dos fases a tierra o entre dos fases; ya sea directamente o a través de una impedancia); el sistema trifásico se desbalancea, es decir, se desequilibra; teniéndose un desbalance de voltajes y corrientes, en magnitud y en ángulo.

Además, la corriente por neutro será distinta de cero:

$$I_N = I_A + I_B + I_C \neq 0$$

- c) Las fuerzas electromotrices aplicadas, no estén balanceadas o equilibradas.
- d) Existan conductores abiertos.

En general, un sistema trifásico es desbalanceado cuando las impedancias de la carga son no balanceadas o al producirse un corto circuito, donde todos los voltajes y todas las corrientes, son desiguales en magnitud como en ángulo.

1.4. ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO.

Un corto circuito se produce cuando existe contacto entre dos o más conductores de distinta fase o entre un conductor de fase y tierra, o bien entre dos conductores de distinta fase y tierra; ocasionando un desbalance en el sistema eléctrico en cuestión.

Normalmente, la corriente que circula por el sistema eléctrico, aumenta considerablemente en magnitud, al producirse un corto circuito.

El corto circuito es una condición indeseable en un sistema eléctrico, pero que se puede presentar con una determinada probabilidad por diferentes causas, por lo que se debe considerar en el diseño del sistema eléctrico en cuestión; con la finalidad de prevenir sus efectos que éste ocasiona y de

proveer de elementos de desconexión y de protección adecuados, así como de la coordinación de los mismos

En general, un estudio de corto circuito sirve para:

- a) Determinar las características interruptivas de los elementos de desconexión (interrupción) de las corrientes de corto circuito, como lo son: interruptores, fusibles, etc.
- b) Realizar un estudio para la selección y coordinación de los dispositivos de protección (relevadores, etc.) contra las corrientes de corto circuito.
- c) Realizar estudios térmicos y dinámicos, debidos a los efectos de las corrientes de corto circuito en elementos de las instalaciones (barras, tableros, cables, etc.).
- d) Relacionar los efectos del corto circuito con otros estudios del sistema eléctrico en cuestión (por ejemplo, el estudio de la estabilidad del sistema).
- e) Determinar el diseño de sistemas de tierras, como protección del sistema eléctrico en cuestión así como una medida de seguridad del personal, tal como se analizará más adelante.

Por lo tanto, es importante para cualquier sistema eléctrico, hacer el estudio de corto circuito; por lo que, es necesario saber en principio que elementos intervienen y en que forma

Un sistema eléctrico esta formado básicamente por fuentes generadoras de energía, elementos de transformación, líneas de transmisión y redes de distribución, así como de elementos de consumo (cargas)

En términos eléctricos, se pueden clasificar en elementos activos (fuentes de generación de energía eléctrica: generadores, motores, etc.), y en elementos pasivos (en general, impedancias de los distintos elementos que constituyen al sistema eléctrico en cuestión: generadores, líneas de transmisión, transformadores, cargas inductivas, capacitivas y resistivas).

En conclusión, al ocurrir una falla de corto circuito en un sistema eléctrico trifásico balanceado, sus ángulos y magnitudes de voltaje como de corriente varían, convirtiéndose en un sistema desbalanceado, cuyo análisis para la determinación de estos ángulos y magnitudes, comúnmente se requiere del auxilio de una técnica denominada "método de componentes simétricas", el cual, es resolver problemas de sistemas trifásicos desbalanceados en términos de sistemas trifásicos balanceados. Por lo tanto, se tiene la ventaja de trabajar con sistemas balanceados, ya que pueden ser analizados con base en una sola fase.

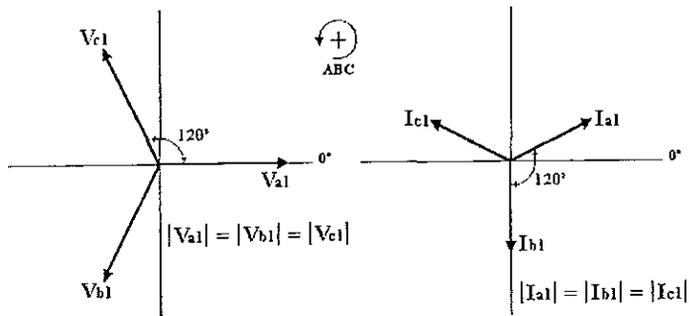
1.4.1. MÉTODO DE LAS COMPONENTES SIMÉTRICAS.

El método de las componentes simétricas establece que un sistema eléctrico trifásico desbalanceado puede descomponerse en tres sistemas trifásicos llamados de secuencia; es decir, todo sistema trifásico desbalanceado, representado por tres fasores desbalanceados, puede substituirse por la suma de tres sistemas de fasores: un sistema directo o de secuencia positiva, un sistema inverso o de

secuencia negativa y un sistema homopolar o de secuencia cero, que constituyen las componentes simétricas del sistema eléctrico trifásico desbalanceado

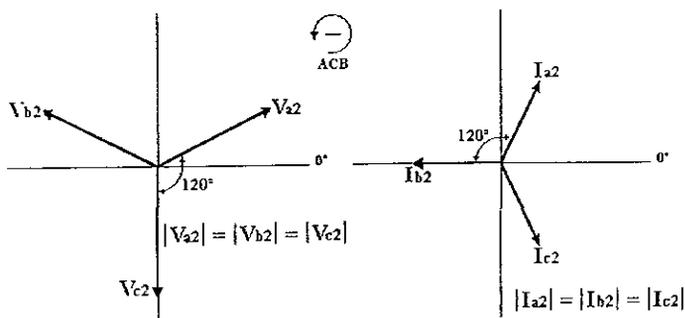
↳ Sistema de componentes de secuencia positiva.

Denotado por el subíndice "1", es un sistema trifásico que consiste de tres fasores de igual magnitud, defasados 120° uno de otro, cuya secuencia de fases es ABC.



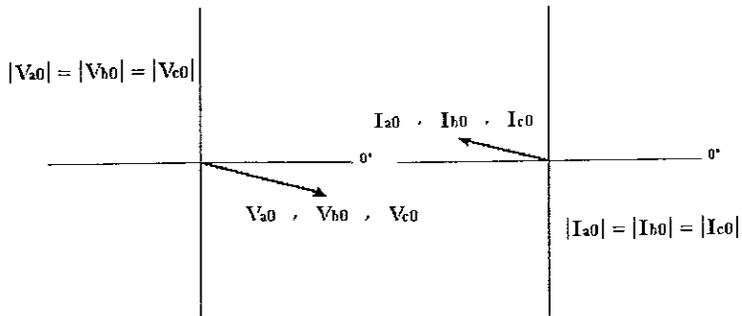
↳ Sistema de componentes de secuencia negativa.

Denotado por el subíndice "2", es un sistema trifásico que consiste de tres fasores de igual magnitud, defasados 120° uno de otro, cuya secuencia de fases es ACB.



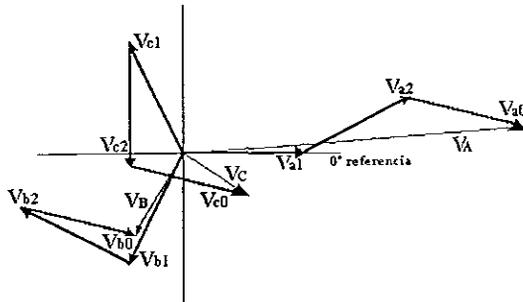
↳ Sistema de componentes de secuencia cero.

Denotado por el subíndice "0", es un sistema trifásico que consiste de tres fasores de igual magnitud y en fase, es decir, sin defasamiento alguno entre ellos.



Sabemos que, cada fasor desbalanceado de voltaje o de corriente, se puede expresar en términos de sus componentes simétricas:

Para voltajes:



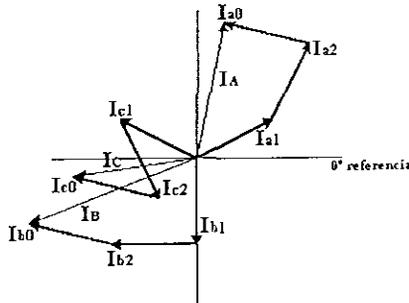
Donde:

$$V_A = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_B = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0}$$

$$V_C = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0}$$

Para corrientes:



Donde:

$$I_A = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_B = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0}$$

$$I_C = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0}$$

En virtud de los defasamientos que existen de las componentes simétricas de los fasores de voltaje y corriente en los sistemas eléctricos trifásicos, es conveniente usar una técnica de representación de la rotación ó defasamiento de los fasores a 120° ; comúnmente se emplea, la letra "a" para designar un operador que causa una rotación de 120° en sentido contrario a las manecillas del reloj

Operador "a".

El operador "a", es un número complejo de magnitud unitaria y un ángulo de 120° :

$$a = 1 \angle 120^\circ = \cos 120^\circ + j \sen 120^\circ$$

$$a = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

por otro lado, se deducen las siguientes funciones:

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ = \cos 240^\circ + j \sen 240^\circ$$

$$= -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^3 = 1 \angle 360^\circ = \cos 360^\circ + j \sen 360^\circ$$

$$= 1 + j0 = 1$$

$$a^2 + a + 1 = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} + 1 = 0$$

Si a las relaciones de las componentes simétricas antes obtenidas, les aplicamos el operador "a", tomando como referencia la fase A, tenemos que:

Para voltajes:

$$V_A = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_B = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} = a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_C = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} = a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0}$$

en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{a2} \\ V_{a0} \end{bmatrix}$$

despejando V_{a1} , V_{a2} y V_{a0} , tenemos que:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{a2} \\ V_{a0} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \end{aligned}$$

o bien :

$$V_{a1} = 1/3(V_A - aV_B + a^2V_C)$$

$$V_{a2} = 1/3(V_A + a^2V_B + aV_C)$$

$$V_{a0} = 1/3(V_A + V_B + V_C)$$

Para corrientes:

$$I_A = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_B = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} = a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_C = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} = a I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{a0}$$

en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a0} \end{bmatrix}$$

despejando I_{a1} , I_{a2} y I_{a0} , tenemos que:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a0} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \end{aligned}$$

o bien :

$$I_{a1} = 1/3(I_A + aI_B + a^2I_C)$$

$$I_{a2} = 1/3(I_A + a^2I_B + aI_C)$$

$$I_{a0} = 1/3(I_A + I_B + I_C)$$

Por lo tanto, se está en posibilidad de:

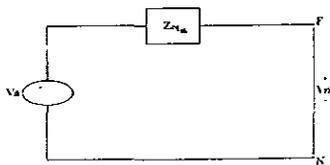
- a) Calcular las cantidades de fase, ya sea de voltaje o de corriente, conociendo las componentes simétricas
- b) Calcular las componentes simétricas en función de las cantidades de fase, ya sea de voltaje o de corriente

1.4.2. REDES DE SECUENCIA.

Una condición para un sistema eléctrico balanceado es que en el punto de falla, las tres componentes de secuencia positiva, negativa y cero, sean independientes, una de otra, y que no reaccionen entre sí; por lo que es siempre necesario formar los tres diagramas de secuencia a través de una red de secuencia.

Una red de secuencia consiste en la representación de un sistema eléctrico trifásico a través de un diagrama de fase a neutro (diagrama unifilar); teniendo en consideración el comportamiento de los generadores, motores, transformadores y las impedancias del sistema, así como, la influencia de las distintas conexiones trifásicas de los generadores y transformadores

En general, una red de secuencia es un circuito equivalente de Thevenin, formado por una fuente de voltaje y una impedancia equivalente conectada en serie, el cual representa una fase del circuito eléctrico trifásico.



En todos los casos se supondrá que las fuerzas electromotrices de los generadores del sistema están equilibradas y que el sistema trifásico es simétrico, o sea que las impedancias propias de las tres fases son iguales entre sí y las impedancias mutuas entre fases son también iguales entre sí, de manera que la única asimetría se produce en el punto de falla.

↳ **Red de secuencia positiva.**

La red de secuencia positiva, es donde se pueden representar todos los voltajes de fuentes de generación de energía eléctrica (tales como generadores y motores), en serie con la impedancia equivalente de la red al punto de falla (la cual es reducida a su mínima expresión a través del teorema de Thevenin, teniendo en consideración todos los elementos que forma parte del sistema eléctrico en cuestión, como la de los generadores, transformadores, líneas de transmisión y cargas)

↳ **Red de secuencia negativa.**

La red de secuencia negativa, es generalmente idéntica a la red de secuencia positiva, excepto:

- a) Los voltajes de las fuentes de generación, no deben ser representados, es decir, no aparecen, ya que una fuente de generación únicamente tiene componentes de secuencia positiva por tener fuerzas electromotrices equilibradas.
- b) El valor de la reactancia de secuencia negativa de las máquinas sincronas, ocasionalmente puede ser diferente al valor de la secuencia positiva.

↳ **Red de secuencia cero.**

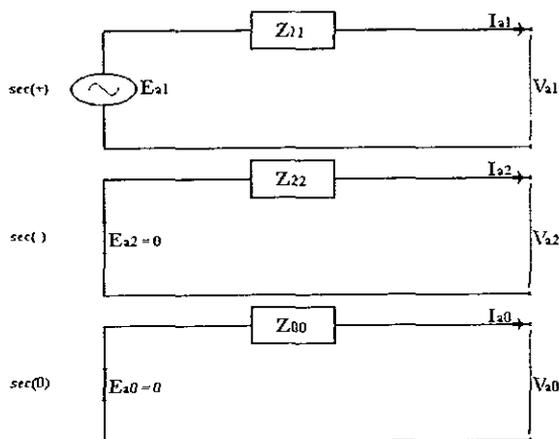
La red de secuencia cero, es generalmente idéntica a la red de secuencia negativa, excepto:

- a) Dependiendo del tipo de conexiones de los transformadores, es necesario hacer consideraciones especiales.
- b) Las impedancias a tierra, tales como reactores o resistencias conectadas entre los neutros de generadores o transformadores y tierra, únicamente se deben mostrar en la red de secuencia cero.

Lo anterior, es válido siempre y cuando se respeten estrictamente las reglas que limitan el uso de las componentes simétricas, que son:

- a) Los voltajes de secuencia positiva, negativa o cero, inducen únicamente corrientes de secuencia positiva, negativa o cero, respectivamente.
- b) Las corrientes de determinada secuencia, sólo podrán producir voltajes de esa misma secuencia.
- c) Los elementos activos de la red, sólo generan voltajes de secuencia positiva
- d) Los voltajes de secuencia negativa y cero, disminuyen en magnitud tan pronto nos alejamos del punto de falla
- e) El voltaje de secuencia positiva es cero en el punto de falla y máximo en los puntos de generación
- f) Como las corrientes de secuencia cero, están en fase y son de la misma magnitud, por lo que necesitan de un camino para poder circular, es decir, de la conexión a tierra.

Por lo tanto, la representación de las redes de secuencia positiva, negativa y cero, para sustituir al circuito trifásico desbalanceado, serán:



de donde

$$V_{a1} = E_{a1} - Z_{11}I_{a1}$$

$$V_{a2} = E_{a2} - Z_{22}I_{a2} = -Z_{22}I_{a2}$$

$$V_{a0} = E_{a0} - Z_{00}I_{a0} = -Z_{00}I_{a0}$$

donde:

Z_{11} = Impedancia propia de secuencia positiva del sistema eléctrico en cuestión, es decir, es la impedancia equivalente de la red de secuencia positiva entre el punto de falla y referencia (neutro).

Z_{22} = Impedancia propia de secuencia negativa del sistema eléctrico en cuestión, es decir, es la impedancia equivalente de la red de secuencia negativa entre el punto de falla y referencia (neutro)

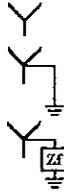
Z_{00} = Impedancia propia de secuencia cero del sistema eléctrico en cuestión, es decir, es la impedancia equivalente de la red de secuencia cero entre el punto de falla y referencia (neutro)

1.4.3. REPRESENTACIÓN DE IMPEDANCIAS DE ELEMENTOS DE UN SISTEMA ELÉCTRICO EN LAS REDES DE SECUENCIA POSITIVA, NEGATIVA Y CERO.

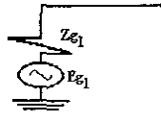
▢ Generadores.

Secuencia (+).- La representación de un generador en la red de secuencia positiva y considerando que un generador sólo tiene componentes de secuencia positiva por tener un sistema de fuerzas electromotrices equilibradas, será:

Conexión trifásica.



Representación de un generador.



Z_{g1} = Impedancia propia de secuencia positiva del generador.
 E_{g1} = Fuente de voltaje del generador.

Secuencia (-).- La representación de un generador en la red de secuencia negativa, será

Conexión trifásica.



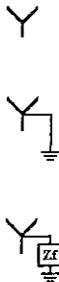
Representación de un generador.



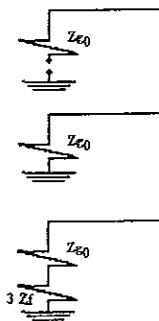
Z_{g2} = Impedancia propia de secuencia negativa del generador.

Secuencia (0).- La representación de un generador en la red de secuencia cero dependerá de la conexión que éste tenga con respecto al neutro.

Conexión trifásica.



Representación de un generador.



Z_{g0} = Impedancia propia de secuencia cero del generador.
 Z_f = Impedancia propia de secuencia cero con que se aterriza el neutro del generador.

NOTA Sabemos que la corriente que pasa por la impedancia Z_f entre el neutro y tierra es:

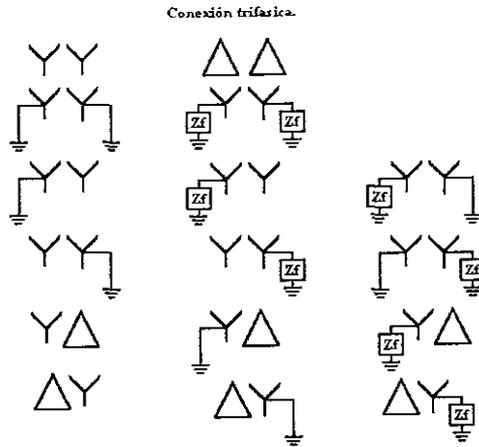
$$I_N = I_{a_0} + I_{b_0} + I_{c_0} \text{ y como } I_{a_0} = I_{b_0} = I_{c_0}, \text{ por lo tanto } I_N = 3I_{a_0}.$$

Entonces la caída de voltaje en el neutro es:

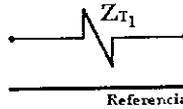
$$\begin{aligned} V_{0N} &= Z_f 3I_{a_0} \\ &= 3Z_f I_{a_0} \end{aligned}$$

↳ Transformadores.

Secuencia (+).- La representación de un transformador en la red de secuencia positiva, será:



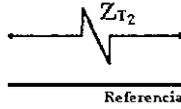
Representación de un transformador.
(Para cualquier conexión trifásica que éste tenga)



Z_{T1} = Impedancia propia de secuencia positiva del transformador.

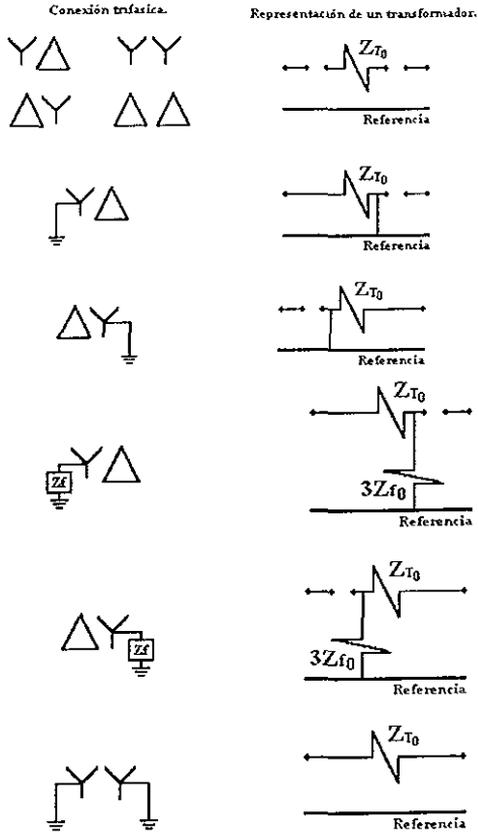
Secuencia (-).- La representación de un transformador en la red de secuencia negativa es la misma que se obtuvo en la secuencia positiva, únicamente hay que tener en consideración el valor de Z_{T2} , en éste caso, debe ser substituida por la correspondiente a la secuencia negativa.

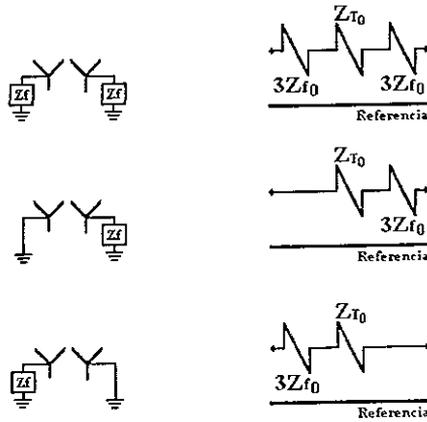
Representación de un transformador.
 (Para cualquier conexión trifásica que éste tenga)



Z_{T2} = Impedancia propia de secuencia negativa del transformador.

Secuencia (0).- La representación de un transformador en la red de secuencia cero dependerá de la conexión con respecto a su neutro que este tenga..



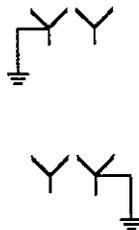


De donde, para todas las conexiones anteriores:

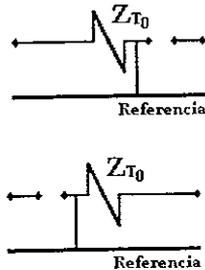
Z_{T0} = Impedancia propia de secuencia cero del transformador; (Impedancia obtenida de la prueba de corto circuito).

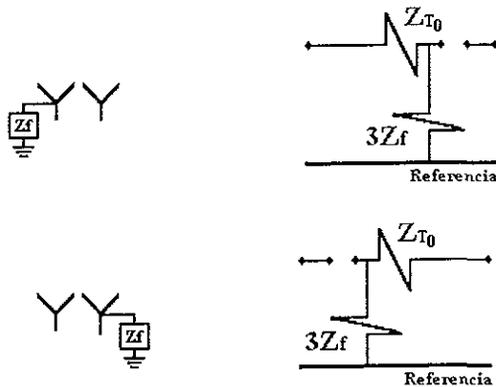
Z_f = Impedancia propia de secuencia cero conectada del neutro a tierra del transformador, donde su valor es de $3Z_f$, debido a que por el neutro circula una corriente $3I_{a0}$.

Conexión trifásica.



Representación de un transformador.





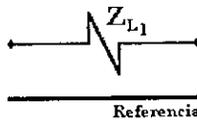
De donde, para éstas últimas conexiones:

Z_{10} = Impedancia propia de secuencia cero del transformador; (Impedancia obtenida de la prueba de circuito abierto realizada al transformador).

↳ Línea de transmisión.

Secuencia (+).- La representación de una línea de transmisión en la red de secuencia positiva, será:

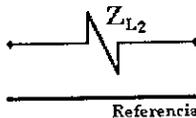
Representación de una línea de transmisión.



Z_{L1} = Impedancia propia de secuencia positiva de una línea de transmisión.

Secuencia (-).- La representación de una línea de transmisión en la red de secuencia negativa es la misma que se obtuvo en la secuencia positiva, únicamente hay que considerar su respectivo valor de impedancia para secuencia negativa.

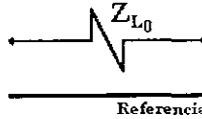
Representación de una línea de transmisión.



Z_{L2} = Impedancia propia de secuencia negativa de una línea de transmisión.

Secuencia (0).- La representación de una línea de transmisión en la red de secuencia cero es la misma que se obtuvo en la secuencia positiva, únicamente hay que substituir el valor correspondiente de impedancia para la secuencia cero.

Representación de una línea de transmisión.



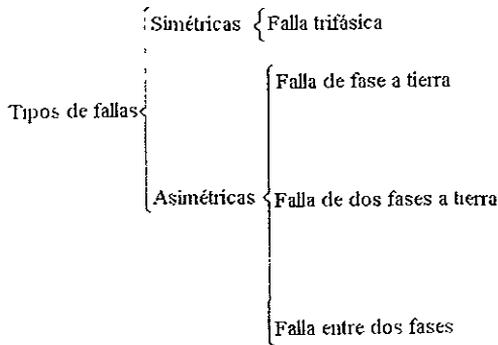
Z_{L0} = Impedancia propia de secuencia cero de una línea de transmisión.

3 Motores.

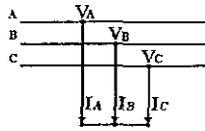
Un motor se considera como un generador, por lo que su representación en las redes de secuencia positiva, negativa y cero, es la misma que para generadores.

1.5. ANÁLISIS DE FALLAS DE CORTO CIRCUITO.

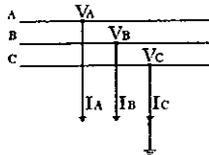
Las fallas de corto circuito se pueden clasificar:



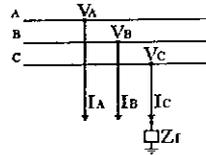
Las cuales se representan:



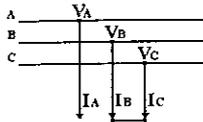
Falla trifásica



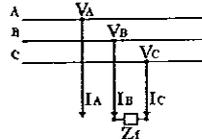
Falla de fase a tierra, (monofásica).



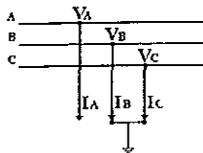
Falla de fase a tierra a través de una impedancia, Z_f



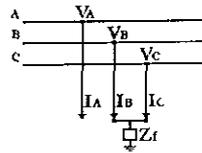
Falla entre dos fases



Falla entre dos fases a través de una impedancia, Z_f



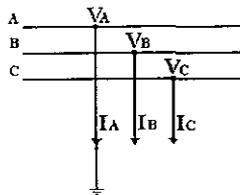
Falla entre dos fases a tierra.



Falla entre dos fases a tierra a través de una impedancia, Z_f .

1.5.1. FALLA DE FASE A TIERRA.

Dada la siguiente representación de una falla de corto circuito de fase a tierra, de un sistema trifásico.



Falla de fase a tierra, (monofásica).

de donde, las condiciones de falla son:

$$\begin{aligned} V_A &= 0 \quad (\text{después de que ocurre la falla}) \\ I_B &= 0 \\ I_C &= 0 \end{aligned}$$

Resolviendo el sistema eléctrico trifásico desbalanceado por sus componentes simétricas, tenemos que:

$$\begin{bmatrix} I_{a_1} \\ I_{a_2} \\ I_{a_0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}$$

sustituyendo las condiciones de falla, se tiene que:

$$\begin{bmatrix} I_{a_1} \\ I_{a_2} \\ I_{a_0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

desarrollando operaciones de nuestras matrices:

$$\begin{aligned} I_{a_1} &= 1/3(I_A + 0 + 0) = I_A/3 \\ I_{a_2} &= 1/3(I_A - 0 + 0) = I_A/3 \\ I_{a_0} &= 1/3(I_A + 0 + 0) = I_A/3 \end{aligned}$$

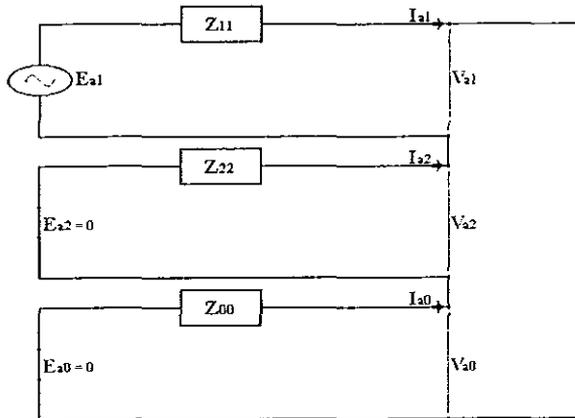
por lo que:

$$\begin{aligned} I_{a_1} &= I_{a_2} = I_{a_0} = I_A/3 \\ I_A &= 3I_{a_1} \end{aligned}$$

Para poder cumplir con la condición de la ecuación anterior, de que las corrientes de secuencia positiva, negativa y cero, sean iguales; las redes de secuencia, deberán conectarse en serie.

NOTA.- En una conexión en serie, la intensidad de corriente es la misma en todo el circuito, y la tensión o voltaje es igual a la suma aritmética de los voltajes en cada uno de los elementos que conforman al circuito.

↳ Para la fase A:



Por lo tanto, del circuito equivalente de las redes de secuencia del sistema eléctrico trifásico en desbalance, se tiene:

$$\begin{aligned} V_{a1} &= E_{a1} - Z_{11}I_{a1} \\ V_{a2} &= -Z_{22}I_{a2} \\ V_{a0} &= -Z_{00}I_{a0} \end{aligned} \quad (1)$$

de donde para la fase en cuestión y de acuerdo a su componente simétrica, tenemos que:

$$\begin{aligned} V_A &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\ &= E_{a1} - Z_{11}I_{a1} - Z_{22}I_{a2} - Z_{00}I_{a0} \end{aligned}$$

pero, por otro lado sabemos que $I_{a1} = I_{a2} = I_{a0}$ y que por la condición de falla $V_A = 0$, entonces:

$$V_A = E_{a1} - I_{a1}(Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}) = 0$$

despejando la corriente:

$$\begin{aligned} I_{a1} &= \frac{E_{a1}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \\ &= I_{a2} = I_{a0} \end{aligned}$$

por lo tanto, sustituyendo los valores de I_{a1} , I_{a2} y I_{a0} en (1), respectivamente, encontramos:

$$V_{a1} = E_{a1} - Z_{11}I_{a1} = E_{a1} - Z_{11} \left[\frac{E_{a1}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right]$$

$$V_{a1} = E_{a1} \left[1 - \frac{Z_{11}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right] = E_{a1} \left[\frac{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00} - Z_{11}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right]$$

$$V_{a1} = E_{a1} \left[\frac{Z_{22} + Z_{00}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right]$$

$$V_{a2} = -Z_{22}I_{a2} = -Z_{22} \left[\frac{E_{a1}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right]$$

$$V_{a2} = -E_{a1} \left[\frac{Z_{22}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right]$$

$$V_{a0} = -Z_{00}I_{a0} = -Z_{00} \left[\frac{E_{a1}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right]$$

$$V_{a0} = -E_{a1} \left[\frac{Z_{00}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right]$$

Una vez calculadas las componentes simétricas de corriente (I_{a1} , I_{a2} y I_{a0}), y de voltaje (V_{a1} , V_{a2} y V_{a0}), podemos calcular la corriente y el voltaje en el punto de falla

Corrientes en el punto de falla.

▢ **Para la fase A:** (fase en la cual se produce el corto circuito)
 Teniendo en cuenta lo siguiente.

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{E_{a1}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}}$$

$$I_A = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_A = \frac{3E_{a1}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}}$$

$$I_A = I_{falla} = \frac{3E_{a1}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}}$$

▢ **Para la fase B:**

$$I_B = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0}$$

$$I_B = a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_B = Ia_1(a^2 + a + 1)$$

$$I_B = 0$$

↳ Para la fase C:

$$I_C = Ic_1 + Ic_2 + Ic_0$$

$$I_C = aIa_1 + a^2Ia_2 + Ia_0$$

$$I_C = Ia_1(a + a^2 + 1)$$

$$I_C = 0$$

Voltajes en el punto de falla.

↳ Para la fase A:

$$V_A = Va_1 + Va_2 + Va_0 =$$

$$V_A = Ea_1 \left[\frac{Z_{22} + Z_{00}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right] - Ea_1 \left[\frac{Z_{22}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right] - Ea_1 \left[\frac{Z_{00}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right] = 0$$

↳ Para la fase B:

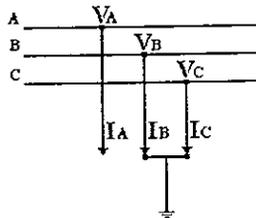
$$\begin{aligned} V_B &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} = a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \\ &= a^2 E_{a1} \left[\frac{Z_{22} + Z_{00}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right] - a E_{a1} \left[\frac{Z_{22}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right] \\ &\quad - E_{a1} \left[\frac{Z_{00}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right] \\ &= \left[\frac{a^2 E_{a1} Z_{22}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right] + \left[\frac{a^2 E_{a1} Z_{00}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right] \\ &\quad - \left[\frac{a E_{a1} Z_{22}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right] - \left[\frac{E_{a1} Z_{00}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right] \\ &= \left[\frac{(a^2 - a) Z_{22} + (a^2 - 1) Z_{00}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right] E_{a1} \end{aligned}$$

↳ Para la fase C:

$$\begin{aligned}
 V_C &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} = a V_{s1} + a^2 V_{s2} + V_{s0} \\
 &= a E_{s1} \left[\frac{Z_{22} + Z_{00}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right] - a^2 E_{s1} \left[\frac{Z_{22}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right] \\
 &\quad - E_{s1} \left[\frac{Z_{00}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right] \\
 &= \left[\frac{a E_{s1} Z_{22}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right] + \left[\frac{a E_{s1} Z_{00}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right] \\
 &\quad - \left[\frac{a^2 E_{s1} Z_{22}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right] + \left[\frac{E_{s1} Z_{00}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right] \\
 &= \left[\frac{(a - a^2) Z_{22} + (a - 1) Z_{00}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}} \right] E_{s1}
 \end{aligned}$$

1.5.2. FALLA DE DOS FASES A TIERRA.

Dada la siguiente representación de una falla de corto circuito de dos fases a tierra, de un sistema trifásico:



Falla entre dos fases a tierra.

de donde, las condiciones de falla son:

$$V_B = V_C = 0 \text{ (después de que ocurre la falla)}$$

$$I_A = 0$$

Resolviendo el sistema eléctrico trifásico desbalanceado por sus componentes simétricas, tenemos que:

$$\begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}$$

sustituyendo las condiciones de falla, se tiene que:

$$\begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

desarrollando operaciones de nuestras matrices:

$$\begin{aligned} V_{a1} &= 1/3(V_A + 0 + 0) = V_A/3 \\ V_{a2} &= 1/3(V_A + 0 + 0) = V_A/3 \\ V_{a0} &= 1/3(V_A + 0 + 0) = V_A/3 \end{aligned}$$

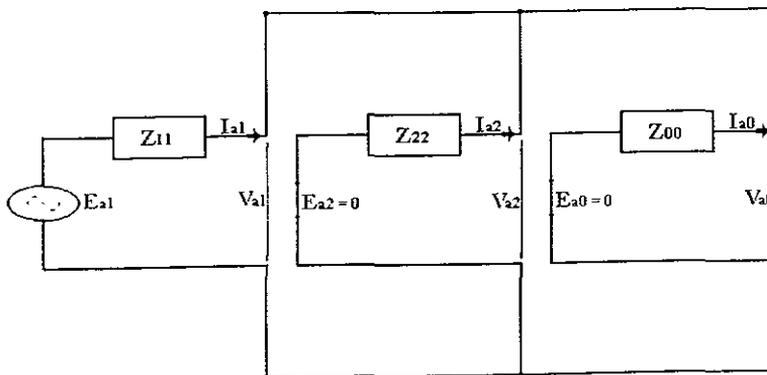
por lo que:

$$\begin{aligned} V_{a1} &= V_{a2} = V_{a0} = V_A/3 \\ V_A &= 3V_{a1} \end{aligned}$$

Para poder cumplir con la condición de la ecuación anterior, de que los voltajes de secuencia positiva, negativa y cero, sean iguales; las redes de secuencia, deberán conectarse en paralelo.

NOTA: En una conexión en paralelo, la tensión o voltaje es el mismo en todo el circuito, y la intensidad de corriente es igual a la suma aritmética de las corrientes que circulan por cada elemento que conforman al circuito.

↳ Para la fase A:



Por lo tanto, del circuito equivalente de las redes de secuencia del sistema eléctrico trifásico en desbalance, se tiene:

$$\begin{aligned} V_{a1} &= E_{a1} - Z_{11}I_{a1} \\ V_{a2} &= -Z_{22}I_{a2} \\ V_{a0} &= -Z_{00}I_{a0} \end{aligned} \quad (1)$$

despejando las corrientes I_{a1} , I_{a2} y I_{a0} , respectivamente:

$$\begin{aligned} I_{a1} &= \frac{E_{a1} - V_{a1}}{Z_{11}} \\ I_{a2} &= -\frac{V_{a2}}{Z_{22}} \\ I_{a0} &= -\frac{V_{a0}}{Z_{00}} \end{aligned} \quad (2)$$

de donde para la fase en cuestión y de acuerdo a componentes simétricas, tenemos que:

$$\begin{aligned} I_A &= I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \\ I_A &= \frac{E_{a1} - V_{a1}}{Z_{11}} - \frac{V_{a2}}{Z_{22}} - \frac{V_{a0}}{Z_{00}} \end{aligned}$$

pero, por otro lado sabemos que $V_{a1} = V_{a2} = V_{a0}$ y que por la condición de falla $I_A = 0$, entonces:

$$\begin{aligned} 0 = I_A &= \frac{E_{a1} - V_{a1}}{Z_{11}} - \frac{V_{a1}}{Z_{22}} - \frac{V_{a1}}{Z_{00}} \\ &= \frac{E_{a1}}{Z_{11}} - \frac{V_{a1}}{Z_{11}} - \frac{V_{a1}}{Z_{22}} - \frac{V_{a1}}{Z_{00}} \\ &= \frac{E_{a1}}{Z_{11}} - V_{a1} \left[\frac{1}{Z_{11}} + \frac{1}{Z_{22}} + \frac{1}{Z_{00}} \right] \\ &= \frac{E_{a1}}{Z_{11}} - V_{a1} \left[\frac{Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}}{Z_{11}Z_{22}Z_{00}} \right] \end{aligned}$$

multiplicando por $Z_{11}Z_{22}Z_{00}$ toda la expresión, tenemos que:

$$\begin{aligned} 0 = I_A &= \frac{E_{a1}}{Z_{11}} (Z_{11}Z_{22}Z_{00}) - V_{a1} \left[\frac{Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}}{Z_{11}Z_{22}Z_{00}} \right] (Z_{11}Z_{22}Z_{00}) \\ &= E_{a1}Z_{22}Z_{00} - V_{a1}(Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}) \end{aligned}$$

despejando el voltaje V_{a1}

$$V_{a1} = \frac{E_{a1}Z_{22}Z_{00}}{Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}}$$

$$= V_{a2} = V_{a0}$$

por lo tanto, substituyendo los valores de V_{a1} , V_{a2} y V_{a0} en (1), respectivamente, encontramos:

$$V_{a1} = E_{a1} - Z_{11}I_{a1} = \frac{E_{a1}Z_{22}Z_{00}}{Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}}$$

desarrollando y despejando el término $E_{a1}Z_{22}Z_{00}$ de la expresión anterior, tenemos que:

$$E_{a1}Z_{22}Z_{00} = (E_{a1} - Z_{11}I_{a1})(Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22})$$

$$= E_{a1}(Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}) - I_{a1}Z_{11}(Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22})$$

pasando el término $E_{a1}Z_{22}Z_{00}$ al otro lado de la igualdad:

$$0 = E_{a1}(Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}) - I_{a1}Z_{11}(Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}) - E_{a1}Z_{22}Z_{00}$$

$$= E_{a1}Z_{11}(Z_{00} + Z_{22}) - I_{a1}Z_{11}(Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22})$$

dividiendo entre Z_{11} toda la expresión, tenemos que:

$$0 = \frac{E_{a1}Z_{11}(Z_{00} + Z_{22}) - I_{a1}Z_{11}(Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22})}{Z_{11}}$$

$$= E_{a1}(Z_{00} + Z_{22}) - I_{a1}(Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22})$$

despejando la corriente:

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}(Z_{00} + Z_{22})}{Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}}$$

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_{11} + \frac{Z_{22}Z_{00}}{Z_{00} + Z_{22}}}$$

de otra manera, sustituyendo los valores de V_{a1} , V_{a2} y V_{a0} en (2), respectivamente, encontramos

$$I_{a2} = - \frac{V_{a2}}{Z_{22}} - \frac{E_{a1}Z_{22}Z_{00}}{Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}}$$

$$I_{a2} = - \frac{E_{a1}Z_{00}}{Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}}$$

$$I_{a0} = - \frac{V_{a0}}{Z_{00}} - \frac{E_{a1}Z_{22}Z_{00}}{Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}}$$

$$I_{a0} = - \frac{E_{a1}Z_{22}}{Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}}$$

Una vez calculadas las componentes simétricas de corriente (I_{a1} , I_{a2} y I_{a0}), y de voltaje (V_{a1} , V_{a2} y V_{a0}); podemos calcular la corriente y el voltaje en el punto de falla

Corrientes en el punto de falla.

↳ Para la fase A:

$$I_A = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_A = \left[\frac{E_{a1}(Z_{00} + Z_{22})}{Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}} \right] - \left[\frac{E_{a1}Z_{00}}{Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}} \right] - \left[\frac{E_{a1}Z_{22}}{Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}} \right]$$

$$I_A = 0$$

↳ Para la fase B:

$$I_B = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} = a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0}$$

$$= \left[\frac{a^2 E_{a1} (Z_{00} + Z_{22})}{Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}} \right] - \left[\frac{a E_{a1} Z_{00}}{Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}} \right] - \left[\frac{E_{a1} Z_{22}}{Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}} \right]$$

$$= \left[\frac{E_{a1}}{Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}} \right] (a^2 Z_{00} + a^2 Z_{22} + a Z_{00} + Z_{22})$$

$$= \left[\frac{(a^2 - 1)Z_{22} + (a^2 - a)Z_{00}}{Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}} \right] E_{a1}$$

↳ Para la fase C:

$$\begin{aligned}
 I_C &= I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} = a I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{a0} \\
 &= \left[\frac{a E_{a1} (Z_{00} + Z_{22})}{Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}} \right] - \left[\frac{a^2 E_{a1}Z_{00}}{Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}} \right] \\
 &\quad - \left[\frac{E_{a1}Z_{22}}{Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}} \right] \\
 &= \left[\frac{E_{a1}}{Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}} \right] (a Z_{00} + a Z_{22} - a^2 Z_{00} - Z_{22}) \\
 &= \left[\frac{(a - a^2)Z_{00} + (a - 1)Z_{22}}{Z_{22}Z_{00} + Z_{11}Z_{00} + Z_{11}Z_{22}} \right] E_{a1}
 \end{aligned}$$

por lo tanto, la corriente de la falla de dos fases a tierra, es .

$$I_{\text{falla}} = I_B + I_C$$

Voltajes en el punto de falla.

↳ Para la fase A:

$$\begin{aligned}
 V_A &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\
 &= 3 E_{a1} \left[\frac{Z_{22}Z_{00}}{Z_{11}Z_{22} + Z_{11}Z_{00} + Z_{22}Z_{00}} \right]
 \end{aligned}$$

↳ Para la fase B:

$$\begin{aligned}
 V_B &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \\
 &= a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \\
 &= V_{a1} (a^2 + a + 1) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

↳ Para la fase C:

$$\begin{aligned}
 V_C &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \\
 &= a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0} \\
 &= V_{a1} (a + a^2 + 1) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

CAPITULO II

CABLES AISLADOS

II. CABLES AISLADOS

II.1. INTRODUCCION.

La importancia de una línea de transmisión de energía eléctrica depende además de las características del conductor, de la disposición con respecto a los otros conductores del sistema eléctrico trifásico para la secuencia positiva y negativa (que tienen el mismo valor) y de las propiedades del terreno, de la pantalla metálica, así como de las características físicas de ésta pantalla y su disposición respecto a los conductores del sistema eléctrico para la secuencia cero.

En el presente capítulo se establecerán las bases matemáticas para la obtención de los valores de impedancia de secuencia positiva, negativa y cero de cables aislados de energía; con la finalidad de ser utilizados en el cálculo de corto circuito y en la determinación del conductor de regreso por tierra, en caso de una falla, así como se proporcionan tablas con valores de impedancia de secuencia cero, para diferentes calibres y voltajes.

II.2. CALCULO DE IMPEDANCIAS DE SECUENCIAS .

II.2.1. CABLES DE ENERGÍA AISLADOS.

La función primordial de un cable de energía aislado es la de transmitir energía eléctrica a una corriente y tensión preestablecidas, durante un determinado tiempo.

Los elementos adecuados para cumplir con las funciones antes mencionadas, son:

- a) El conductor, por el cual fluye la corriente eléctrica.
- b) El aislamiento, que soporta la tensión aplicada.
- c) La cubierta, que proporciona la protección contra el ataque del tiempo y los agentes externos.

Las cubiertas metálicas, en adición a las funciones descritas, proporcionan una conductancia aprovechable para conducir corrientes de falla; y fines electrostáticos.

- d) Un cuarto elemento fundamental en la operación correcta de un cable de energía aislado lo constituyen las pantallas (sobre el conductor y sobre el aislamiento), que como función principal permiten una distribución de los esfuerzos eléctricos en el aislamiento en forma radial y simétrica.

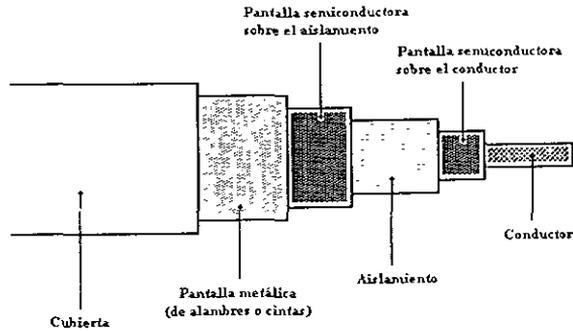


Figura No. 1 Cable de Energía Aislado para mediana y Alta Tensión.

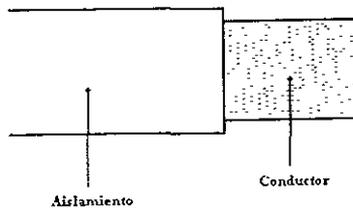


Figura No. 2. Cable de Energía Aislado de Baja Tensión

Para el buen funcionamiento de un sistema de tierras de un sistema eléctrico donde se tienen cables de energía aislados, es de suma importancia el considerar la pantalla metálica para la circulación de corrientes de secuencia cero.

La pantalla metálica puede ser de alambres, cintas planas o corrugadas, o una combinación de alambres y cintas. El diseño de la pantalla metálica se debe efectuar de acuerdo con el propósito de diseño, que puede ser:

- a) Para propósitos electrostáticos
- b) Para conducir corriente de falla En la pantalla metálica se puede requerir una conductancia adicional para conducir corriente de falla (dependiendo de la instalación y características eléctricas del sistema) particularmente con relación al funcionamiento de dispositivos de protección por sobrecorriente, corriente prevista de falla fase a tierra y la manera en que el sistema puede ser aterrizado.
- c) Para ser operada como neutro.

Las pantallas sobre el aislamiento deben ser consideradas para cables de energía diseñados para 5000 [V] ó más.

En todas las terminaciones de los cables, se deben remover las pantallas completamente y sustituir por un cono de alivio de esfuerzos adecuado. Si las pantallas no se retiran, se presentarán arcos superficiales del conductor a los puntos de menor potencial, carbonización a lo largo de la pantalla y deterioro del aislamiento.

El cono de alivio es importante, ya que siempre se forma un área de esfuerzos concentrados al final de la pantalla aterrizada.

La pantalla metálica debe operar todo el tiempo cerca de o al potencial de tierra. La pantalla que no tiene la conexión a tierra adecuada es más peligrosa que el cable sin pantalla, desde el punto de vista seguridad. Además del peligro para el personal, una pantalla "flotante" puede ocasionar daños al cable. Si el potencial de dicha pantalla es tal que perfora la cubierta, la descarga resultante producirá calor y quemaduras al cable. Las pantallas deben conectarse, preferentemente, en dos o más puntos. En caso de ser conectadas en un solo punto, deberán tomarse precauciones especiales.

Se recomienda aterrizarse la pantalla en ambas terminales y en todos los empalmes. La mayor frecuencia de conexiones a tierra reduce la posibilidad de secciones de pantalla "flotante", y aumenta la posibilidad de una adecuada conexión a tierra de todo el cable instalado.

Todas las conexiones de la pantalla se deberán realizar de tal manera que se provea al cable de una conexión segura, durable y de baja resistencia eléctrica.

II.3. CABLES AISLADOS DE MEDIANA Y ALTA TENSIÓN.

II.3.1. IMPEDANCIA DE SECUENCIA POSITIVA Y NEGATIVA.

La impedancia de secuencia positiva y negativa, se calcula de la siguiente manera:

$$Z_{11} = Z_{22} = (r_c + r) + j(x_a + x_d + x) \text{ } [\Omega/\text{MILLA}]$$

De donde:

r_c = Resistencia de AC de un conductor, en Ω/MILLA .

x_a = Reactancia inductiva propia del conductor.

$$x_d = 0.2794 \frac{f}{60} \log \frac{12}{\text{RMG}_{1c}} \text{ } [\Omega/\text{MILLA}]$$

RMG_{1c} = Radio medio geométrico de un conductor, en pulgadas.

f = Frecuencia de operación del sistema, en hertz.

λ_d = Reactancia inductiva mutua entre conductores; generalmente para cables aislados la distancia media geométrica entre conductores es menor a un pie.

$$\lambda = 0.2794 \frac{f}{60} \log \frac{DMG_{3C}}{12} [\Omega / MILLA]$$

DMG_{3C} = Distancia media geométrica entre conductores.

$$DMG_{3C} = \sqrt[3]{d_{ab} \cdot d_{bc} \cdot d_{ca}} \quad [\text{pulgadas}]$$

d_{ab} = Distancia entre centros de los conductores de la fase a y fase b, en pulgadas.

d_{bc} = Distancia entre centros de los conductores de la fase b y fase c, en pulgadas.

d_{ca} = Distancia entre centros de los conductores de la fase c y fase a, en pulgadas.

r, λ = Resistencia y reactancia inductiva, respectivamente; que representan las pérdidas adicionales de la corriente al fluir en la pantalla metálica por el efecto del voltaje inducido sobre ésta al circular la corriente en el conductor.

Estos valores de resistencia y reactancia, dependerán de la resistencia de la pantalla metálica; y de la reactancia inductiva mutua entre el conductor y la pantalla metálica.

↳ Para cables monofásicos.

$$r = \frac{r_s x_m^2}{r_s^2 + x_m^2} [\Omega / MILLA]$$

$$x = \frac{x_m^3}{r_s^2 + x_m^2} [\Omega / MILLA]$$

Donde:

r_s = Resistencia de la pantalla metálica.

$$r_s = \frac{0.200}{(r_o + r_i)(r_o - r_i)} [\Omega / MILLA]$$

λ_o = Reactancia inductiva mutua entre el conductor y la pantalla metálica.

$$\lambda_o = 0.2794 \frac{f}{60} \log \frac{2S}{r_o + r_i} [\Omega / MILLA]$$

r_o = Radio exterior de la pantalla metálica, en pulgadas

r_i = Radio interior de la pantalla metálica, en pulgadas.

S = Espacio entre los centros de los conductores, en pulgadas.

↳ Para cables trifásicos.

$$r = 0.04416 \frac{S^2}{r_s (r_o + r_s)^2} [\Omega/\text{MILLA}]$$

S = Distancia entre el centro del conductor y el centro de la pantalla metálica para el cable trifásico.

$$S = \frac{d + 2T}{3} [\text{pulgadas}]$$

d = Diámetro del conductor, en pulgadas.

T = Espesor del aislamiento del conductor, en pulgadas.

$x = 0$, el efecto de la corriente de la pantalla metálica es despreciable.

Por lo tanto, en forma general, la impedancia de secuencia positiva y negativa se calcula de la siguiente manera.

↳ Para cables monofásicos.

$$Z_{11} = Z_{22} = (r_c + r) + j(x_a + x_d - x) [\Omega/\text{MILLA}]$$

$$= r_c + \frac{r_s x_m^2}{r_s^2 + x_m^2} + j \left(0.2794 \frac{f}{60} \log \frac{12}{\text{RMG}_{1c}} + 0.2794 \frac{f}{60} \log \frac{\text{DMG}_{3c}}{12} - \frac{x_m^3}{r_s^2 + x_m^2} \right) [\Omega/\text{MILLA}]$$

$$= r_c + \frac{r_s x_m^2}{r_s^2 + x_m^2} + j \left(0.2794 \frac{f}{60} \log \frac{\text{DMG}_{3c}}{\text{RMG}_{1c}} - \frac{x_m^3}{r_s^2 + x_m^2} \right) [\Omega/\text{MILLA}]$$

↳ Para cables trifásicos.

$$Z_{11} = Z_{22} = (r_c + r) + j(x_a + x_d) [\Omega/\text{MILLA}]$$

$$= r_c + 0.04416 \frac{S^2}{r_s (r_o + r_s)^2} + j \left(0.2794 \frac{f}{60} \log \frac{12}{\text{RMG}_{1c}} + 0.2794 \frac{f}{60} \log \frac{\text{DMG}_{3c}}{12} \right) [\Omega/\text{MILLA}]$$

$$= r_c + 0.04416 \frac{S^2}{r_s (r_o + r_s)^2} + j \left(0.2794 \frac{f}{60} \log \frac{\text{DMG}_{3c}}{\text{RMG}_{1c}} \right) [\Omega/\text{MILLA}]$$

11.3.2. IMPEDANCIA DE SECUENCIA CERO.

Como hemos visto, en la teoría de las componentes simétricas, las corrientes de secuencia positiva y de secuencia negativa constituyen sistemas trifásicos balanceados y por lo tanto no circulan corrientes a tierra, es decir:

Secuencia positiva:

$$I_{a_1} + I_{b_1} + I_{c_1} = 0$$

por lo tal, la corriente de neutro será:

$$I_n = I_{a_1} + I_{b_1} + I_{c_1} = 0$$

Secuencia negativa:

$$I_{a_2} + I_{b_2} + I_{c_2} = 0$$

por lo tal, la corriente de neutro será:

$$I_n = I_{a_2} + I_{b_2} + I_{c_2} = 0$$

Por otro lado, en la **secuencia cero**, las corrientes I_{a_0} , I_{b_0} e I_{c_0} tienen la misma magnitud y el mismo ángulo, es decir:

$$|I_{a_0}| \angle \theta^\circ = |I_{b_0}| \angle \theta^\circ = |I_{c_0}| \angle \theta^\circ$$

por lo tanto, la corriente de neutro será:

$$I_n = I_{a_0} + I_{b_0} + I_{c_0} = 3I_{a_0}$$

Por lo tal, cuando existe una corriente de secuencia cero, ésta necesita de una trayectoria por donde circular o fluir.

Cuando la corriente de secuencia cero fluye a través de los conductores de un circuito trifásico, se presentan tres posibles trayectorias:

- 1 Que el regreso de la corriente de secuencia cero se haga únicamente por tierra. En éste caso, se presenta cuando los cables no tienen pantallas metálicas.

La impedancia de secuencia cero considerando retorno por tierra únicamente, está dada como.

$$Z_{00} = Z_{00C} \text{ } [\Omega/\text{MILLA}]$$

- 2 Que el regreso de la corriente de secuencia cero se haga por la pantalla metálica del o de los cables y por tierra, en paralelo.

La impedancia de secuencia cero considerando retorno por la pantalla metálica y tierra, está dada como:

$$Z_{00} = Z_{00C} - \frac{Z_{00M}^2}{Z_{00S}} [\Omega/\text{MILLA}]$$

- 3 Que el regreso de la corriente de secuencia cero se haga únicamente por la pantalla metálica del o de los cables.

En éste caso, puede presentarse cuando las pantallas metálicas están aisladas de tierra, además, las pantallas metálicas sirven de conductor de regreso a las corrientes de secuencia cero que circulan por los tres conductores

La impedancia de secuencia cero considerando retorno por la pantalla metálica del o de los cables únicamente, está dada como:

$$Z_{00} = Z_{00C} + Z_{00S} - 2Z_{00M} [\Omega/\text{MILLA}]$$

Donde.

Z_{00C} = Es la impedancia propia de secuencia cero del grupo de tres conductores, considerando retorno por tierra pero ignorando la presencia de la pantalla metálica.

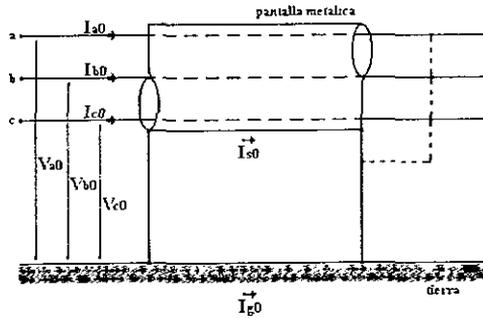
Z_{00S} = Es la impedancia propia de secuencia cero de la pantalla metálica (un cable trifásico) o del grupo de las tres pantallas metálicas (tres cables monofásicos), considerando el retorno por tierra pero ignorando la presencia del grupo de conductores.

Z_{00M} = Es la impedancia mutua de secuencia cero entre los tres conductores y la pantalla metálica, si se trata de un cable trifásico; o entre los tres conductores y las tres pantallas metálicas, si se trata de tres cables monofásicos.

Es por esto, que los valores de impedancia de secuencia cero (para los tres casos: retorno de corriente por tierra, por la pantalla metálica o por la combinación de éstas, es decir, por tierra y por la pantalla metálica) será diferente dependiendo la construcción del cable: trifásico o monofásico, así como, de la disposición de los conductores y de las características físicas del propio cable(s)

▮ Cables trifásicos.

Dado el siguiente circuito eléctrico trifásico donde se representa un cable trifásico con pantalla metálica, y considerando que la pantalla metálica está conectada sólidamente a tierra.



Donde:

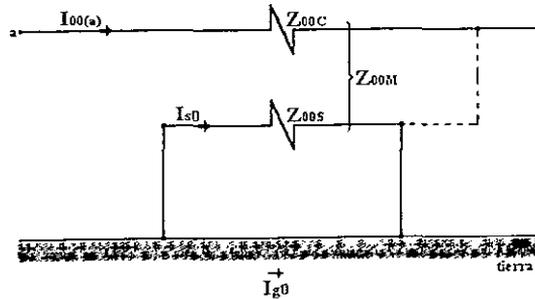
V_{a0}, V_{b0}, V_{c0} = Voltaje de secuencia cero de la fase (a, b, c) a tierra, respectivamente.

I_{a0}, I_{b0}, I_{c0} = Corriente de secuencia cero que circula por el conductor de la fase (a, b, c), respectivamente.

I_{s0} = Corriente de secuencia cero que circula por la pantalla metálica

I_{g0} = Corriente de secuencia cero que circula por tierra.

como se observa del circuito, $(I_{a0} + I_{b0} + I_{c0}) + (I_{s0} + I_{g0}) = 0$, por lo tanto, el circuito equivalente del cable trifásico, es



Donde

$$I_{r_{21}} = I_{a_0} + I_{b_0} + I_{c_0}, \text{ pero como } I_{a_0} = I_{b_0} = I_{c_0}$$

$$I_{r_{21}} = 3I_{a_0}$$

$Z_{1,1C}$ = Impedancia propia de secuencia cero de los tres conductores

$$Z_{1,1C} = (r_c + r_e) + j(x_a + x_c - 2x_d) [\Omega/\text{MILLA}]$$

$Z_{1,1S}$ = Impedancia propia de secuencia cero de la pantalla metálica

$$Z_{1,1S} = (3r_s + r_e) + j(3x_s + x_c) [\Omega/\text{MILLA}]$$

$Z_{1,1M}$ = Impedancia mutua de secuencia cero entre los tres conductores y la pantalla metálica

$$Z_{1,1M} = r_e + j(3x_s + x_c) [\Omega/\text{MILLA}]$$

Donde

r_c, r_s, x_a, x_d = Valores de resistencia e inductancia ya definidos, (se calculan de igual manera que para la secuencia positiva), en Ω/MILLA .

r_e = Resistencia de AC de regreso de tierra.

$$r_e = 0.00476 f [\Omega/\text{MILLA}]$$

x_e = Reactancia inductiva del retorno por tierra.

$$x_e = 3(0.2794) \frac{f}{60} \log_{12} \frac{De}{12} [\Omega/\text{MILLA}]$$

$$x_s = 3(0.2794) \frac{f}{60} \log_{12} \frac{De}{12} [\Omega/\text{MILLA}]$$

x_s = Reactancia inductiva propia de la pantalla metálica.

$$x_s = 0.2794 \frac{f}{60} \log_{r_o + r_i} \frac{24}{r_o + r_i} [\Omega/\text{MILLA}]$$

D_i = Profundidad equivalente de un conductor ficticio a través del cual se tendrá el retorno por tierra de la corriente de secuencia cero; es decir, es la distancia equivalente de las fases al conductor ficticio que sustituye a la tierra.

$$D_i = 25920 \frac{\rho}{f} \quad [\text{pulgadas}]$$

ρ = Resistividad del terreno, en $[\Omega \cdot \text{m}]$.

RMG_{1C} = Radio medio geométrico del conjunto de conductores.

$$= \sqrt[3]{\text{RMG}_{1C} (\text{DMG}_{1C})^2} \quad [\text{pulgadas}]$$

RMG_{1C} , DMG_{3C} = Valores de radio y distancia media geométrica ya definidos, (se calculan de igual manera que para la secuencia positiva), en pulgadas.

Por lo tanto, sustituyendo valores y en forma general:

Z_{1+2C} = Impedancia propia de secuencia cero de los tres conductores.

$$Z_{00C} = (r_c + r_e) + j(x_a + x_e - 2x_d) \text{ } [\Omega/\text{MILLA}]$$

$$Z_{1+2C} = (r_c + r_e) + j0.8382 \frac{f}{60} \log \frac{D_e}{RMG_{3C}} \text{ } [\Omega/\text{MILLA}]$$

Z_{1+2S} = Impedancia propia de secuencia cero de la pantalla metálica

$$Z_{1+2S} = (3r_s + r_e) + j(3x_s + x_e) \text{ } [\Omega/\text{MILLA}]$$

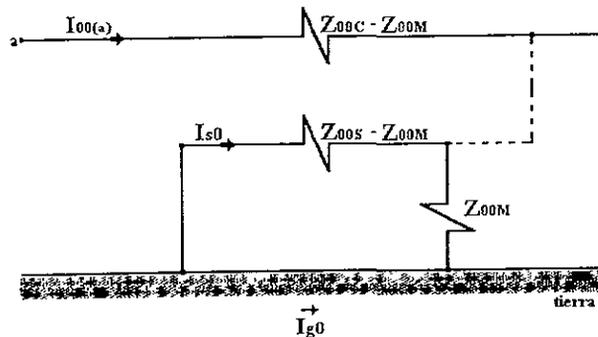
$$Z_{00S} = (3r_s + r_e) + j0.8382 \frac{f}{60} \log \frac{2D_e}{r_o + r_i} \text{ } [\Omega/\text{MILLA}]$$

Z_{1+2M} = Impedancia mutua secuencia cero entre los tres conductores y la pantalla metálica.

$$Z_{1+2M} = 1e + j(3x_s + x_e) \text{ } [\Omega/\text{MILLA}]$$

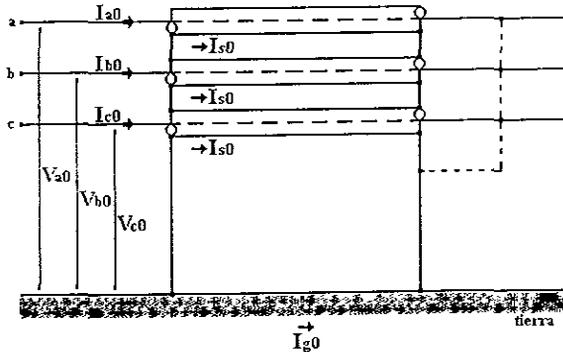
$$Z_{00M} = (3r_s + r_e) + j0.8382 \frac{f}{60} \log \frac{2D_e}{r_o + r_i} \text{ } [\Omega/\text{MILLA}]$$

por lo tanto, el circuito equivalente para un cable trifásico modificado, es:



3) Cables monofásicos.

Dado el siguiente circuito eléctrico trifásico donde se representan tres cables monofásicos, con pantalla metálica. y considerando que cada pantalla metálica está conectada sólidamente a tierra.



Donde:

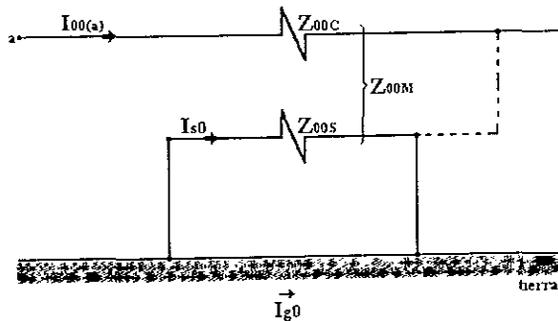
V_{a0}, V_{b0}, V_{c0} = Voltaje de secuencia cero de la fase (a, b, c) a tierra, respectivamente.

I_{a0}, I_{b0}, I_{c0} = Corriente de secuencia cero que circula por el conductor de la fase (a, b, c), respectivamente.

I_{s0} = Corriente de secuencia cero que circula por la pantalla metálica.

I_{g0} = Corriente de secuencia cero que circula por tierra

como se observa del circuito, $(I_{a0} + I_{b0} + I_{c0}) + (3I_{s0} + I_{g0}) = 0$, por lo tanto, el circuito equivalente para un cable monofásico, es:



de donde y en forma general.

$$I_{03\phi} = I_{a0} + I_{b0} + I_{c0}, \text{ pero como } I_{a0} = I_{b0} = I_{c0}$$

$$I_{03\phi} = 3I_{a0}$$

Z_{r0c} = Impedancia propia de secuencia cero de los tres conductores.

$$Z_{00c} = (r_c + r_e) + j(x_a + x_e - 2x_d) [\Omega/\text{MILLA}]$$

$$Z_{00c} = (r_c + r_e) + j0.8382 \int \log \frac{D_e}{RMG_{3c}} [\Omega/\text{MILLA}]$$

Z_{r0s} = Impedancia propia de secuencia cero de la pantalla metálica.

$$Z_{r0s} = (r_s + r_e) + j(x_s + x_e - 2x_d) [\Omega/\text{MILLA}]$$

$$Z_{r0s} = (r_s + r_e) + j0.8382 \int \log \frac{D_e}{RMG_{3s}} [\Omega/\text{MILLA}]$$

Z_{00M} = Impedancia mutua de secuencia cero entre los tres conductores y la pantalla metálica

$$Z_{00M} = r_e + j(x_s + x_e - 2x_d) [\Omega/\text{MILLA}]$$

$$Z_{00M} = r_e + j0.8382 \int \log \frac{D_e}{DMG_{3c-3s}} [\Omega/\text{MILLA}]$$

Donde:

$r_c, r_s, r_e, x_a, x_e, x_d$ = Valores de resistencia e inductancia ya definidos, (se calculan de igual manera que para la secuencia positiva), en Ω/MILLA .

RMG_{1c}, DMG_{3c} = Valores de radio y distancia media geométrica ya definidos, (se calculan de igual manera que para la secuencia positiva), en pulgadas.

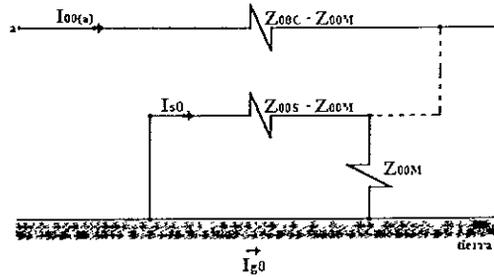
RMG_{3s} = Radio medio geométrico de las tres pantallas metálicas en paralelo.

$$= \sqrt[3]{\frac{r_0 + r_1}{2} (DMG_{3c})^2} \text{ [pulgadas]}$$

DMG_{3c-3s} = Distancia media geométrica de la separación entre los tres conductores y las tres pantallas metálicas.

$$= \sqrt[3]{\left[\frac{r_0 + r_1}{2}\right]^3 (DMG_{3c})^6} = \sqrt[3]{\frac{r_0 + r_1}{2} (DMG_{3c})^2} \text{ [pulgadas]}$$

por lo tanto, el circuito equivalente para un cable monofásico modificado, es:



En el apéndice A, de éste trabajo, se muestran valores de impedancia de secuencia cero de cables aislados de acuerdo a la trayectoria del regreso de la corriente de falla.

En conclusión, al tener ya los valores de impedancia (Z_{00C} , Z_{00S} y Z_{00M}) para cables aislados monofásicos y trifásicos, estamos en condiciones ya, de encontrar los valores de impedancia de secuencia cero dependiendo de la trayectoria de las corrientes de secuencia cero

1. Impedancia de secuencia cero considerando retorno por tierra únicamente:

$$Z_{00} = Z_{00C} \text{ } [\Omega/\text{MILLA}]$$

2. Impedancia de secuencia cero considerando retorno por tierra y la pantalla metálica:

$$Z_{00} = Z_{00C} - \frac{Z_{00M}^2}{Z_{00S}} \text{ } [\Omega/\text{MILLA}]$$

3. Impedancia de secuencia cero considerando retorno por la pantalla metálica únicamente.

$$Z_{00} = Z_{00C} + Z_{00S} - 2Z_{00M} \text{ } [\Omega/\text{MILLA}]$$

II.4. CABLES AISLADOS DE BAJA TENSION.

II.4.1. IMPEDANCIA DE SECUENCIA CERO.

Partiendo de la teoría que se ha dado en el cálculo de impedancia de secuencia cero para cables aislados de mediana y alta tensión, tenemos que $I_{a0} = I_{b0} = I_{c0}$ y que $I_{neutro} = I_{a0} + I_{b0} + I_{c0} = 3I_{a0}$; por lo tanto, cuando la corriente de secuencia cero fluye a través de los conductores de un circuito trifásico, se necesita:

1. Que el regreso de la corriente de secuencia cero se haga por el hilo de tierra y por tierra.

$$Z_{00} = Z_{00C} - \frac{Z_{00M}^2}{Z_{00S}} \text{ } [\Omega/\text{MILLA}]$$

Donde:

Z_{00} = Impedancia de secuencia cero de un circuito trifásico con hilo de tierra y considerando retorno por tierra

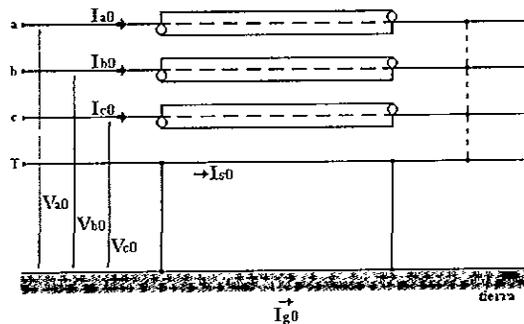
Z_{0XC} = Impedancia propia de secuencia cero del grupo de tres conductores, considerando retorno por tierra pero ignorando la presencia del hilo de tierra

Z_{0XS} = Impedancia propia de secuencia cero del hilo de tierra, considerando retorno por tierra pero ignorando la presencia del grupo de conductores.

Z_{0XM} = Impedancia mutua de secuencia cero entre los tres conductores del circuito trifásico y el hilo de tierra, considerando retorno por tierra

» Cables monofásicos.

Dado el siguiente circuito eléctrico trifásico (representado por tres cables monofásicos con aislamiento) y con hilo de tierra (representado por un cable monofásico sin aislamiento); y considerando que el hilo de tierra está conectado sólidamente a tierra



Donde.

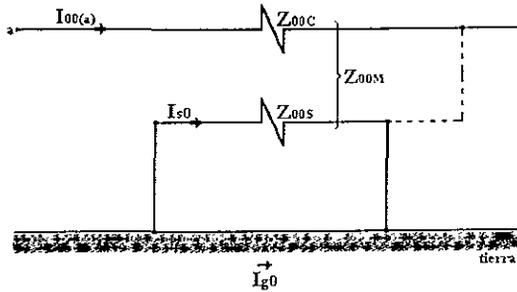
V_{a0}, V_{b0}, V_{c0} = Voltaje de secuencia cero de la fase (a, b, c) a tierra, respectivamente.

I_{a0}, I_{b0}, I_{c0} = Corriente de secuencia cero que circula por el conductor de la fase (a, b, c), respectivamente.

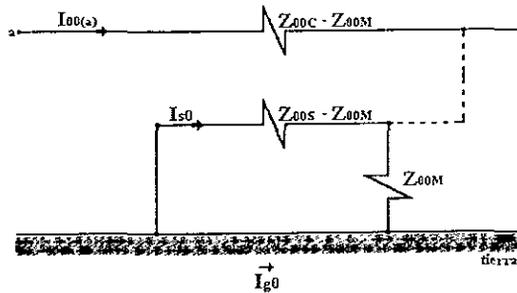
I_{s0} = Corriente de secuencia cero que circula por el hilo de tierra.

I_{g0} = Corriente de secuencia cero que circula por tierra.

como se observa del circuito, $(I_{a0} + I_{b0} + I_{c0}) + (I_{s0} + I_{g0}) = 0$, por lo tanto, el circuito equivalente para un cable monofásico, es:



es decir, el circuito equivalente modificado, es:



En forma general:

Z_{00C} = Impedancia propia de secuencia cero de un conductor.

$$Z_{00C} = (r_c + r_e) + j(x_a + x_c - 2x_d) \text{ } [\Omega/\text{MILLA}]$$

$$= r_c + 0.00477 f + j 0.01397 f \log \frac{D_e}{\sqrt[3]{\text{RMG}_{1C} (\text{DMG}_{2C})^2}} \text{ } [\Omega/\text{MILLA}]$$

Z_{00S} = Impedancia propia de secuencia cero del hilo de tierra.

$$Z_{00S} = (3r_s + r_e) + j(x_c + 3x_s) \text{ } [\Omega/\text{MILLA}]$$

$$Z_{00S} = 3r_s + 0.0047 f + j 0.01397 f \log \frac{D_e}{\text{RMG}_S} \text{ } [\Omega / \text{MILLA}]$$

Z_{00M} = Impedancia mutua de secuencia cero entre los tres conductores y el hilo de tierra

$$Z_{00M} = 0.00477 f + j 0.01397 f \log \frac{D_e}{\text{DMG}_{CS}} \text{ } [\Omega / \text{MILLA}]$$

$$Z_{00M} = r_e + j(x_c - 3x_d) \text{ } [\Omega/\text{MILLA}]$$

Donde

r_c, r_e, x_a, x_e, x_d = Valores de resistencia e inductancia ya definidos, (se calculan de igual manera que para los cables aislados de mediana y alta tensión), en Ω /MILLA.

r, x_c = Resistencia de AC y reactancia inductiva propia del hilo de tierra, en Ω /MILLA

RMG_s = Radio medio geométrico del hilo de tierra, en pulgadas.

RMG_{1C}, DMG_{3C} = Valores de radio y distancia media geométrica ya definidos, (se calculan de igual manera que para los cables aislados de mediana y alta tensión), en pulgadas.

RMG_s = Radio medio geométrico del hilo de tierra, en pulgadas.

DMG_{t_s} = Distancia media geométrica entre los centros de los conductores y el centro del hilo de tierra

$$DMG_{t_s} = \sqrt[3]{d_{as} \cdot d_{bs} \cdot d_{cs}} \quad [\text{pulgadas}]$$

d_{as} = Distancia entre centros de los conductores de la fase "a" y el hilo de tierra, en pulgadas

d_{bs} = Distancia entre centros de los conductores de la fase "b" y el hilo de tierra, en pulgadas.

d_{cs} = Distancia entre centros de los conductores de la fase "c" y el hilo de tierra, en pulgadas

En conclusión, al tener ya los valores de impedancia (Z_{00C}, Z_{00S} y Z_{00M}), estamos en condiciones ya, de encontrar el valor de impedancia de secuencia cero, considerando que el regreso de la corriente de secuencia cero se haga por el hilo de tierra y por tierra:

$$Z_{00} = Z_{00C} \cdot \frac{Z_{00M}^2}{Z_{00S}} \quad [\Omega/\text{MILLA}]$$

CAPITULO III

SISTEMAS DE TIERRA

III. SISTEMAS DE TIERRA

III.1. INTRODUCCION

Un sistema de tierras es el conjunto de elementos tales como la red o malla de conductores, electrodos o varillas de tierra, conectores y conductores de puesta a tierra de los diversos equipos, que interconectados en una forma adecuada en un determinado terreno nos permite obtener un circuito eléctrico de baja resistencia que sirve para poder conectar a tierra todos los elementos de la instalación que así lo requieran.

Un diseño de tierras seguro tiene dos objetivos principales:

- Proporcionar un medio para drenar las corrientes eléctricas hacia tierra bajo condiciones normales y de falla, sin exceder los límites de operación de los equipos.
- Asegurar que tanto una persona que se encuentre dentro del área del sistema de tierras como equipos conectados a tierra queden protegidos de los peligros de descargas eléctricas bajo condiciones críticas.

III.2. COMPONENTES PRINCIPALES DE UN SISTEMA DE TIERRAS

Un sistema de tierras se compone de los siguientes elementos:

a) Conductores

b) Varillas o electrodos de tierra

c) Conectores o juntas

a) **Conductores.**- Sirven para formar el sistema de tierra y para la conexión a tierra de los equipos. Los conductores empleados en los sistemas de tierra son generalmente cables concéntricos formados por varios hilos y los materiales empleados en su fabricación son el cobre, cobre estañado, copperweld (acero recubierto con cobre), acero, acero inoxidable, acero galvanizado o aluminio.

El factor principal en la selección del material es la característica de corrosión que presenta al estar enterrado. El cobre es el material más común para los conductores, ya que es económico y tiene buena conductividad además de ser resistente a la corrosión y a la fusión. El calibre de los conductores se determinará por requerimientos de conducción de corriente.

b) **Varillas o electrodos de tierra.**- Estos elementos se clavan en el terreno y sirven para encontrar zonas más húmedas y por lo tanto con menor resistividad eléctrica en el subsuelo. Los materiales empleados en la fabricación de varillas o electrodos de tierra son generalmente el acero, acero galvanizado, acero inoxidable y copperweld.

Como en los conductores la selección del material dependerá de las características de corrosión que presenten al estar enterrados. El copperweld es el material más empleado en las varillas de tierra ya que combina las ventajas del cobre con la alta resistencia mecánica del acero, tiene buena conductividad, resistencia a la corrosión y buena resistencia mecánica para ser clavada en el terreno. El diámetro y longitud de las varillas o electrodos se determinarán por resistencia mecánica y por las características de resistencia eléctrica que presenten al estar enterrados

c) **Conectores o Juntas.**- Son los elementos que nos sirven para unir los conductores del sistema de tierra, para conectar las varillas a los conductores y para la conexión de los equipos a través de conductores al sistema de tierra.

Los conectores utilizados en los sistemas de tierra son generalmente de dos tipos

c.1) Conectores a presión

c.2) Conectores soldables

c.1) **Los conectores a presión** son todos aquéllos que mediante presión mantienen en contacto a los conductores. En este tipo están comprendidos los conectores atornillados y los de compresión.

Los conectores atornillados son aquéllos que se fabrican formando dos piezas que se unen por medio de tornillos. El material del conector es de bronce con alto contenido de cobre y el de los tornillos es de bronce al silicio que les da alta resistencia mecánica y a la corrosión.

Los conectores de compresión se fabrican en una sola pieza y mediante herramientas especiales se colocan para la unión de conductores. Los conectores a presión deberán diseñarse para una temperatura máxima de 250 a 350 °C.

c.2) **Los conectores soldables** son aquéllos que mediante una reacción química exotérmica los conductores y el conector se sueldan en una conexión molecular. Este tipo de conector por su naturaleza soporta como mínimo la misma temperatura de fusión del conductor

Los conectores deberán seleccionarse con el mismo criterio con que se seleccionan los conductores además deberán de tener las siguientes propiedades:

- Tener dimensiones adecuadas para absorber el calentamiento que se produce al circular por él corrientes elevadas (Resistente a la fusión).
- Tener suficientemente asegurados a los conductores para soportar los esfuerzos electrodinámicos originados por las fallas; además de no permitir que el conductor se mueva dentro de él.

III.3. DISPOSICIONES BASICAS DE LAS REDES DE TIERRA

- a) **Sistema Radial.**- Este sistema consiste en uno o varios electrodos de tierra a los cuales se conecta la derivación de cada uno de los equipos. Este sistema es el menos seguro, ya que al producirse una falla en el equipo, se producen elevados gradientes de potencial.
- b) **Sistema de Anillo.**- Este sistema se obtiene colocando en forma de anillo un conductor de suficiente calibre alrededor de la superficie ocupada por los equipos a proteger. Al anillo se conectan las derivaciones de cada uno de los equipos usando un conductor de calibre más delgado. En los vértices del anillo se instalan varillas o electrodos de tierra. Este sistema es más eficiente que el sistema radial, ya que los potenciales disminuyen al disiparse la corriente de falla por varias trayectorias en paralelo.
- c) **Sistema de Malla.**- Este sistema consiste en un arreglo de conductores perpendiculares formando una malla, a la cual se conectan las derivaciones de cada uno de los equipos. En el perímetro de la malla generalmente se colocan varillas o electrodos de tierra. Este sistema es el más eficiente, ya que se limitan los potenciales originados por la circulación de la corriente de falla.

III.4. CARACTERISTICAS DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE TIERRA

Cada elemento de un sistema de tierras, incluyendo los conductores de la malla, empalmes, conectores de los conductores y todos los electrodos de tierra principales deberán tener las siguientes características.

1. Tengan suficiente conductividad eléctrica, esto es que no contribuyan substancialmente a diferencias de potencial en el sistema de tierra
2. Resistan a la fusión y al deterioro mecánico bajo las combinaciones más adversas de magnitud y duración de la corriente de falla.
3. Sean mecánicamente confiables y resistentes a una degradación especialmente en partes expuestas a la corrosión o maltrato físico.

III.5. ANALISIS DE RESISTIVIDAD DEL SUELO, MEDICIONES DE CAMPO Y SELECCIÓN DEL MODELO DEL SUELO

En los sistemas con neutro a tierra el suelo se comporta como un conductor. Las características del suelo son tan diferentes en este aspecto, que hay suelos que no conducen la electricidad, es decir, son aislantes. por otro lado hay suelos que son buenos conductores de la electricidad como los suelos húmedos

Para conocer que tan buen conductor de la electricidad es el suelo, es necesario conocer su resistividad o resistencia específica, las rocas, la arena y los suelos secos tienen alta resistividad, es decir, no conducen la electricidad, los suelos con alto contenido de humedad tienen baja resistividad. Por lo tanto, es necesario conocer la resistividad del terreno para poder efectuar un diseño adecuado del sistema de tierras

III.5.1. RESISTIVIDAD DEL SUELO

La resistividad también conocida como resistencia específica, es la propiedad que tiene el suelo para conducir electricidad. La resistividad del terreno es un factor importante en la elaboración de un sistema de tierras, ya que el diseño de éste dependerá en gran medida del tipo de suelo en donde va a ser instalado. La investigación del lugar donde va a instalarse un sistema de tierras es esencial para determinar la composición del suelo y obtener algunas ideas básicas sobre su homogeneidad. Las pruebas simples recientes y algunas otras investigaciones geológicas proporcionan información sobre la presencia de varias capas y la naturaleza del material del suelo, principalmente para tener una idea sobre su resistividad y el rango de valores en el lugar.

La resistividad del terreno para el diseño de una red de tierras, generalmente se determina por una interpretación apropiada de los datos de campo. Debido a que la resistividad del terreno varía tanto horizontal como verticalmente, los datos se conocen como "perfil de resistividad aparente del suelo", los cuales se obtienen por pruebas en varios lugares del terreno y hasta en una cierta profundidad del mismo.

III.5.2. EFECTO DE LA HUMEDAD, TEMPERATURA Y CONTENIDO QUIMICO SOBRE LA RESISTIVIDAD

La conducción eléctrica en los suelos, es esencialmente electrolítica, por esta razón la resistividad de la mayoría de los suelos se eleva considerablemente cada vez que el contenido de humedad se reduce a menos del 15% del peso de éste. La cantidad de agua en el suelo depende del tamaño de las partículas y de su compactación. Sin embargo como se muestra en la curva No. 2 de la figura No. 3, la resistividad se afecta muy poco una vez que el contenido de humedad excede el 22%. El efecto de la temperatura sobre la resistividad del suelo puede considerarse despreciable para temperaturas arriba del punto de congelación. A 0°C el agua en el suelo se empieza a congelar y la resistividad se incrementa rápidamente. La curva No. 3, muestra la variación típica de la resistividad del suelo con respecto a la temperatura para un terreno arcilloso que contenga 15.2% de humedad por peso. La composición y la cantidad de sales solubles, ácidos o alkalis presentes en el suelo, pueden afectar considerablemente su resistividad. La curva No.1, ilustra el efecto típico de la sal común (cloruro de sodio) sobre la resistividad del suelo al contener 30% de humedad por peso.

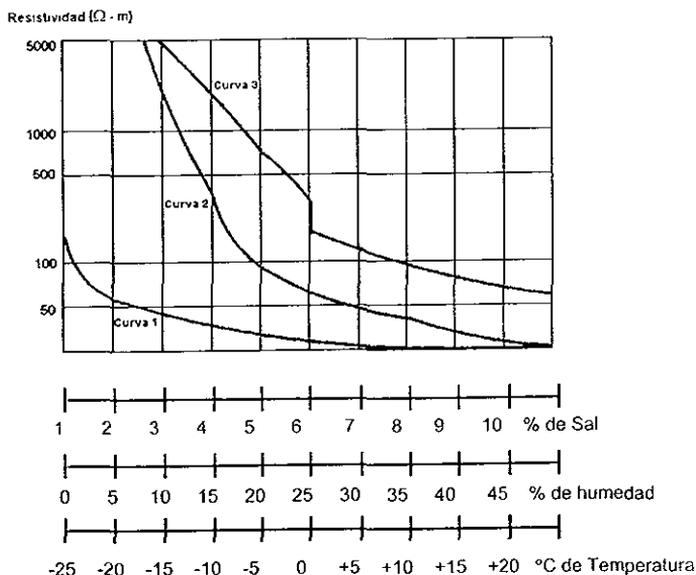


Figura No 3 Efecto de la humedad, temperatura y contenido químico sobre la resistividad del suelo

III.5.3. CLASIFICACION DE LOS SUELOS Y SUS RANGOS DE RESISTIVIDAD

Existe gran número de tablas que muestran los rangos de resistividad de varios tipos de suelo. La resistividad se mide en *ohms-metro*, *ohms-centimetro*, etc. Existen dos formas para determinar la resistividad de un terreno, una es empírica mediante tablas y conocimiento del terreno, y la otra es efectuando mediciones directamente en el terreno. Una clasificación general es la siguiente:

TABLA No. 1. Resistividad de los suelos

CLASE DE TERRENO	RESISTENCIA (Ohm - metro)
Terreno húmedo (suelo orgánico)	10 - 50
Terreno de cultivo arcilloso	100
Tierra arenosa húmeda	200
Tierra arenosa seca (suelo seco)	1000
Tierra con gujarros o cemento	1000
Suelo rocoso húmedo (piedra molida húmeda)	3000
Roca compacta	10000

III.5.4. METODOS DE MEDICION DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

La resistividad del terreno es de gran importancia para el diseño de un sistema de conexión a tierra. Para poder medir la resistividad del terreno, es necesario hacer circular una corriente a través de él, lo cual sólo se logra mediante la inserción de electrodos en la tierra de manera que es posible inyectar y sacar la corriente. Existen dos métodos para la medición de la resistividad en el terreno

a) Método de los cuatro puntos o método de Wenner

Para efectuar la medición de resistividad del suelo es necesario hacer circular una corriente por el mismo, el método más usual es el de Frank-Wenner denominado también método de los 4 electrodos, el equipo de medición utilizado es el megger de tierra. Este método es el más empleado para obtener la medición de la resistividad promedio del terreno. Consiste en cuatro puntas enterradas a una profundidad "B" y espaciados sobre una línea recta a una distancia "A".

Este método consiste en medir el voltaje entre los dos electrodos internos de potencial y dividido entre la corriente que fluye a través de los dos electrodos externos para dar un valor de resistencia R en ohms. Existen dos variaciones de este método:

a.1) Electrodos igualmente espaciados o arreglo de Wenner:

Con este arreglo los electrodos están igualmente espaciados como se muestra en la figura No. 4.

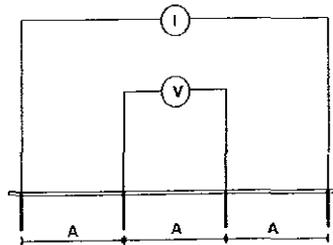


Figura No 4 Arreglo de Wenner o electrodos igualmente espaciados

Si la relación A/B es menor a 20 entonces se utilizará la ecuación 3 para calcular la resistividad del terreno:

$$\rho = \frac{4\pi A R}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}} \quad (3)$$

Donde:

ρ = Resistividad en Ohms - Metro

A = Separación entre electrodos adyacentes en metros.

B = Profundidad de los electrodos en metros.

R = Lectura del megger en ohms.

Si la longitud "B" es mucho menor comparada con la longitud "A", puede suponerse $B = 0$ entonces la ecuación se reduce a:

$$\rho = 2\pi A R \quad (4)$$

Con las fórmulas (3) y (4) descritas anteriormente se obtiene la resistividad promedio del terreno, también conocida como resistividad aparente.

a.2) Electrodos no igualmente espaciados o arreglo de Schlumberger Palmer:

Una desventaja del método de Wenner es el decremento rápido en la magnitud de la tensión entre los dos electrodos interiores cuando su espaciamiento se incrementa a valores muy grandes. Para medir la resistividad con espaciamientos muy grandes entre los electrodos de corriente puede usarse el arreglo mostrado en la figura No. 5.

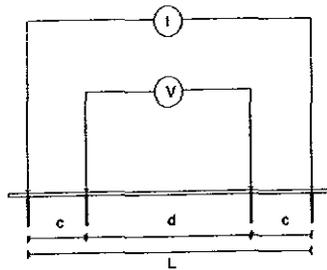


Figura No 5 Arreglo de Schlumberger Palmer o de los cuatro electrodos no igualmente espaciados

Los electrodos de potencial se localizan lo más cerca de los correspondientes electrodos de corriente, esto incrementa el potencial medido.

La ecuación empleada para este caso se puede determinar fácilmente. Si la profundidad de los electrodos es pequeña comparada con la separación "d" y "c", entonces la resistividad aparente se calculará de la siguiente forma:

$$\rho = \frac{\pi c(c+d)R}{d} \quad (5)$$

Además, con valores grandes de d/L , las variaciones de los valores medidos debidas a irregularidades en la superficie, se reducen dando mediciones más precisas.

III.5.5. MODELO DEL SUELO DE DOS CAPAS

Un sistema de tierras dentro de un suelo de dos capas se comporta de manera diferente en comparación con el mismo sistema dentro de un suelo uniforme. Generalmente para un sistema de tierras en un suelo uniforme o en un suelo de dos capas con ρ_1 menor que ρ_2 (la resistividad de la capa superior del suelo es menor que la resistividad de la capa inferior), la densidad de corriente es más alta en los conductores que en los bordes exteriores de la malla de tierras. En un suelo de dos capas con ρ_1 mayor que ρ_2 (la resistividad de la capa superior del suelo es mayor que la resistividad de la capa inferior), la densidad de corriente es más uniforme sobre todo en los conductores del sistema de tierras. Esto es causado por la tendencia de la corriente a fugarse hacia la capa de menor resistividad

El cambio abrupto de la resistividad en los límites de cada capa de suelo puede ser descrita por medio del factor de reflexión, el cual se define como:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (6)$$

Donde ρ_2 y ρ_1 son los valores de resistividad de las capas superior e inferior del suelo respectivamente.

III.6. RESISTENCIA A TIERRA

El suelo es un conductor eléctrico y su conductividad es baja comparada con los metales que son buenos conductores. La resistencia a tierra está dada por la suma de varias resistencias; la de contacto en las conexiones, las propias del electrodo, la del electrodo y el medio que lo rodea y por último la que presenta el terreno, entre todas éstas resistencias sólo se tomará en cuenta la que presenta el terreno debido a que las demás son muy bajas en comparación con la de éste.

III.6.1. MEDICION DE RESISTENCIA A TIERRA

El método aquí descrito es el de "la caída de tensión". Consiste en circular una corriente entre dos electrodos fijos, uno auxiliar (C_2) y el otro de prueba (C_1, P_1), midiendo la caída de tensión entre otro electrodo auxiliar (P_2) y el electrodo bajo prueba (C_1, P_1), el electrodo auxiliar (P_2) se va desplazando y conforme se mueve se van tomando lecturas y graficando hasta obtener una figura como la que se muestra en la figura No. 6.

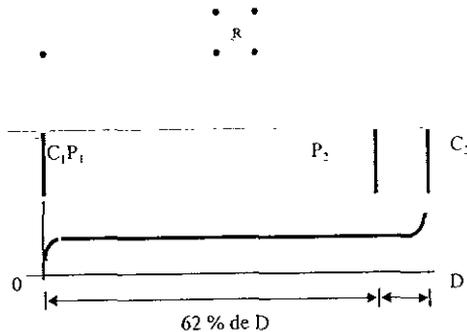


Figura No. 6. Método de la Caída de Tensión (62%)

El valor de la resistencia a tierra de la red es el que se obtiene en la intersección del eje de resistencia (R) con la parte paralela de la gráfica al eje de las distancias (D). Si la curva no presenta un tramo paralelo, quiere decir que la distancia escogida no es suficiente

III.6.2. RESISTENCIA A TIERRA DE UNA VARILLA.

En un suelo uniforme de resistividad ρ la resistencia a tierra de una varilla de diámetro d y enterrada a una longitud L , está dada por la fórmula:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2.943L}{d} \quad (7)$$

Para cada longitud L de la varilla, la resistencia R medida determina el valor de resistividad aparente. Cuando este valor se gráfica contra L se observan las variaciones de la resistividad del terreno con la profundidad.

III.6.3. TRATAMIENTO QUIMICO DE SUELOS Y USO DE LA BENTONITA

A menudo es imposible alcanzar la reducción deseada en el valor de la resistencia a tierra, por medio del incremento de más conductores a la malla de tierras o mayor cantidad de varillas de tierra. Una solución alterna es el uso de la bentonita que es una arcilla que tiene la capacidad de absorber y retener agua.

La función de la bentonita consiste en cubrir las grietas, aberturas y huecos que existen en el terreno a través de una masa que envuelve las partículas del mismo y los une eléctricamente, formando una gran superficie de contacto, realizando un buen camino para drenar las corrientes eléctricas a tierra

CAPITULO IV

DISEÑO DE SISTEMAS DE TIERRAS PARA SUBESTACIONES

IV. DISEÑO DE SISTEMAS DE TIERRA PARA SUBESTACIONES

IV.1. INTRODUCCION

En el diseño y proyecto de las instalaciones destinadas al suministro o a la utilización de la energía eléctrica, una de las mayores preocupaciones de los ingenieros de diseño ha sido como conectar a tierra los equipos eléctricos de una manera segura y apropiada.

Para que un sistema de tierras funcione en forma satisfactoria debe cumplir con ciertos requisitos, el diseño puede ser simple, desde una varilla de tierra hasta algo muy complicado, como una malla de tierras.

En los inicios del uso de la electricidad la tierra eléctrica solo se usaba como una referencia de potencial, sin embargo, con el transcurso del tiempo se le fue asignando otras funciones, entre otras, limitar las sobretensiones debidas a descargas atmosféricas, a fenómenos transitorios en el propio circuito o a contactos incidentales con líneas de mayor tensión, así como, estabilizar la tensión a tierra del circuito durante su operación normal.

Incluso se tenían recomendaciones como la siguiente: "En una instalación nueva no es conveniente poner a tierra los equipos ya que una falla en el aislamiento de cualquier motor, detiene la producción, recomendando la puesta a tierra de las instalaciones a los cinco años de servicio, está filosofía de operación ponía la producción por encima de la seguridad. En la actualidad los reglamentos vigentes exigen la conexión a tierra de todas las partes metálicas que pueden energizarse en un momento dado por una falla a tierra.

En las subestaciones eléctricas, uno de los aspectos principales para la protección contra las sobretensiones, ya sean de origen interno o externo, es el de disponer de un adecuado sistema de tierras al cual se conectan los neutros de los equipos eléctricos y todas aquellas partes metálicas que deben estar a potencial de tierra.

IV.2. CRITERIO DE DISEÑO

El procedimiento de diseño descrito aquí esta basado en la seguridad de los potenciales peligrosos de paso y de contacto, dentro e inmediatamente fuera de la subestación, puesto que el potencial de malla es posiblemente el peor potencial de contacto dentro de la subestación, el potencial de malla será usado como la base de éste procedimiento de diseño

Los potenciales de paso son menos peligrosos que los potenciales de malla. La seguridad dentro del área de la subestación se alcanza con la presencia de una capa superficial de alta resistividad, la cual sólo se extiende en el área de la subestación, por lo cual los potenciales de paso fuera de ésta pueden ser peligrosos

Para distancias iguales en la malla de tierra, el potencial de malla se incrementará a lo largo de la misma desde el centro hacia las esquinas, la relación de este incremento dependerá de las dimensiones de la malla, número y localización de las varillas de tierra, espaciamento de los conductores paralelos, diámetro y profundidad de los conductores y el perfil de resistividad del suelo.

Los siguientes parámetros que dependen del lugar tienen un gran impacto en el diseño de la malla

- Máxima corriente de malla (I_C)
- Duración de la falla (t_f)
- Resistividad del suelo (ρ)
- Resistividad del material superficial (ρ_s)
- Geometría de la malla

La selección del tiempo de falla deberá reflejar la rapidez de libramiento para las subestaciones de transmisión y un libramiento lento para subestaciones industriales y de distribución. La selección de t_f deberá de resultar de la combinación más pesimista del factor de decremento de la corriente de falla y de la corriente permisible en el cuerpo. La resistencia de la malla y los gradientes de potencial dentro de la subestación son directamente dependientes de la resistividad del suelo.

IV.3. CALCULO DE POTENCIALES TOLERABLES POR EL CUERPO HUMANO

Los efectos que produce una corriente eléctrica al circular a través de las partes vitales del cuerpo humano dependen de la duración, magnitud y frecuencia de la misma. La consecuencia más peligrosa por estar expuesto al paso de la corriente eléctrica es una condición del corazón conocida como fibrilación ventricular, que ocasiona un paro inmediato de la circulación de la sangre

IV.3.1. EFECTO DE LA FRECUENCIA

El cuerpo humano es muy vulnerable a los efectos de la corriente eléctrica a 50 o 60 Hz, en éstas frecuencias una corriente con una magnitud de 0.1 [A] puede resultar letal. De estudios realizados, se ha observado que el cuerpo humano puede tolerar mayores corrientes a frecuencias de 25 Hz o a la corriente directa o a las frecuencias en el rango de 3000-10000 Hz

IV.3.2. EFECTOS DE LA MAGNITUD Y LA DURACION

Los efectos fisiológicos más comunes que se presentan al ir incrementando la corriente eléctrica que circula por el cuerpo son: Percepción, Contracción muscular, Pérdida del conocimiento, Fibrilación ventricular, Paro respiratorio, Quemaduras.

La corriente de 1mA es conocida generalmente como el umbral de la percepción es decir la magnitud de corriente a la cual una persona es capaz de detectar una ligera sensación de picazón en las manos o en la punta de los dedos causada por el paso de la corriente.

La corriente de 1 a 6 mA aunque es desagradable de soportar generalmente no daña la habilidad de la persona que está en contacto con el objeto energizado para controlar sus músculos y soltarse. En el rango de 9 a 25 mA las corrientes pueden ser dolorosas y pueden hacer difícil o imposible soltar el objeto energizado que está siendo tocado. No es sino hasta que la magnitud de la corriente alcanza el rango de 60 a 100 mA, cuando puede ocurrir la fibrilación ventricular, paro cardíaco y causar la muerte

La corriente de magnitud I_B y rango de duración de 0.03 a 3 segundos que no produce fibrilación, está relacionada con la energía absorbida por el cuerpo y se describe en la siguiente ecuación:

$$(I_B)^2 t_s = S_B \tag{8}$$

Donde:

I_B = Magnitud rms de la corriente que fluye por el cuerpo

t_s = Duración del flujo de corriente en segundos

S_B = Constante empírica relacionada con la energía tolerada por un cierto porcentaje de una población dada

IV.3.3. LIMITE DE LA CORRIENTE PERMISIBLE POR EL CUERPO HUMANO

La magnitud y duración de la corriente que circula por el cuerpo humano a 50 o 60 Hz deberá ser menor que aquella que cause fibrilación ventricular. La duración para la cual una corriente de 50 o 60 Hz puede ser tolerada por la mayoría de las personas está relacionada con su magnitud. La corriente permisible se puede calcular con las siguientes fórmulas:

$$I_s = \frac{0.116}{t_s} \quad \text{Para 50 kg --- (9)} \qquad I_B = \frac{0.157}{t_s} \quad \text{Para 70 kg --- (10)}$$

IV.3.4. RESISTENCIA DEL CUERPO HUMANO

Tanto para la corriente directa como para la corriente alterna a frecuencia nominal, el cuerpo humano puede representarse como una resistencia, la cual está medida entre extremidades, esto es, entre una mano y ambos pies ó entre un pie y el otro.

En cualquiera de los casos el valor de ésta resistencia es difícil de establecer. Un valor de resistencia para el cuerpo humano es aproximadamente de 300 Ω , aunque se ha determinado por

estudios un rango entre 300 y 500 Ω . Para altos voltajes y corrientes (arriba de 1kV y 5A), la resistencia disminuye por daño y perforación de la piel en el punto de contacto

Para fines de cálculo se han hecho las siguientes consideraciones:

- a) La resistencia de contacto para las manos y los zapatos es igual a cero.
- b) Se ha seleccionado un valor de $R_B = 1000 \Omega$ para representar el valor de resistencia del cuerpo humano, de una mano a ambos pies, entre mano y mano ó entre un pie y el otro.

IV.3.5. CIRCUITOS ACCIDENTALES EQUIVALENTES

Utilizando el valor de la corriente tolerable por el cuerpo que se estableció en las ecuaciones (9) y (10) y las constantes apropiadas del circuito, es posible determinar el potencial tolerable entre dos puntos críticos de contacto.

Para el análisis del circuito equivalente accidental se aplicará la siguiente notación:

I_A = Corriente a través del circuito accidental

R_A = Resistencia efectiva total del circuito accidental.

I_B = Corriente permisible por el cuerpo humano, definida por las ecuaciones (9) y (10).

Ovviamente por condiciones de seguridad se requiere que: $I_A < I_B$

Asumiendo que la resistencia del cuerpo es constante ($R_B = 1000 \Omega$), se requiere que I_A sea menor que I_B , para prevenir la fibrilación.

La resistencia R_A del circuito accidental es función de la resistencia del cuerpo R_B y de la resistencia de los pies R_F (resistencia de la tierra debajo de cada pie). La resistencia R_i puede afectar apreciablemente el valor de R_A .

Para propósitos del análisis del circuito, el pie humano es usualmente representado como un disco metálico conductor, despreciando la resistencia de contacto de los zapatos y calcetines. La resistencia propia y mutua para dos discos de radio b , separados una distancia d_f sobre la superficie de un terreno homogéneo de resistividad ρ , son:

$$R_{foot} = \rho / (4b) \quad (10-a)$$

$$R_{Mfoot} = \rho / (2\pi d_{foot}) \quad (10-b)$$

donde

R_{foot} = Resistencia propia de cada pie a tierra en ohms.

R_{Mfoot} = Resistencia mutua entre los pies en ohms

b = Radio equivalente de un pie en m.

$d_{1,2}$ = Separación entre los pies en m.

Las resistencias de la tierra bajo los dos pies en serie y paralelo son:

$$R_{2Fs} = 2(R_{foot} - R_{Mfoot}) \tag{11}$$

$$R_{2Fp} = \frac{1}{2} ((R_{foot} + R_{Mfoot})) \tag{12}$$

R_{2Fs} = Resistencia de los dos pies en serie.

R_{2Fp} = Resistencia de los dos pies en paralelo

En la figura No. 7 se muestra el circuito equivalente de contacto de un pie al otro. Aquí el potencial U aplicado al cuerpo, es la diferencia de potencial máxima entre dos puntos accesibles sobre la superficie del terreno separados por la distancia de un paso.

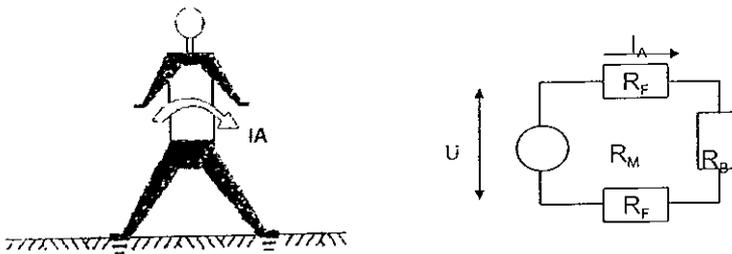


Figura No. 7 Circuito equivalente para el potencial de paso

$$d_{1,2} = 1 \text{ m}$$

$$I_A = U / R_A$$

$$R_A = R_B + 2R_F - 2R_{MF}$$

$$R_B = 1000 \Omega$$

La resistencia del circuito equivalente para el circuito del potencial de paso es:

$$R_A = R_B + 2(R_{foot} - R_{Mfoot}) \tag{13}$$

El circuito equivalente para el contacto entre una mano y los dos pies se muestra en la figura 8.

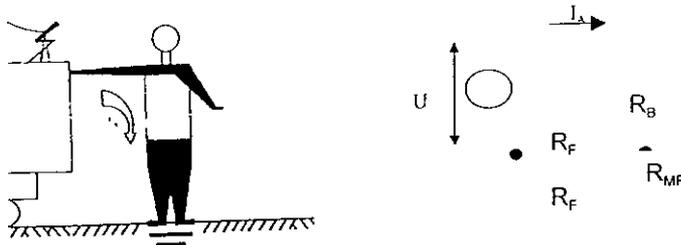


Figura No 8 Circuito equivalente para el voltaje de contacto

La resistencia del circuito equivalente para el potencial de contacto es

$$R_{\lambda} = R_B + \frac{1}{2} (R_{\text{foot}} + R_{\lambda\text{foot}}) \quad (14)$$

Seleccionando para los cálculos un radio de 0.08 m para el disco que representaría un pie, despreciando el término correspondiente a la resistencia mutua. Con ésta pequeña aproximación las ecuaciones para las resistencias en serie y paralelo de los dos pies pueden ser obtenidas en forma numérica y expresadas en términos de ρ como sigue:

$$R_{2Fs} = 6(\rho) \quad (15)$$

$$R_{2Fp} = 1.5(\rho) \quad (16)$$

La ecuación 15 es usada cuando el cálculo de la corriente del cuerpo resulta de un potencial de paso y la ecuación 16 se aplica cuando el cálculo de la corriente del cuerpo se produce por un potencial de contacto (malla) con ambos pies a cero profundidad de la superficie del suelo.

IV.3.6. EFECTO DE LA CAPA DE GRAVA EN LA SUPERFICIE DEL TERRENO

Las ecuaciones (10-a) y (10-b) se determinaron basándose en la suposición de un terreno con resistividad uniforme. Sin embargo, cuando se tiene una capa de grava en la superficie de la subestación (8 a 15 cm), se incrementa la resistencia de contacto entre el suelo y los pies del personal de la subestación.

Si el terreno tiene una resistividad menor que la de la grava solamente una parte de la corriente de la malla irá hacia la capa superior de la grava y el voltaje superficial será muy próximo al mismo que se originaría si no existiera dicha capa. La corriente a través del cuerpo será considerablemente más baja con la adición de la capa de grava en la superficie, por la gran resistencia de contacto entre el terreno y los pies. Para simplificar el procedimiento anterior, el término de resistencia mutua puede despreciarse y b suponerse siempre igual a 0.08. Con ésta base, las ecuaciones para las resistencias en serie y paralelo de los dos pies pueden expresarse alternativamente en forma análoga a las ecuaciones (15) y (16) usadas para un suelo uniforme.

$$R_{2Fs} = 6.0 C_s (h_s, K) \rho_s \quad (17)$$

$$R_{2Fp} = 1.5 C_s (h_s, K) \rho_s \quad (18)$$

Donde:

C_s = Factor de reducción para corregir el valor nominal de la resistividad de la capa superficial determinada como sigue:

$C_s = 1$, para cuando la resistividad superficial es igual a la resistividad del terreno

En cualquier otro caso:

$$C_s = \frac{1}{0.96} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{n^2 \sqrt{1 + (2nhs/0.08)^2}} \right] \quad (19)$$

Para el caso en que $C_s < 1$, donde C_s es una función de (h_s, k) y en el cual se distinguen las ecuaciones 17 y 18 de las ecuaciones 15 y 16, los valores de C_s se grafican en la figura No. 9.

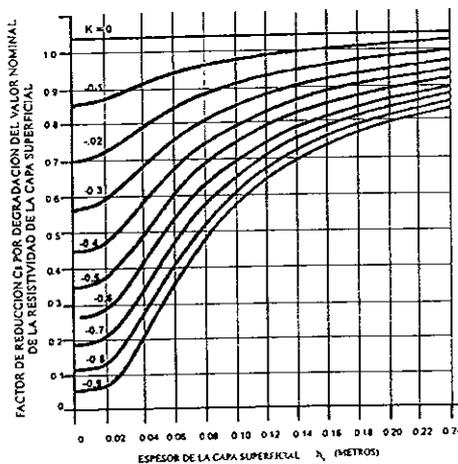


Figura No. 9. Factor de reducción C_s como una función del factor de reflexión K y el espesor de grava h_s .

IV.3.7. CRITERIOS DE DIFERENCIA DE POTENCIAL PERMISIBLE

La figura No. 10 muestra cuatro situaciones básicas que involucran a una persona y a la tierra durante una falla. Para un contacto de pie a pie el circuito equivalente es el de la figura No. 7 y su potencial aplicado U es igual a E_p (potencial de paso). Para los tres casos restantes de contacto de una mano a ambos pies, el circuito equivalente es el de la figura No. 8 y el potencial aplicado U es igual a E_t (potencial de contacto o de toque), E_m (potencial de malla) o E_{trrd} (potencial transferido) respectivamente

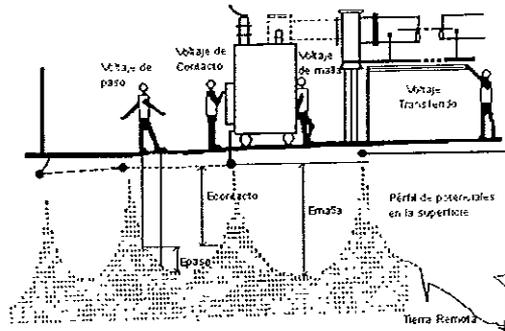


Figura No 10. Situaciones típicas de Choques Eléctricos (Potenciales)

1. **Elevación de potencial de tierra.**- Es el máximo voltaje que una malla de tierras puede alcanzar respecto a un punto de tierra distante asumiendo que está al potencial de la tierra remota.

NOTA: Bajo condiciones normales, la tierra del equipo eléctrico opera a potenciales de tierra cercanos a cero, esto es el potencial de un conductor neutro aterrizado es próximo o idéntico al potencial de la tierra remota. Durante una falla a tierra, la parte de corriente de falla que es conducida por la malla de tierras de la subestación hacia la tierra causa una elevación de potencial con respecto a la tierra remota. La elevación de potencial de tierra es proporcional a la magnitud de la corriente de malla y la resistencia de la malla.

2. **Potencial de paso.**- Es el potencial máximo que se aplicará a una persona entre sus pies, cuando en el instante de una falla se encuentre caminando en el área o inmediatamente fuera de la red. Prácticamente, el potencial de paso es quel que existe entre dos puntos separados un metro sobre la superficie del suelo.

El potencial de paso se puede calcular con las siguientes expresiones:

$$E_{\rho_{\text{paso}} > 0 \text{kg}} = \frac{(1000 + 6Cs(h_s, K)\rho_s)0.116}{t_s} \quad (20)$$

$$E_{\rho_{\text{paso}} < 70 \text{kg}} = \frac{(1000 + 6Cs(h_s, K)\rho_s)0.157}{t_s} \quad (20-a)$$

- 3 **Potencial de contacto.**- Este potencial máximo que experimentará una persona que se encuentre de pie dentro del área de la subestación y que durante la ocurrencia de una falla esté tocando con una o ambas manos una estructura o cualquier elemento conductor directamente unido a la red de tierras. Desde el punto de vista práctico, el potencial de toque queda establecido por la diferencia máxima de potencial que existe en condiciones de falla entre la red de tierras y un punto cualquiera sobre la superficie del suelo.

El potencial de contacto se puede calcular con las siguientes expresiones:

$$E_{\text{contacto}} = \frac{(1000 + 1.5C_s(h_s, K)\rho_s)0.116}{t_s} \quad (21)$$

$$E_{\text{contacto}} = \frac{(1000 + 1.5C_s(h_s, K)\rho_s)0.157}{t_s} \quad (21-a)$$

Donde

ρ_s = Resistividad de material de la capa superficial, en Ω - m.

t_s = Duración de la corriente de falla en segundos.

C_s = Factor de reducción por degradación del valor nominal de la resistividad de la capa superficial

K = es el factor de reflexión y se calcula con ayuda de la ecuación (6), descrita anteriormente

4. **Voltaje de malla.**- Es aquél que existirá sobre la superficie del suelo en el centro de una de las mallas de la red
5. **Voltaje transferido.**- Este potencial se produce cuando existen elementos metálicos salientes en el punto de falla, como son; rieles, hilos de guarda, tuberías, etc. Bajo condiciones normales el equipo eléctrico que está conectado a tierra opera al nivel de voltaje cero o cercano a cero y este potencial es idéntico al de una red remota. Durante una condición de falla se eleva el potencial con respecto a la red remota, existiendo una diferencia de potencial, que es proporcional a la magnitud de la corriente en la malla de tierras y a su resistencia.

IV.4. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

La secuencia de pasos a seguir para el diseño de un sistema de tierras para una subestación es la siguiente:

Paso 1.- DATOS DE CAMPO

Area ocupada por la malla de tierras y resistividad del terreno. El área que ocupará la malla podrá determinarse a partir del plano general de arreglo de equipos de la subestación. En este plano estarán indicados los límites y la ubicación de los equipos.

La resistividad del terreno podrá determinarse con alguno de los métodos estudiados anteriormente o de datos promedio proporcionado por tablas.

Paso 2.- DIMENSIONAMIENTO DEL CONDUCTOR

Cálculo de la corriente de falla, tiempo de duración de la falla y diámetro del conductor de la malla. Los conductores empleados en el sistema de tierra serán capaces de soportar la máxima corriente de falla durante un tiempo determinado sin llegar a la fusión.

La siguiente ecuación evalúa la capacidad de conducción para algunos conductores de los cuales las constantes del material son conocidas o bien pueden ser determinadas por medio de cálculos.

$$I = A \sqrt{\left[\frac{TCAP \times 10^{-4}}{L_n} \quad \frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right]} \quad (22)$$

En donde.

I = Valor de la corriente rms en kA.

A = Sección transversal del conductor en mm².

T_m = Temperatura máxima permisible en °C.

T_a = Temperatura ambiente en °C

T_r = Temperatura de referencia para las constantes del material en °C.

α_r = Coeficiente térmico de resistividad a 0°C

ρ_r = Resistividad del conductor a la temperatura de referencia T_r, en μ Ω / cm³

α_r = Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia T_r

$$K = \frac{I}{\alpha_r} \quad \text{ó} \quad K_0 = \frac{I}{\alpha_r} - Tr$$

t_c = Tiempo de la corriente de falla, en segundos.

TCAP = Factor de capacidad térmica, se obtiene de la tabla 2 en $J / cm^3 / ^\circ C$.

Nótese que α_r y ρ_r están dados para la misma temperatura de referencia ($20^\circ C$). La tabla 2 proporciona información para α_r y ρ_r a $20^\circ C$.

Si el tamaño del conductor está dado en Circular Mils, la ecuación se modifica:

$$I = 5\,0671 \times 10^{-4} \times A \sqrt{\left[\frac{TCAP \times 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r} \ln \frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right]} \quad (23)$$

Las ecuaciones (22) y (23) pueden ordenarse de tal manera que se calcule el calibre del conductor requerido en función de la corriente:

$$A_{c.m.} = I \sqrt{\frac{\frac{t_c \alpha_r \rho_r \times 10^{-4}}{TCAP}}{\ln \left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right) \right]}} \quad (24)$$

$$A_{c.m.} = 1973\,521 \sqrt{\frac{\frac{t_c \alpha_r \rho_r \times 10^{-4}}{TCAP}}{\ln \left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right) \right]}} \quad (25)$$

TABLA 2. Constantes de Materiales

Descripción	Conductividad del material, %	Factor α_r a 20°C	$K_0(1/\alpha_0)$ a 0°C	Temperatura de fusión °C	ρ_r a 20 °C ($\mu \Omega / \text{cm}$)	Factor TCAP. Valor efectivo J / $\text{cm}^2 / ^\circ\text{C}$
Cobre suave recocido	100.0	0.00393	234	1083	1.7241	3.422
Cobre duro	97.0	0.00381	242	1084	1.7774	3.422
Cobre con alma de acero	40.0	0.00378	245	1084 / 1300	4.397	3.846
Cobre con alma de acero	30.0	0.00378	245	1084 · 1300	5.862	3.846
Aluminio EC	61.0	0.00403	228	657	2.862	2.556
Aluminio aleación 5005	53.5	0.00353	263	660	3.2226	2.598
Aluminio aleación 6201	52.5	0.00347	268	660	3.2840	2.598
Aluminio con alma de acero	20.3	0.00360	258	660 / 1300	8.4805	2.670
Acero revestido de zinc	8.5	0.00320	293	419 / 1300	20.1	3.931
Acero inoxidable No. 304	2.4	0.00130	749	1400	72.0	4.032

Referencia: ANSI / IEEE Std 80-1986

La figura No. 11 y la tabla 3 dan una rápida referencia de los materiales más comunes, asumiendo los siguientes parámetros de diseño:

1. Temperatura ambiente de 40°C
2. Límite de temperatura de fusión como el dado en la tabla 2
3. Temperatura máxima permisible para las juntas o uniones soldadas 450°C.
4. Temperatura máxima permisible para cables críticos y juntas atornilladas 250°C

TABLA 3. Calibre mínimo de Conductor por unidad (cmils / A)

Tiempo de Falla (seg)	Cobre 100 %	Cobre 97 %	* CCS 40 %	* CCS 30 %	Cobre 97 % / Límite de Temperatura	
					450°C	250°C
30.0	38.4	38.7	57.0	65.8	51.1	64.5
4.0	14.0	14.2	20.8	24.0	18.7	23.5
1.0	7.0	7.1	10.4	12.0	9.3	11.8
0.5	4.9	5.0	7.4	8.5	6.6	8.3

Referencia: ANSI / IEEE Std 80-1986.

* CCS = Acero Cubierto de cobre (Copper Cubert Steel)

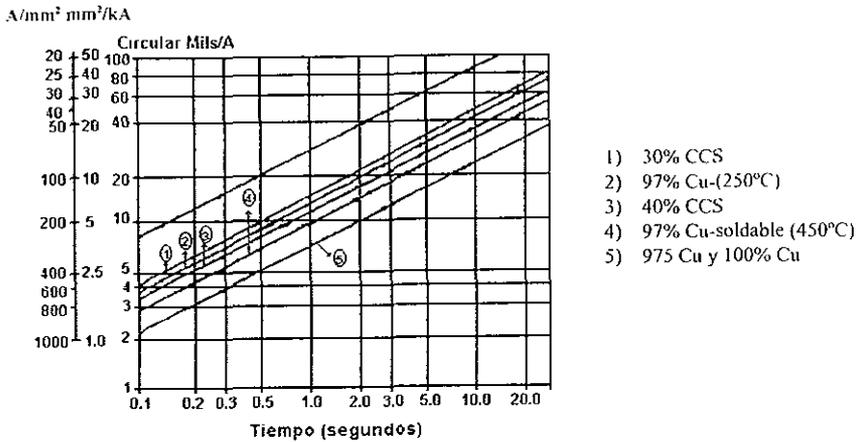


FIGURA 11. Nomograma para calibres de conductores

Paso 3.- CÁLCULO DE LOS POTENCIALES DE PASO Y DE CONTACTO TOLERABLES

Los potenciales de paso y de contacto permisibles, están determinados por las ecuaciones 20, 20-a, 21 y 21-a descritas anteriormente.

Los potenciales reales de paso y de contacto deberán ser menores a los potenciales tolerables de paso y de contacto respectivamente para proporcionar seguridad.

Paso 4.- DISEÑO INICIAL DE LA MALLA

El diseño preliminar deberá incluir un conductor cerrado rodeando el área completa de la subestación. Se localizarán conductores cruzados en dos direcciones formando una retícula para permitir la conexión a tierra de los diferentes equipos. El espaciamiento entre conductores y la localización de las varillas de tierra se basa en la corriente I_G y el área a proteger por la malla

Paso 5.- RESISTENCIA A TIERRA DE LA MALLA

El valor estimado de la resistencia a tierra es uno de los primeros pasos para determinar el tamaño y el arreglo básico del sistema de tierras. A primera vista esto puede parecer difícil; el sistema de tierras todavía no está diseñado y su resistencia es desconocida. Afortunadamente la resistencia depende en primer lugar del área ocupada por el sistema de tierras, la cual es conocida desde que se inicia el diseño. Como primera aproximación, el valor mínimo de la resistencia a tierra en la subestación en suelo uniforme puede estimarse por medio de la fórmula de una placa metálica circular una vez que se ha determinado la resistividad del suelo.

$$R_g = \frac{\rho}{4} \frac{\pi}{A} \tag{26}$$

Donde.

- R_g = Resistencia a tierra de la malla en Ω
- ρ = Resistividad promedio de la tierra en $\Omega \cdot m$
- A = Area ocupada por la malla en m^2

Un limite superior de la resistencia a tierra de la malla puede ser obtenida adicionando un segundo término:

$$R_g = \frac{\rho}{4} + \frac{\pi \rho}{A} + \frac{\rho}{L} \quad (27)$$

Donde

L = Longitud total de conductores enterrados de la malla en metros

Para mallas enterradas a una profundidad entre 0.25 y 2.5 m. se requiere corregir la ecuación la cual quedará de la siguiente forma:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{20A} \left(1 + \frac{1}{1+h} \cdot \frac{20}{A} \right) \right] \quad (28)$$

Donde h es la profundidad de la malla de tierras, en metros.

Recomendaciones:

1. La ecuación (26) se usará solamente cuando se requiera un valor estimado de la resistencia a tierra.
2. Las ecuaciones (27) y (28) son de gran ayuda para calcular la elevación del potencial a tierra para evaluar un diseño preliminar, así como para determinar la longitud aproximada de los conductores enterrados que se necesitan para controlar los potenciales de paso y de contacto.

Paso 6.- CORRIENTE DE MALLA

La corriente I_G se determina por la ecuación (29). Para prevenir diseños de sistemas de tierras sobredimensionados, se usará en el diseño únicamente la parte de la corriente total de falla $3I_0$ que fluye de la malla hacia el terreno y que contribuye a los potenciales de paso y de malla y a la elevación del potencial de tierra. La I_G debe sin embargo reflejar la peor condición de falla (tipo y localización), el factor de decremento y cualquier expansión futura del sistema eléctrico

Para determinar el valor correcto de la corriente máxima de malla I_G para el cálculo de la red de tierras de la subestación, se seguirán los siguientes pasos:

- 1) Estimar el tipo y localización de aquellas fallas a tierra que son probables de producir un gran flujo de corriente entre la malla a tierra y el terreno circundante, y por consiguiente una gran elevación de potencial en la malla con respecto a la tierra y altos gradientes de potencial en la superficie del área de la subestación.
- 2) Determinar por cálculo el factor de división de la corriente de falla S_f para cada una de las fallas determinadas en el paso 1, y establecer los valores correspondientes de la corriente simétrica de malla I_g .
- 3) Para cada una de las fallas basadas en su tiempo de duración t_f determinar el valor del factor de decremento D_f teniendo en cuenta los efectos de la asimetría de la onda de la corriente de falla.
- 4) Seleccionar el valor más grande del producto $D_f I_g$ y por consiguiente la peor condición de falla, establecer un factor de proyección C_p para obtener un margen para el crecimiento futuro del sistema.

Máxima corriente de malla

Un valor de diseño de la máxima corriente de red, se define como sigue.

$$I_G = C_p D_f I_g \quad (29)$$

Donde.

I_G = Corriente máxima de la red en A

D_f = Factor de decremento para la duración total de la falla.

C_p = Factor de proyección que toma en cuenta los incrementos relativos de la corriente de falla a lo largo de la vida útil de la instalación.

$C_p = 1$, cuando no existirán incrementos en la corriente de falla.

I_g = Corriente simétrica (valor rms) de malla en Amperes

Corriente simétrica de malla

Es una parte de la corriente simétrica de falla a tierra que fluye de la malla de tierras hacia el terreno que la rodea. Esta puede ser expresada como:

$$I_g = S_f I_f \quad (30)$$

Donde:

I_f = Valor rms de la corriente simétrica de falla a tierra en A.

S_f = Factor de división de corriente que relaciona la magnitud de la corriente de falla a la parte de esta corriente que fluye de la malla hacia el terreno.

Factor de Decremento

La máxima corriente de malla I_G incluye la corriente simétrica I_s , así como una corrección para la componente de C.D., la cual decae exponencialmente y se le conoce como desplazamiento de la corriente de C D Debido a que el diseño de la red de tierras debe considerar la corriente asimétrica se debe encontrar un factor llamado de decremento D_f , el cual tomará en consideración el efecto de desplazamiento de la componente de C.D.

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} (1 - e^{-2t_f/T_a})} \tag{31}$$

Donde :

t_f = Duración de la falla en segundos.

T_a = Constante de tiempo subtransitoria del sistema.

($T_a = X'' / WR''$, para 60 Hz, $T_a = X'' / 120\pi R''$).

La relación X''/R'' es la relación X/R en el punto de falla. La tabla 4 contiene diferentes valores de D_f y de X/R

TABLA 4. Factor de decremento y relación X/R

Duración de la falla t_f (s)	Ciclos (60 Hz ac)	Decremento Factor D_f			
		X/R = 10	X/R = 20	X/R = 30	X/R = 40
0.00833	0.5	1.576	1.648	1.675	1.688
0.05	3	1.232	1.378	1.462	1.515
0.10	6	1.125	1.232	1.316	1.378
0.20	12	1.064	1.125	1.181	1.232
0.30	18	1.043	1.085	1.125	1.163
0.40	21	1.033	1.064	1.095	1.125
0.50	30	1.026	1.052	1.077	1.101
0.75	45	1.018	1.035	1.052	1.068
1.00	60	1.013	1.026	1.039	1.052

Paso 7.- COMPARACION DE POTENCIALES

Si la máxima elevación de potencial de la malla del diseño preliminar está por debajo del valor del potencial de contacto tolerable, ya no es necesario realizar más cálculos, únicamente se agregarán si se requieren conductores adicionales para la puesta a tierra de equipos

Paso 8.- CALCULO DE LOS POTENCIALES DE PASO Y DE CONTACTO EN LA MALLA

Los cálculos de los potenciales de paso y de contacto en la malla para la red diseñada, se calcularán con las ecuaciones descritas en los párrafos siguientes.

▮ Cálculo de los potenciales máximos de paso y de malla

Para determinar los parámetros de diseño y establecer los valores correspondientes de E_m y E_{paso} sin la necesidad de usar una computadora se utilizarán las siguientes ecuaciones:

a) Potencial de malla

$$E_{malla} = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L} \quad (32)$$

La ecuación (33) es el producto del factor geométrico K_m , el factor de corrección K_i , la resistividad del terreno ρ y la densidad de corriente promedio por unidad de longitud de conductor enterrado I_G/L .

El factor K_m está basado en la geometría de una malla de tierras, K_m es proporcional al potencial de malla. La relación entre K_m y E_{malla} depende en gran medida de la densidad de la corriente en el perímetro de los conductores contra la densidad de corriente en los conductores internos.

$$K_i = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_m}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \quad (33)$$

Donde:

$K_m = 1$ para mallas con varillas de tierras a lo largo de su perímetro, o para mallas con varillas de tierras en las esquinas, así como para mallas con varillas de tierra a lo largo del perímetro y dentro del área de la malla.

$K_i = \frac{1}{(2n)^{2n}}$ Para mallas sin varillas de tierra, o mallas con únicamente pocas varillas de tierra, ninguna localizada en las esquinas o en el perímetro de la malla

$$K_i = 1 + \frac{h}{h_0} \quad (34)$$

Donde:

- $h_r = 1$ metro (profundidad de referencia de la malla).
- D = Separación entre conductores en metros.
- h = Profundidad de los conductores de la malla en metros.
- n = Número de conductores en una dirección.
- d = Diámetro del conductor de la malla en metros.

$$K_1 = 0.656 + 0.172 n \quad (35)$$

El factor K_1 deberá de obtenerse tanto para el cálculo del potencial de malla, como para el cálculo del potencial de paso.

Cuando se trate de obtener el factor K_1 para el cálculo del potencial de malla, el valor de n se obtiene de la siguiente manera:

$$n = n_A n_B \quad (36)$$

Donde.

- n_A = Número de conductores a lo largo de la malla.
- n_B = Número de conductores a lo ancho de la malla.

Una vez obtenido el valor de n , se sustituye en la ecuación (36).

Si L_c representa la longitud total del conductor de la red y L_r representa la longitud total de las varillas de tierra, entonces para redes con varillas de tierras se tiene:

$$E_{r, \text{step}} = \frac{\rho K_m K_1 I_G}{L_c + 1.15 L_r} \quad (37)$$

El factor 1.15 que multiplica a la longitud L_r en la ecuación anterior refleja el hecho de que la densidad de corriente es más alta en las varillas de tierra cercanas al perímetro que en los conductores de la red.

Para redes sin varillas de tierra, o con pocas varillas localizadas dentro de la malla pero lejos del perímetro, se usa la siguiente ecuación:

$$E_{r, \text{step}} = \frac{\rho K_m K_1 I_G}{L_c + L_r} \quad (38)$$

b) Potencial de paso

$$E_{paso} = \frac{\rho K_s K_i I_G}{L} \quad (39)$$

El factor K_s está basado en la geometría de una malla de tierras. Este factor K_s es proporcional al potencial de paso E_{paso} ,

Por simplificación, el máximo potencial de paso es asumido que ocurra en una distancia igual a la profundidad de la red h , justamente fuera del perímetro del conductor. Para la profundidad usual de la red de tierras de 0.25 m hasta 2.5 m., la formula para calcular K_s es.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1-0.5^{n-2}) \right] \quad (40)$$

El valor de n para calcular los factores K_s y K_i del potencial de paso (E_{paso}), será el valor máximo de n_A y n_B .

$$n = \max(n_A, n_B)$$

y para profundidades menores de 0.25 m.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} W \right] \quad (41)$$

donde: $W = 1/2 + 1/3 + 1/4 + \dots + 1/(n-1)$

para $n \geq 6$

$$W \approx \frac{1}{2(n-1)} + Ln(n-1) - 0.423 \quad (42)$$

El empleo de las diferentes ecuaciones para el factor K_s , depende de la profundidad h de la malla, ya que el potencial de paso decrece rápidamente cuando la profundidad se incrementa.

↳ *Limitaciones en el empleo de las ecuaciones Em (Potencial de malla) y Es (Potencial de paso).*

Cuando se empleen las ecuaciones anteriores, se recomiendan los siguientes límites para aquellas mallas que sean cuadradas o rectangulares y que tengan el mismo número de conductores en ambas direcciones:

$$n \leq 25$$

$$0.25 \text{ m} \leq h \leq 2.5 \text{ m}$$

$$d < 0.25 h$$

$$D > 2.5 \text{ m}$$

Paso 9.- COMPARACIÓN DEL POTENCIAL DE CONTACTO EN LA MALLA CON EL POTENCIAL DE CONTACTO TOLERABLE

Si el potencial de contacto de la malla es menor que el potencial de contacto tolerable, el diseño puede completarse, y si no, tendrá que modificarse el diseño preliminar (paso 10).

Paso 10.- MODIFICACIONES EN EL DISEÑO

Si se exceden los límites de los potenciales tolerables, se requerirá de una revisión en el diseño de la malla. Esta revisión incluirá espaciamientos más pequeños entre conductores, varillas de tierra adicionales, etc.

Paso 11.- DETALLES EN EL DISEÑO

Después de satisfacer los requerimientos de los potenciales de paso y de contacto, se pueden requerir conductores y varillas de tierra adicionales, estos conductores adicionales pueden ser necesarios si el diseño de la red no incluye conductores cerca del equipo que debe ser aterrizado. Las varillas de tierra adicionales pueden ser utilizadas debido a las sobretensiones que puedan ser producidas, por ejemplo en la base de los apartarrayos, el neutro de los transformadores, etc.

CAPITULO V

ATERRIZAMIENTO DE EQUIPO ELECTRICO

V. ATERRIZAMIENTO DE EQUIPOS ELECTRICOS

V.1. INTRODUCCION

La conexión a tierra de equipo eléctrico se refiere al sistema de conductores eléctricos (conductores de tierra y buses de tierra) mediante los cuales todas las estructuras metálicas que no conducen corriente dentro de una planta industrial se interconectan y aterrizan. En una instalación eléctrica, la conexión a tierra tiene una importancia primordial para la protección del personal y de los equipos.

Partiendo de esta base es necesario conectar a tierra aquéllas partes de las instalaciones eléctricas que normalmente no se encuentran sujetas a tensión, pero que pueden tener diferencias de potencial a causa de fallas accidentales, tales partes pueden ser los tableros eléctricos, el tanque de los transformadores, la carcasa de las máquinas eléctricas, y en general los soportes metálicos de equipos y aparatos

Con frecuencia durante las actividades de trabajo en la *instalación* como son mantenimiento, ampliaciones, reparaciones, etc., es necesario realizar conexiones a tierra temporales con partes de la instalación fuera de servicio con el fin de que sean accesibles sin peligro para los trabajos a utilizar.

Los sistemas y circuitos conductores son puestos a tierra para limitar las sobretensiones debidas a descargas atmosféricas, a fenómenos transitorios en el propio circuito o a contactos accidentales con líneas de mayor *tensión* así como para estabilizar la tensión a tierra en condiciones normales de operación.

V.2. CONEXION A TIERRA DE LOS SISTEMAS DE ALIMENTACION DE C.A.

El objetivo de las conexiones a tierra para los sistemas de alimentación es reducir el peligro que representa el mismo, por su misma energía, o por causas externas

En la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMP-1994 se recomienda que los sistemas de C.A. sean conectados a tierra en forma adecuada de tal manera que el potencial a tierra no sobrepase los 150V

Existen casos de sistemas que operan con potencial bajo en los que no se exige conexión a tierra, por ejemplo alarmas, señales, etc., *excepto si son alimentados* por transformadores de sistemas con potencial de más de 150 V a tierra, o bien si el sistema que energiza al transformador se encuentra aislado completamente de tierra, o cuando dicho sistema de alimentación va instalado por fuera de los inmuebles, como conductores aéreos.

Por último, los sistemas mayores a 1 kV, deberán ser conectados a tierra. En el caso de que alimenten *equipo portátil* es obligatorio que el neutro del sistema esté conectado a tierra a través de una impedancia, o bien en el caso de no tener neutro como en los sistemas en delta el neutro tendrá que derivarse.

Por otro lado cabe señalar que todas las cubiertas y marcos metálicos de los equipos portátiles deben ponerse a tierra en donde la impedancia del neutro está conectada

En caso de la alimentación de C.A. en lugares definidos como peligrosos; por ejemplo, las grúas que manejan fibras combustibles, en éste caso dicho sistema no debe conectarse a tierra debido a que el riesgo de fuego aumenta, sin embargo las estructuras y carriles de las grúas si tendrán que aterrizarse.

La Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMP-1994 en el artículo 250-25 recomienda que para circuitos principales en corriente alterna se pondrá a tierra:

- Sistemas monofásicos de dos hilos: Un conductor.
- Sistemas monofásicos de tres hilos: El conductor neutro.
- Sistemas polifásicos que tienen un conductor común a todas las fases: El conductor común.
- Sistemas polifásicos que requieran tener una fase puesta a tierra: El conductor de una fase.
- Sistemas polifásicos en el cual una fase es empleada como sistema monofásico de tres hilos. El conductor neutro.

V.3. PUESTA A TIERRA DE LOS EQUIPOS

V.3.1. Conexión a Tierra de Equipo Eléctrico

Independientemente de la conexión que pueda haber en la fuente de energía que abastece una instalación, algunas partes del equipo deben ser unidas a tierra por motivos de protección, ya que, si existiera una falla en el aislamiento de un conductor podría causar un contacto accidental entre el conductor energizado y el marco de metal o canalización que lo encierra y tal contacto energizaría el marco al nivel del voltaje del conductor.

La conexión de equipo se refiere a la interconexión y al aterrizamiento de los elementos metálicos no eléctricos de un sistema, por ejemplo, conduits metálicos, marcos de motores y, en general, toda envoltura metálica de los equipos.

La Norma Oficial Mexicana señala que las partes metálicas de los equipos que tengan posibilidades de ser energizadas y que estos se encuentren fijos en algún sitio, tendrán que estar conectadas a tierra permanentemente, con la impedancia tan baja como sea posible para garantizar el buen funcionamiento de los dispositivos de sobrecorriente.

En general, independientemente del voltaje de operación de los equipos, todas las partes metálicas como canalizaciones, soportes de calefacción, armazones de tableros de distribución, de armaduras de generadores y motores, bombas de agua, equipos para señalización contra fuego, etc., tendrán que ser aterrizados a tierra. Debemos mencionar que los conductores de tierra, cubiertas metálicas de aparatos y equipos, etc.; deben estar alejadas de los cables o varillas de los apartarrayos del inmueble por lo menos 1.8 m, donde esto sea practicable, en caso de no poder obtener dicha distancia deberán ser *unidos eléctricamente* a dicho cable o varilla con el objeto de mantener todo el mismo potencial.

V.3.2. Equipos fijos o conectados permanentemente

Las partes metálicas descubiertas de equipos fijos no destinadas a transportar corriente pero que pueden tener la posibilidad de quedar energizadas se deben poner a tierra, esto sucederá cuando se presenten algunas de las siguientes condiciones:

- Cuando estén dentro de una distancia de 2.40 m verticalmente o de 1.50 m horizontalmente de la tierra y expuestos a contactos de las personas
- Cuando estén ubicados en lugares húmedos y mojados que no estén aislados.
- Cuando estén en contacto eléctrico con metales.
- Cuando el equipo funciona con cualquiera de sus terminales a más de 150 V a tierra

V.3.3. Equipos fijos conectados por métodos de cableado permanentemente

Se pondrán a tierra los siguientes equipos:

- Las estructuras y armazones de cuadros de distribución que soportan equipo de maniobra.
- Armaduras de generadores y motores de órganos eléctricos.
- Los armazones de los *motores estacionarios* si están alimentados por conductores contenidos en canalizaciones metálicas, si están ubicados en lugares húmedos y no están aislados, si el motor funciona con cualquier terminal a más de 150 V con respecto a tierra.
- Cubiertas de controladores de motores.
- Equipo eléctrico para grúas y elevadores.
- Equipos eléctricos en cocheras comerciales, teatros y estudios de cine móviles Equipos de proyección de cine.
- Los anuncios eléctricos y equipos asociados.
- Bombas de agua operadas con motor incluyendo las de tipo sumergible.

V.3.4. Equipo conectado con cordón y clavija

La Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMP-1994 en el artículo 250-45 recomienda poner a tierra las partes metálicas descubiertas que no transporten corriente y que puedan quedar energizadas, en los equipos conectados con cordón y clavija, en cualquiera de los siguientes casos:

- Equipos que operan a más de 150 V respecto a tierra.
- Refrigeradores, congeladores y aparatos de aire acondicionado.
- Lavadoras y secadores de ropa, lavaplatos y equipos eléctricos para acuarios.
- Herramientas operadas por motor; fijas y estacionarias.
- Podadoras y limpiadores de pisos a base de agua.
- Aparatos conectados con cordón y clavija en lugares húmedos o mojados o que sean utilizados por personas paradas en tierra o sobre pisos metálicos
- Equipo de procesamiento de datos y de cómputo

La puesta a tierra de los equipos antes mencionados se deberán hacer por uno de los siguientes métodos:

1. Por medio de la cubierta metálica de los conductores que alimentan este equipo, si se utiliza una clavija de tipo polarizada provista de una terminal fija de puesta a tierra
2. Por medio de un conductor de puesta a tierra de equipos instalados junto con los conductores de energía del cable o cordón flexible y que este terminado en una clavija del tipo polarizado puesta a tierra que tenga un contacto polarizado fijo a tierra.(Figura 12).
3. Por medio de una cinta o alambre flexible separado, aislado o desnudo y protegido de la forma más practica contra daños materiales que forme parte del equipo.

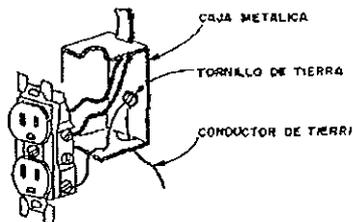


Figura No. 12 contacto polarizado

V.3.5. Equipo de Medición y Protección

La medición de la carga de un sistema eléctrico y en particular de una subestación, es la operación de un conjunto de diferentes aparatos conectados a los devanados secundarios de los transformadores de instrumento, que miden magnitudes de los diferentes parámetros eléctricos de las instalaciones de alta y baja tensión, así como de los dispositivos auxiliares de la subestación.

Tanto para el equipo de medición y protección, la conexión a tierra deberá considerarse de gran importancia para la protección del equipo y seguridad de operación del mismo contra sobretensiones y fallas a tierra. Por lo cual se considera lo siguiente:

1. Los circuitos secundarios de transformadores de instrumento (de corriente y de potencial) deben ser puestos a tierra, si los devanados primarios están conectados a circuitos con tensión de 300 V o más respecto a tierra.
2. Las cubiertas para relevadores, medidores e instrumentos, se pondrán a tierra cuando funcionen con devanados o partes sometidas a tensión de 300 V o más respecto a tierra, y que estén ubicadas en tableros de distribución, tanto si están alimentados a través de los transformadores de potencial y/o de corriente, o si están conectados directamente al circuito.

V.3.6 Sistemas de Alimentación en Corriente Directa

En C.D. la conexión a tierra del neutro de los sistemas de dos hilos, esto no se exige sólo si la corriente directa es obtenida mediante un rectificador alimentado por un sistema de C.A., siempre y cuando el sistema de C.A. si este puesto a tierra, o bien, con el sistema de C.D. se alimenta equipo de señalización para protección contra incendio.

V.4. SISTEMAS DE ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA

En cada inmueble o estructura a servirse, el sistema de electrodos de puesta a tierra se podrá realizar interconectando cada una de las partes que se citan a continuación:

- a) Electrodos de acero con cubierta de cobre.- consiste en una varilla redonda de longitud de 3 m. o más con diámetro de 13 mm a 19 mm, el acero le da dureza y el cobre resistencia a la corrosión y mejor conductividad, el espesor de cobre debe tener 0.25 mm como mínimo.
- b) Tubería metálica de agua enterrada con 3 m o más en contacto directo con la tierra y que sea eléctricamente continua hasta los puntos de conexión al electrodo de puesta a tierra.
- c) Electrodo empotrado en concreto.- un electrodo es aceptable si está formado por lo menos de 6 m. de una o más barras o varillas de acero reforzado de no menos de 1.25 cm de diámetro, o consistente en una barra desnuda de cobre de 6 m. de longitud y de sección transversal de 21.5 mm² (4AWG), embutido 5 cm. dentro de una plancha de concreto directo con la tierra

- d) Anillo de tierra.- consiste en un conductor de cobre desnudo de sección transversal de 33 6 mm² (2AWG) de 6 m de longitud enterrados en contacto directo con la tierra a una profundidad de 80 cm del nivel del terreno y que rodea al inmueble o estructura

Donde no se dispongan de algunos de los electrodos indicados anteriormente se recurrirá a utilizar electrodos especiales como los que a continuación se describen

- a) Electrodos profundos.- Consisten en un conductor de baja impedancia instalado en perforaciones profundas, hasta encontrar terrenos de baja resistividad a niveles de mayor humedad.
- b) Electrodos horizontales - Consiste en instalar un conductor de cobre desnudo enterrado en forma horizontal a una profundidad de 50 cm a 100 cm de diferentes configuraciones.
- c) Electrodos múltiples.- Consiste en colocar electrodos en diferentes cantidades y configuraciones, espaciados una distancia determinada uno de otro, generalmente 3 m.

La resistencia a tierra de los electrodos no debe ser mayor de 25 Ω para casas habitación, comercio, oficinas o locales considerados como de concentración pública, con acometidas en baja tension.

V.5. METODOS DE ATERRIZAMIENTO DEL NEUTRO DEL SISTEMA

Los sistemas eléctricos emplean algún método para el aterrizamiento del neutro del sistema, ya sea en uno ó más puntos.

Estos métodos pueden ser subdivididos en dos categorías:

- a) **Aterrizamiento Sólido**
- b) **Aterrizamiento a través de una impedancia**
- b.1) Aterrizamiento por medio de reactancia*
- b.2) Aterrizamiento por medio de resistencia*
- b.3) Aterrizamiento con neutralizador de falla a tierra*

Cada método toma su nombre de la manera en que externamente es conectado el neutro a tierra del sistema.(Figura 13).

Los circuitos de protección contra fallas a tierra pueden ser afectados por el método de aterrizamiento. Si otro método de aterrizamiento es utilizado se recomienda hacer una reevaluación de las protecciones para dicha aplicación.

a) Aterrizamiento Sólido.

El aterrizamiento sólido se refiere a la conexión del neutro de un generador, transformador, etc., directamente a la tierra física de la subestación. A causa de la reactancia del generador o transformador aterrizada en serie con el neutro del sistema, una conexión a tierra no provee impedancia de secuencia cero al neutro.

Los beneficios que encierra un aterrizamiento sólido, son determinados, según su grado de aterrizamiento. Una buena guía al respecto es la magnitud de la corriente de falla a tierra comparada con la corriente de falla trifásica del sistema. Si la corriente de falla a tierra genera una corriente mayor que la corriente trifásica el grado de aterrizamiento del sistema es considerado alto. Un sistema efectivamente aterrizado tiene una corriente de cortocircuito de línea a tierra por encima del 60% del valor para el cortocircuito trifásico.

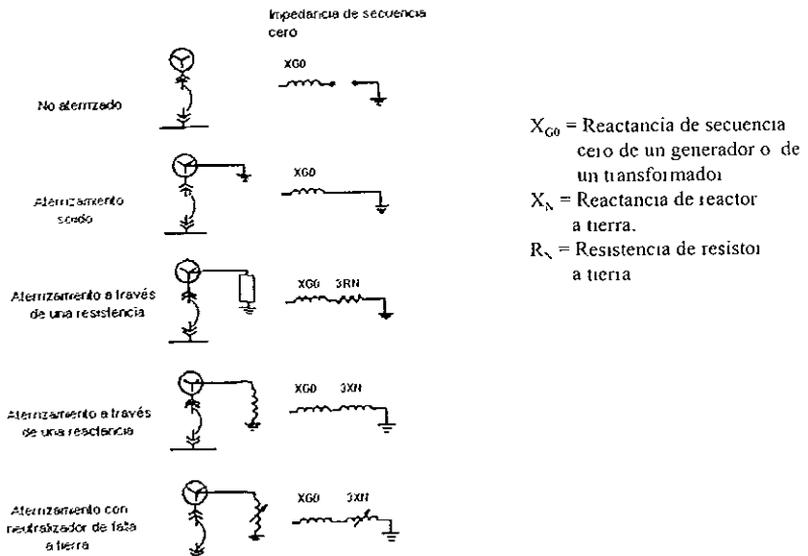


Figura No. 13. Métodos de aterrizamiento del neutro del sistema

En términos de resistencia y reactancia un sistema se considera efectivamente aterrizado solamente cuando es $R_0 \leq X_1$ y $X_0 \leq 3X_1$.

X_1 es la componente usada en la relación del equivalente de Thevenin de la reactancia de secuencia positiva del sistema completo, incluyendo la reactancia subtransitoria de todas las máquinas rotatorias

b) Aterrizamiento a través de una impedancia.

b.1) Aterrizamiento mediante reactancia.

El término reactancia de aterrizamiento describe un caso en que un reactor es conectado entre el sistema neutro y tierra. Desde que la corriente de falla a tierra empieza a fluir en el sistema está en función con la reactancia del neutro. La magnitud de dicha corriente es usada como descripción del grado de aterrizamiento. En un sistema con aterrizamiento reactivo, la corriente de falla disponible a tierra debe ser al menos el 25% y preferentemente el 60 % de la corriente de falla trifásica para prevenir serios voltajes transitorios ($X_0 \leq 10 X_1$).

Esto es considerablemente alto con respecto al nivel deseable de corriente de falla en un sistema con aterrizamiento resistivo, y por lo tanto la reactancia en el aterrizamiento es usualmente no considerada como método de conexión a tierra.

En la mayoría de los generadores, un aterrizamiento sólido, puede permitir la máxima corriente de falla a tierra desde el generador y exceder la máxima corriente de falla trifásica que el generador puede entregar y por lo cual sus devanados son esforzados. Consecuentemente, generadores con neutro aterrizado pueden serlo a través de un reactor de valor bajo que permita limitar la corriente de falla a tierra a un valor no mayor que la corriente de falla del generador. En el caso de sistemas trifásicos cuatro hilos, la limitación de corriente de falla a tierra es 100% de la corriente de falla trifásica es usualmente práctica sin intervenir en la operación normal de los cuatro hilos.

b.2) Aterrizamiento por medio de Resistencia.

En un aterrizamiento resistivo, el neutro es conectado a tierra a través de uno o más resistores. En este método, los voltajes de línea a tierra que existen durante una falla a tierra son casi los mismos que para un sistema no aterrizado. Un sistema propiamente aterrizado por medio resistivo no es sujeto a sobrevoltajes transitorios destructivos.

Para sistemas de 15 KV o menores que utilicen resistencia como medio de conexión a tierra, los sobrevoltajes suelen no ser de naturaleza seria si el valor de la resistencia se encuentra dentro de los siguientes límites. $R_0 \leq X_0$ y $R_0 \geq 2X_0$

La corriente correspondiente de falla a tierra es mucho menor que el normalmente usado para baja resistencia de aterrizamiento, pero el diseño es para resistencia alta de aterrizamiento

Las razones para limitar la corriente por medio de una resistencia de aterrizamiento pueden ser una o más de las siguientes:

- 1 Reducir efectos de calentamiento y fusión en el equipo eléctrico en falla como controladores, transformadores, cables y máquinas rotatorias.
- 2 Reduce esfuerzos mecánicos en circuitos y aparatos, producidos por la corriente de falla.
- 3 Reduce riesgos de descarga eléctrica a personal causados por el desvío de corrientes de falla a la ruta de retorno.
4. Reduce el peligro de arqueo por ráfagas de viento o relámpagos que pueden ser peligrosos para el personal causado por la proximidad de la falla.
- 5 Reduce el decremento momentáneo del voltaje de línea ocasionado por la ocurrencia de un libramiento de falla a tierra.
6. *Mantiene el control seguro* de sobrevoltajes transitorios y al mismo tiempo evita el disparo de los dispositivos de protección durante el inicio de la falla a tierra (alta resistencia de aterrizamiento).

El aterrizamiento por medio de una resistencia puede ser de dos clases, alta o baja, distinguiéndose por la magnitud de la corriente de falla a tierra que permite fluir. Aunque en algunos lugares no son reconocidos como estándares los niveles de corriente de falla que definen estas clases, en la práctica ésta es una clara diferencia. La alta resistencia en el aterrizamiento típicamente usa niveles de corriente de falla de 10 Amperes o menos, aunque algunos sistemas especializados de la clase de 15 kV pueden tener niveles de corriente de falla a tierra que se limita por medio de una resistencia que usualmente va desde los 200 hasta los 1000 amperes.

Ambos tipos están diseñados para limitar sobrevoltajes transitorios a un nivel seguro (250% de lo normal). Sin embargo, el método de alta resistencia usualmente no requiere inmediato libramiento de la falla a tierra, ya que la corriente es limitada a un muy bajo nivel este nivel puede ser menor que la generada por la capacitancia total a tierra. El esquema de protección asociada a la alta resistencia de aterrizado usualmente cuenta con dispositivos de detección y alarmas inmediatas.

El método de baja resistencia tiene la ventaja de un inmediato y selectivo libramiento del circuito fallado, pero requiere que la mínima corriente de falla sea suficiente para que operen los dispositivos de protección de falla a tierra.

La alta resistencia en el aterrizado es un método que puede ser aplicado a sistemas existentes de medio voltaje no aterrizados para obtener protección contra sobrevoltajes transitorios sin la modificación de adherir relevadores de tierra para cada circuito.

b.3) Neutralizador de falla a tierra

El neutralizador de falla a tierra es un reactor conectado entre el neutro de un sistema y tierra, tiene una selección específica, relativamente alto valor de reactancia. La reactancia es ajustada a la corriente de carga del sistema, así que la corriente resultante de falla a tierra es de origen resistivo y de baja magnitud. Esta corriente está en fase con el voltaje de línea a tierra, así que simultáneamente

cruzan por cero su valor, si la falla a tierra es en aire puede ser por sí misma extinguida, Este método de aterrizamiento es usado en sistemas de más de 15 kV.

c) Sistema con Neutro Aislado de Tierra o Flotante

Cuando un sistema eléctrico de potencia es operado con una conexión no intencional a tierra es generalmente nombrado sistema con neutro aislado o flotante. En realidad estos sistemas son puestos a tierra a través de la capacitancia intrínseca a tierra. En muchos sistemas dicha impedancia es extremadamente alta, por lo que el flujo de corriente resultante de éste sistema es relativamente débil.

Dos principales ventajas se atribuyen a los sistemas con neutro aislado de tierra o flotante. La primera es operacional; cuando ocurre una falla a tierra en el sistema causa sólo un pequeño flujo de corriente, por lo que el sistema puede ser operado con una falla a tierra presente mejorando la continuidad del sistema. La segunda es económica; no son requeridos gastos para equipo de aterrizamiento o conductores del sistema de tierra.

Efectos resonantes pueden ocurrir cuando la ruta de la malla a tierra incluye una reactancia inductiva aproximadamente igual a la reactancia capacitiva a tierra. Cuando un sistema flotante es empleado, se puede usar como esquema de protección un transformador trifásico con sus devanados primarios conectados en estrella y con el neutro del primario aterrizado.

Los devanados secundarios del transformador de voltaje son usualmente conectados en delta abierta con un relevador conectado en la esquina abierta, usado con el fin de indicar la condición de falla de circuito. Resistores de carga pueden ser requeridos en el neutro del circuito primario o en el circuito secundario para evitar ferresonancia.

CAPITULO VI

ATERRIZAMIENTO DE EQUIPO ELECTRONICO

VI. ATERRIZAMIENTO DE EQUIPO ELECTRONICO

VI.1. INTRODUCCION

La operación exitosa y confiable del equipo electrónico sensible requiere el apego a los fundamentos de la física.

Los cambios rápidos en la industria electrónica y de comunicaciones hace casi imposible para los ingenieros de diseño ser expertos en todas las disciplinas relacionadas.

En las prácticas recomendadas existen restricciones en el diseño, la instalación o el servicio. Estas restricciones son generalmente necesarias para obtener los niveles de comportamiento deseados en las cargas electrónicas sensibles dentro de los confines de los códigos, estándares y regulaciones aplicables, los cuales más allá del código eléctrico aplicable deben ser utilizados en forma prudente por las personas dedicadas al diseño, instalación y servicio.

Es muy importante considerar la seguridad eléctrica por encima de todos los trabajos de diseño. La seguridad está gobernada básicamente por los códigos y estándares eléctricos que sean adoptados por las agencias de gobierno, entidades comerciales y el buen juicio por la parte del que diseña.

En general, el equipo que no se puede hacer operar de una manera satisfactoria sin violar los requerimientos de seguridad eléctricos aplicables, no es adecuado para su uso en aplicaciones normales. El usar exclusivamente equipo eléctrico y electrónico que está cubierto por una prueba o listado de seguridad del producto es, generalmente, la primera línea de defensa contra problemas de seguridad eléctrica.

VI.2. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

Los equipos electrónicos sensibles deberán conectarse directamente a tierra. Los sistemas de aterrizaje diseñados para una instalación con equipo electrónico sensible se pueden conceptualizar como si tuviera tres distintos subsistemas; sólidamente interconectados y funcionales:

1. Subsistema de protección personal (Sistema de Conexión a Tierra de Equipos).
2. Subsistema de referencia de señales de equipos sensibles.
3. Subsistema de protección contra descargas atmosféricas.

SUBSISTEMA PARA PROTECCION PERSONAL

Establece la referencia a tierra de la instalación, y se instala sólo para evitar descargas (debidos a potenciales de paso y contacto), fuego producido por algún arco eléctrico. El proceso de transporte de señales y el proceso de señales interno del equipo no se benefician de éste sistema, es decir, no se realizan conexiones a él para referencia, sólo se conecta desde el punto de vista de seguridad. Este subsistema se utiliza para conectar a tierra los equipos con el propósito principal de seguridad.

SUBSISTEMA PARA REFERENCIA DE SEÑALES

Los sistemas de tierra para protección del personal y contra fallas que emplean largos conductores de tierra en las instalaciones donde están presentes altas frecuencias, exhiben altas impedancias en selectos intervalos de frecuencia de particular interés, por lo tanto, no se deben utilizar solamente para proporcionar una referencia para altas frecuencias de los equipos sensibles. Se sabe que cuando se tienen conductores de tierra largos tanto en sistemas de un sólo punto como en sistemas multipunto, exhiben impedancias más grandes a frecuencias más altas, por lo tanto, los subsistemas para referenciar señales requieren la existencia de una estructura que logre los beneficios de un plano de tierra equipotencial en todo el intervalo de frecuencias de interés (desde DC hasta decenas de Mhz).

Al instalar un plano de tierra equipotencial se logra una impedancia baja para grandes rangos de frecuencia proporcionando una magnitud de trayectorias paralelas entre los diversos circuitos conectados a ellos.

También es verdad que para cada frecuencia referenciada dentro de éstos planos, existirá cuando menos una trayectoria que corresponde a la resonancia; esto es, a un cuarto de la longitud de onda de alta frecuencia en relación con la impedancia, pero éste efecto no es válido para otras trayectorias que son de media longitud de onda y múltiplos desde éste punto resonante fundamental.

VENTAJAS DE UN PLANO EQUIPOTENCIAL-

1. Proporcionar un camino de retorno de baja impedancia para las corrientes de ruido de radiofrecuencia
2. Refrena los campos electromagnéticos (ruido) entre la fuente que los produce y el plano de referencia.
3. Incrementa el filtrado de los campos electromagnéticos
4. Protege a los circuitos o equipo sensible adyacente.

El plano equipotencial debe ser empleado dentro de un área de equipo electrónico sensible, éste a su vez deberá ser conectado a otro plano equipotencial con otros equipos electrónicos para posteriormente conectarse a la red de tierra local de la subestación. El objetivo principal del plano equipotencial, es mantener al mismo potencial a todos los equipos sensibles. Este proceso continua hasta que todo el equipo electrónico sensible de interés este interconectado a un plano equipotencial grande y continuo

SUBSISTEMA DE PROTECCION CONTRA DESCARGAS ATMOSFERICAS

El propósito de este subsistema es el transporte seguro de las corrientes relacionadas con las descargas a través de la instalación y hasta la red de tierras de la subestación. Esto se lleva a cabo proporcionando trayectorias para dirigir las corrientes de las descargas atmosféricas hacia tierra.

El comportamiento del equipo electrónico esta asociado con el método de instalación de equipo de particular interés a este respecto son los requerimientos para la alimentación externa y la conexión a tierra del equipo conectado. Las incompatibilidades entre el equipo y la tierra de CA son problemas de alambrado eléctrico más comunes que se han encontrado.

Cuando se evalúa la selección entre sistemas trifásicos y monofásicos, siempre se debe considerar el hecho de que los sistemas trifásicos pueden generalmente soportar cargas más grandes con una mejor eficiencia que los sistemas monofásicos, y que la potencia monofásica se puede derivar de un sistema trifásico

Los equipos electrónicos modernos tienden a ser cargas no lineales y requieren corrientes con picos altos con su correspondiente factor de cresta grande en los circuitos que les suministran CA. En ciertas situaciones, los sistemas con cargas electrónicas pueden no ser la causa real de los problemas de distorsión del voltaje, sino más bien, pueden ser las víctimas. Esta situación ocurre generalmente cuando un equipo grande no lineal, distorsiona la forma de onda del voltaje de un circuito de alimentación de un inmueble y las otras cargas de los edificios vecinos se ven afectadas

VI.3. CIRCUITOS DEDICADOS Y COMPARTIDOS

Cuando se alimentan cargas simples, es común tener una variedad ilimitada de cargas compartiendo el circuito alimentador o el ramal. Pero este no es el caso con una carga de equipo electrónico donde las iteraciones indeseables pueden causar problemas de comportamiento y de confiabilidad. El compartir una línea común, el neutro, o las trayectorias del conductor a tierra por múltiples cargas electrónicas pueden producir iteraciones indeseables.

Una solución recomendada para el diseño del sistema de alambrado para cargas electrónicas sensibles, consiste en separar las clases de cargas no similares y colocarlas en alimentadores y ramales dedicados, y no combinarlos excepto cuando se sepa que son compatibles.

ALIMENTADORES

Los alimentadores son capaces de entregar corrientes de falla grandes en condiciones de corto circuito que involucran tierra. Por lo tanto, se debe poner mucha atención al control de las caídas de voltaje en estos circuitos y de una apropiada conexión a tierra. Las caídas de voltaje en los alimentadores que energizan cargas electrónicas sensibles no deben pasar del 2% bajo las condiciones reales de la carga conectada.

RAMALES

Los ramales son siempre la interfaz final entre el límite del sistema de alambrado y el equipo (la carga). La caída de voltaje en los ramales que sirven cargas sensibles no debe exceder al 1% del voltaje de línea. Se recomienda que los ramales sean instalados en conduits y canales (raceways) metálicos continuamente blindados.

VI.4. CONEXION A TIERRA DE EQUIPO ELECTRONICO

Una de las más importantes funciones del sistema de tierra es la conexión a tierra del equipo. La perfecta conexión a tierra idealmente presenta una resistencia cero, pero como sabemos esto es imposible. Sin embargo, si tenemos un correcto aterrizamiento del equipo, no necesitamos procurar un valor irrealista tan bajo de resistencia tierra, ya que las conexiones a la malla son principalmente por seguridad eléctrica, obteniendo bajos gradientes de potencial en los equipos.

Para equipo electrónico sensible será necesario el diseño de una red especial para altas frecuencias, y esta tendrá que ir a su vez conectada a la red de tierra principal de la subestación.

Para equipo electrónico sensible es recomendable utilizar siempre sistemas de alimentación de C.A sólidamente aterrizados.

El acero estructural debe conectarse a tierra para formar una masa única eléctricamente conductiva. La conexión a tierra puede hacerse por medios estructurales, tales como soldadura, unión, remachado, o por medio de puentes a tierra. Para conectar a tierra el acero de la estructura del edificio se utilizará alguno de los siguientes medios:

1. Por un sistema de electrodo de tierra y puentes de tierra o de unión
2. Por enterramiento directo o por el electrodo del acero de la estructura del edificio ahogado en concreto en las patas de los cimientos.
3. Por sistemas de electrodo con anillo enterrado y puentes de conexión a tierra o a uniones.

En caso de que no se instale una malla especial para altas frecuencias o una hoja de cobre de 0.6096x0.6096 m entonces, lo que se recomienda para la instalación de las cargas electrónicas sensibles es que se le proporcionen un anillo de tierra enterrado, el cual debe ser unido al sistema de la estructura de acero del inmueble y a cualquier sistema de tuberías y sistema eléctrico que lo cruce. Tal unión debe ocurrir siempre en el punto más inmediato a la intersección entre el anillo de tierra y el equipo que se conecte a tierra, para limitar la inductancia de la conexión. El anillo de tierra también debe unirse a los conductores inferiores de los apartarrayos y a cualquier electrodo de tierra.

Todos los equipos mecánicos en las áreas de equipos electrónicos deben conectarse a tierra en forma efectiva por seguridad eléctrica, por protección contra descargas atmosféricas y por el control de ruido. Cuando se localizan en la misma área que el equipo electrónico sensible, el equipo mecánico debe ser unirse a la misma referencia de tierra de alta frecuencia (HF) que el equipo electrónico sensible. Es necesario que los equipos de calefacción, ventilación, acondicionamiento de aire y equipo de enfriamiento del proceso, tuberías de metal y conductores eléctricos relacionados, sean unidos al acero de la estructura local de referencia de señales (SRS: Signal Reference Structure) donde se encuentra instalado el equipo electrónico.

Los servicios y sistemas de C.A. se conectan a tierra por razones de seguridad eléctrica y de seguridad ante incendios, también por razones de comportamiento relacionados con el control de ruido y de las corrientes de descarga. Cuando un sistema de C.A. esta soportando equipo electrónico sensible, lo que se recomienda en la practica es conectar sólidamente a tierra el sistema de C.A. para asegurar así

La existencia de una trayectoria para la corriente de retorno de los filtros LC y de los supresores de onda conectados entre línea y tierra o entre línea y chasis. Se deben utilizar formas de conexión a tierra sólidamente interconectadas de los sistemas de C.A cuando dos sistemas de C.A. alimentan una salida común a través de un arreglo de "switch" de transferencia. La interfaz recomendada para el arreglo de un sistema de CA sólidamente interconectado (con carga en la forma de equipo electrónico sensible) es un transformador de aislamiento localmente instalado y referido (IT) (fig. 14) El IT es la forma de interfaz recomendada cuando dos sistemas de CA no están a la misma referencia de tierra de HF del circuito que alimenta al equipo electrónico sensible

La conexión a tierra en forma aislada TA, se utiliza como un medio posible para reducir el ruido eléctrico del modo común en el circuito en el que se usa. El método de TA sólo se aplica directamente con medios de alambrado cubiertos metálicamente. Los sistemas de alambrado no metálicos están inherentemente contruados como si ellos estuvieran aislados de tierra, ya que no involucran conduits o charolas en la trayectoria del alambrado para ser interconectado al conductor de tierra del circuito CTC (EGC = Earth Grounding Conductor).

No es recomendable el uso de cualquier forma no apropiada de electrodos de tierra, para usarse como un punto de conexión del conductor de tierra del circuito. La necesidad percibida en la mayoría de las instalaciones industriales en nuestro país es un esquema con electrodo de tierra que generalmente es conectado directamente a la tierra y no a una malla, esto no es una buena practica de ingeniería. Los diseños con un electrodo de tierra separado del sistema de tierra favorecen la existencia de diferencias de potencial entre los sistemas de tierra (cuando existe una falla a tierra en uno de los equipos), peligrosas tanto para el personal como para los propios equipos.

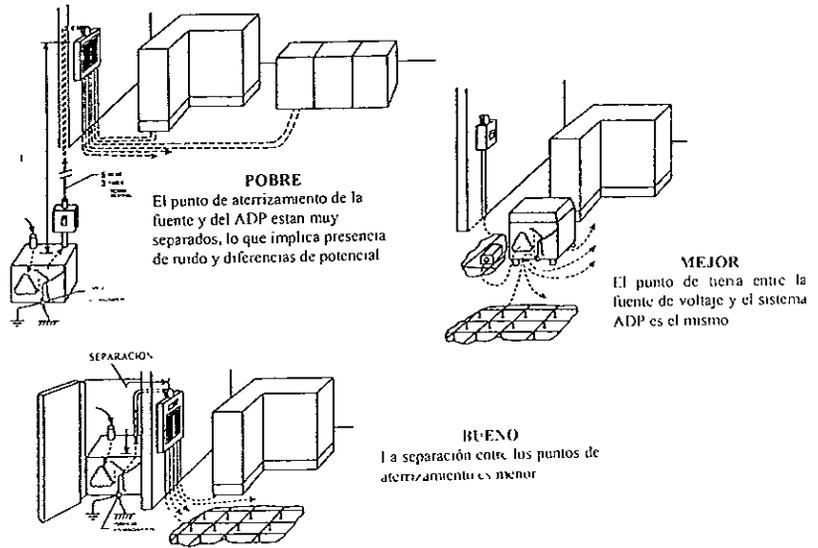


Figura No 14 Diseños para localizar IT tan cerca del equipo sensible como sea posible

VI.5. SISTEMAS DE REFERENCIA A TIERRA PARA SEÑALES DE ALTA FRECUENCIA (HF)

Para proporcionar una buena referencia a tierra de HF a todos los equipos que se encuentran en zonas contiguas, se debe emplear una estructura como señal de referencia (SRS). El SRS se puede construir en forma de una red de señales (SRG: Signal Reference Grid). La conexión a tierra para HF de cables que llevan señales de datos entre áreas no contiguas, se puede realizar por medio de conduits o charolas metálicas para cables eléctricamente continuos, de fondo sólido, o formas similares de construcción. La práctica recomendada para dar una referencia de HF a las cargas electrónicas sensibles no involucra la tierra o algún sistema de electrodo de tierra, excepto por seguridad y control de sobrevoltajes relacionados con las descargas atmosféricas. La tierra y las trayectorias relacionadas con la tierra, no son una parte deseable del sistema de trayectorias para el procesamiento de señales.

VI.6. CARACTERISTICAS GENERALES DE UN SISTEMA DE REFERENCIA DE TIERRA

El uso de una pantalla adecuada o de una hoja sólida de metal es una forma ideal de un SRS, pero esto resulta demasiado caro. Sin embargo, una forma más práctica consiste en el SRG, que es una práctica recomendada para grandes instalaciones de cargas electrónicas sensibles. El SRG se configura según la forma de la estructura metálica que se encuentra sosteniendo los pisos falsos, o mediante una red de alambres o tiras metálicas. Un simple y efectivo SRG se puede hacer atando y acordonando (bolted-stringer) la estructura subterránea de los sistemas de pisos falsos, fig. 15. Los cordones se unen a una distancia de 0.6096 m. La reactancia inductiva de los cordones es generalmente baja.

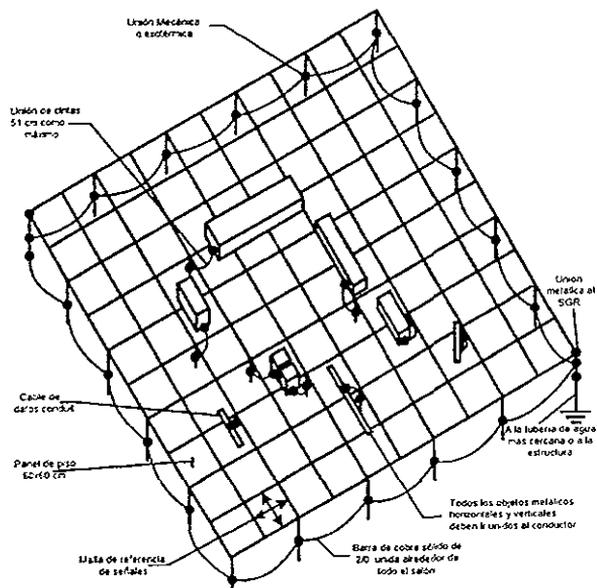
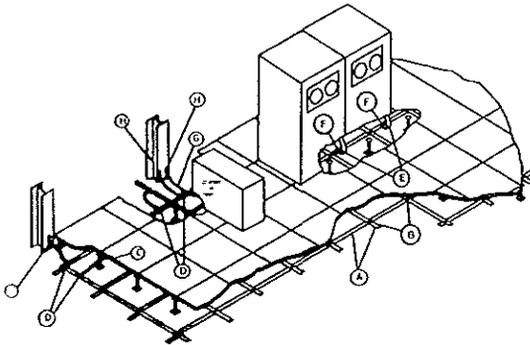


Figura No. 15. Malla de referencia de señales (SGR)

Algunos fabricantes proporcionan un SRG basado en tiras planas de cobre soldadas o sujetadas firmemente en sus uniones, fig. 16. La rejilla se coloca directamente sobre el piso firme que soporta al piso falso. Los cables de potencia y de datos yacen sobre la rejilla. La ventaja de esta geometría es que el acoplamiento de la energía radiada sobre los cables resulta mínima cuando estos están muy cerca del plano de tierra. Por otro lado, entre más alta sea la capacitancia entre los cables y el SRG se incrementa la inmunidad al ruido de los cables protegidos ante campos eléctricos.



- A. Cinta de cobre de 0.025cm x 10 16cm
- B. Conexión soldada
- C. Conexión soldada a pedestal
- D. Conexión soldada a unión
- E. Unión de baja impedancia del equipo
- F. Conexión soldada del equipo a la unión
- G. Conductor del aterrizamiento de la unidad de distribución de potencia
- H. Conexión soldada a la estructura de acero (columna)

Figura No. 16. Malla de referencia de señales fabricada con cintas de cobre

La práctica recomendada por la mayoría de las industrias establece una conexión a tierra en varios puntos del SRG. Esto requiere que todos los objetos metálicos que cruzan el SRG sean conectados a él. Esta recomendación incluye todo el hierro del edificio y otras trayectorias metálicas conductoras que estén a 1.8288 m del SRG.

La peor posibilidad de un sistema de aterrizamiento es tener un punto remoto ya que de esta manera se tendrá una trayectoria bien definida para una corriente de falla, por lo tanto, esa área requerirá un alto grado de protección.

VI.7. RESUMEN DE LAS PRACTICAS RECOMENDADAS PARA SRG's Y SU INSTALACION

1. Seguir los códigos y estándares aplicables para una conexión a tierra segura.
2. Seleccionar un método adecuado para el SRG, asegurando que sea instalado y que se le de mantenimiento en forma correcta.
3. Conectar de manera permanente el SRG a todas las estructuras metálicas del edificio a las que se tenga acceso y a cada trayectoria metálica que cruce el plano, o esté a una distancia de 1.8288 m del SRG.

- 4 Si existe un solo punto de entrada del suministro de potencia, y existen cables de tierra dentro del espacio, entonces se acepta conectar ese punto único de tierra para el área con la estructura metálica del edificio, siempre y cuando este sistema de tierra sea verificado periódicamente por personal calificado. El equipo sensible debe ser conectado a tierra en diversos puntos del SRG.
- 5 Unir el SRG a cada pieza del equipo sensible.
- 6 Las conexiones de unión al SRG deben ser tan cortas como sea posible evitando los pliegues afilados o dobleces.
7. Si se usa más de un conductor de unión, ellos deben ser conectados a patentes separadas del equipo y a puntos separados del SRG.
- 8 Las conexiones del equipo electrónico sensible al SRG no deben ser hechas al conductor exterior de la malla. El equipo de aire acondicionado, ventilación y calefacción, así como los paneles de control pueden ser conectados al conductor exterior de la malla. El equipo crítico se debe localizar y conectar al SRG a una distancia mayor de 1.8288 m de la estructura metálica del edificio o de otras trayectorias potenciales para descargas atmosféricas.
- 9 Todos los sistemas derivados que le dan servicio a equipos localizados en el SRG deben tener su propio punto de conexión a tierra de la potencia conectado al SRG.
- 10 Todos los equipos de enfriamiento, calefacción, ventilación y aire acondicionado, así como las tuberías, tapas metálicas, tableros, interruptores, transformadores y equipo similar dentro del área protegida, deben estar conectados al SRG.
11. No se deben hacer conexiones a puntos de tierra remotos o dedicados ni hacer cualquier intento similar con trayectorias de conexión a tierra separadas.
- 12 Todos los cables de datos y de potencia deben quedar encima o lo más cerca posible al SRG.
- 13 La documentación debe estar completa en todos los detalles, incluyendo la adecuada conexión a tierra y unión de los equipos de aire acondicionado, calefacción, ventilación, tuberías, charolas y artículos similares.

Es importante asegurar que existen conexiones a tierra y de unión de baja impedancia entre los equipos telefónicos y los de datos, los sistemas de tierra para seguridad del sistema eléctrico de potencia, el sistema de electrodo de tierra del edificio. Para cumplir con estas necesidades de aterrizamiento, los equipos de telefonía (datos) deben estar aterrizados lo más cerca posible de la estructura metálica del edificio o bien del sistema de tuberías de agua fría. El suministro de CA/CD a los equipos de telefonía (datos) debe estar localmente aterrizado a través de un puente de baja inductancia.

Un canal galvanizado construido como barra o bus de tierra es generalmente recomendado como un soporte mecánico para asegurar los dispositivos en su lugar. Si este canal es instalado adecuadamente nos proporcionará una buena barra de tierra para HF, y además, un punto de conexión para conduits, tuberías o dispositivos similares que requieran ser unidos el uno al otro.

El uso de conductores de tierra no aislados (desnudos) de ninguna manera es recomendable, excepto cuando es usado para puentes a tierra cortos, puentes de unión, y conexiones similares que no se encuentren dentro de algún conduit o charola. La aplicación de conductores no aislados (desnudos) dentro de un ducto o charola metálica puede provocar condiciones no deseadas, como las siguientes:

- 1 Arqueros destructivos localizados entre el conductor no aislado y los conduits/charolas metálicos, a lo largo de la trayectoria del conductor no aislado, esto durante una falla a tierra o condiciones de sobrevoltajes transitorios que dañan otros conductores no aislados.
- 2 La generación de niveles bajos de corriente de HF (ruido eléctrico) debido al contacto intermitente con los conduits y/o charolas metálicos.

VI.8. RESISTENCIA A TIERRA

La resistencia a tierra (R_T) puede ser calculada y medida. Para realizar el cálculo se empleará la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2.943L}{D} \quad (43)$$

Donde:

L = Longitud de una varilla (3 m)

D = Diámetro de una varilla (0.016 m = 5/8")

Utilizando electrodos múltiples en paralelo se tendrá mejor resistencia a tierra que un solo conductor, comúnmente se utilizan varillas múltiples para tener una resistencia a tierra baja en instalaciones de alta capacidad. Existe una regla para sistemas de 2 a 24 varillas separadas entre ellas la longitud de una.

$$R_T = \frac{R}{n} F_M \quad (44)$$

Donde

R = Resistencia a tierra de una varilla en Ω

N = Número de varillas en paralelo.

F_M = Factor de multiplicidad (IEEE Std. 142-1991)

TABLA No. 5 Factor de Multiplicacion para Varillas Multiples

Número de Varillas	F_M
2	1.16
3	1.29
4	1.36
5	1.44
6	1.52
7	1.60
8	1.71
9	1.74
10	1.80
12	1.92
16	2.00
20	2.16

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

El análisis realizado en este trabajo da un panorama amplio para afirmar que el estudio del sistema de tierras y corto circuito es muy importante en un sistema eléctrico, ya que nos ayuda a lograr una mayor continuidad en el servicio

La protección contra sobretensiones tanto en las subestaciones eléctricas, como en áreas de producción, será mediante una red de tierras adecuada, para proporcionar un circuito de muy baja impedancia para la circulación de las corrientes debidas por una falla y evitar que durante la circulación de estas corrientes puedan producirse diferencias de potencial entre distintos puntos del sistema que puedan ser peligrosos para el personal, por lo tanto, el principio fundamental de la protección contra fallas a tierra es el de proporcionar el medio adecuado para cuando ocurra una falla, esta pueda incidir con seguridad sobre un elemento adecuado y sea conducida en forma inofensiva hasta un medio de dispersión enterrado bajo el nivel de piso terminado, de manera que no origine o cause daños al personal y equipo, durante un recorrido y sea origen de otras fallas en el sistema

El diseño de una red de tierras se considera, por lo general, una tarea fácil, sin embargo, es un problema complejo si se incluyen en forma realista todos los factores que determinan su comportamiento. Por ejemplo, la consideración de la resistividad del suelo debido a las grandes variaciones de la composición del terreno, los cambios durante las estaciones del año y su estructura transversal y longitudinal plantean la necesidad de definir la metodología de medición y de interpretación para considerarla parámetro de diseño.

Por consiguiente, en los últimos años se han realizado gran cantidad de trabajos de investigación, que por medio del planteamiento de diversas teorías han llegado al desarrollo de procedimientos de cálculo de redes de tierra. Estas nuevas tendencias en el diseño, generalmente utilizan la computadora digital como herramienta de trabajo, ya que las expresiones aplicables, dada su complejidad, no permiten cálculos manuales.

Como se describió en los capítulos anteriores, una conexión a tierra adecuada es esencial para un comportamiento satisfactorio y seguro del sistema eléctrico de potencia. Se recuerda que los tres requisitos básicos para la conexión a tierra son proporcionar una trayectoria de baja impedancia a tierra para el retorno de las corrientes de falla, mantener una baja diferencia de potencial entre las partes metálicas expuestas para minimizar el peligro al personal, y control de sobretensiones.

La conexión a tierra de equipo sensible, como el equipo utilizado en la tecnología informática, involucra otro aspecto, y a que este tipo de equipos, por su diseño, se comunica con otros equipos por medio de líneas de datos. Con frecuencia estas líneas de datos llevan sus propios conductores de referencia cero que pueden o no estar unidos a la tierra de seguridad del equipo. Por lo que puede haber una trayectoria común entre los circuitos de señales y los circuitos de potencia que den lugar a problemas de acoplamiento de ruido.

Se recomienda que para la alimentación de equipo sensible siempre se utilicen sistemas de corriente alterna solidamente aterrizados. Todas las partes metálicas de equipo como envolturas, conduits, charolas y conductores de tierra del equipo junto con los electrodos del sistema de tierras estén unidos sólidamente para formar un sistema de conducción electricamente continuo

Es importante que todos los sistemas de tierras de un edificio (subestacion, equipo electrónico, etc) donde exista una separación entre ellos de menos de 1.83 m, se deberán de unir

Otro de los propósitos fundamentales de este trabajo es dar a conocer un consenso de Normas para la aplicacion en el estudio del diseño de tierras para subestaciones eléctricas, así como la conexión a tierra de equipo eléctrico y electrónico (sensible)

La guía IEEE Std 80-1986 presenta los aspectos esenciales de la seguridad mediante un diseño adecuado de la red de tierras de una subestación eléctrica en exterior, ya sea convencional o encapsulada (aislada con SF₆), dando las ecuaciones y criterios básicos para dicho diseño

La Norma IEEE Std. 1100-1992 proporciona prácticas recomendables para el diseño, instalación y mantenimiento para la potencia eléctrica y el aterrizamiento de equipo electrónico sensible utilizado en aplicaciones comerciales e industriales

La guía IEEE Std 81-1983 describe las técnicas recientes en cuanto a medición de resistencia a tierra, gradientes de potencial, resistividad del terreno y la predicción de magnitudes de resistencia a tierra y gradientes de potencial de resistencia a tierra, así como también, proporciona los factores que influyen en la selección de equipos de medición, así como las diferentes técnicas de medición

APENDICE A

VALORES DE IMPEDANCIA DE SECUENCIA CERO PARA CABLES DE ENERGIA AISLADOS

EPR. Un conductor con pantalla metálica, 5 kV.
Espesor de aislamiento: 2.29mm (0.09015 pulgadas).
Pantalla metálica de alambres de cobre, 22 AWG,
diámetro nominal de 1 alambre: 0.02535 pulgadas.
Configuración plana.

Calibre AWG KCM	Zoo pantalla metálica/tierra ohms/km	Zoo pantalla metálica ohms/km	Zoo tierra ohms/km
8	3 2218 + j 2 1060	14 0492 + j 0.1123	2 8574 + j 2 2385
6	2 2589 + j 2 0779	12.4471 + j 0.0990	1.8774 + j 2 2210
4	1.6658 + j 2 0359	10.6438 + j 0 0902	1 2474 + j 2 2035
2	1 3663 + j 1.9887	9 1671 + j 0 0819	0 8474 + j 2 1861
1/0	1 1116 + j 1 9240	7 7474 + j 0.0728	0.5994 + j 2.1659
2/0	1.0461 + j 1 8956	7.2488 + j 0.0687	0.5124 + j 2 1574
3/0	1.0043 + j 1.8599	6.6977 + j 0.0653	0.4434 + j 2.1485
4/0	0.9818 + j 1.8160	6 1156 + j 0 0630	0 3884 + j 2 1398
250	0.9741 + j 1 7794	5 7185 + j 0 0599	0.3564 + j 2.1319
300	0.9728 + j 1 7354	5 2824 + j 0.0588	0 3264 + j 2 1250
350	0 9648 + j 1.7115	5.0853 + j 0 0555	0 3054 + j 2 1192
400	0 9690 + j 1.6759	4 7984 + j 0 0547	0 2891 + j 2 1141
500	0 9752 + j 1.6232	4 4321 + j 0.0521	0 2682 + j 2.1058
600	0.9892 + j 1.5597	4.0479 + j 0.0511	0.2527 + j 2 0980
750	0.9993 + j 1.4978	3.7318 + j 0.0484	0.2387 + j 2 0894
1000	1.0217 + j 1.4092	3 3546 + j 0.0450	0 2330 + j 2.0779

EPR. Un conductor con pantalla metálica, 5 kV.
Espesor de aislamiento : 2.29 mm (0.09015 pulgadas)
Pantalla metálica de alambres de cobre,
diámetro nominal de 1 alambre: 0.02535 pulgadas.
Configuración trébol.

Calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
8	3.3801 + j 2 4799	14 0492 + j 0.1123	2 8574 + j 2.6747
6	2 4198 + j 2.4373	12.4471 + j 0.0990	1 8774 + j 2.6466
4	1 8366 + j 2 3743	10 6438 + j 0 0902	1.2474 + j 2 6192
2	1.4850 + j 2 3013	9 1671 + j 0 0819	0.8474 + j 2 5881
1/0	1 2989 + j 2 2030	7.7474 + j 0.0728	0.5994 + j 2 5513
2/0	1 2355 + j 2 1602	7.2488 + j 0.0687	0 5124 + j 2 5352
3/0	1 1922 + j 2 1021	6 6977 + j 0.0653	0 4434 + j 2.5104
4/0	1 1717 + j 2 0374	6 1156 + j 0 0630	0.3884 + j 2 4920
250	1.1645 + j 1 9848	5.7185 + j 0 0599	0.3564 + j 2 4765
300	1 1631 + j 1.9219	5.2824 + j 0.0588	0.3264 + j 2 4608
350	1 1530 + j 1 8878	5.0853 + j 0.0555	0 3054 + j 2.4481
400	1.1567 + j 1 8388	4 7984 + j 0 0547	0 2891 + j 2.4377
500	1 1558 + j 1 7641	4 4321 + j 0 0521	0 2682 + j 2.4124
600	1.1657 + j 1 6800	4 0479 + j 0.0511	0 2527 + j 2 3966
750	1 1692 + j 1.5999	3.7318 + j 0.0484	0.2387 + j 2 3773
1000	1.1806 + j 1 4871	3.3546 + j 0.0450	0.2330 + j 2 3512

XLPE, EPR. Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento, 8 kV.
Espesor de aislamiento: 2.92 mm (0.115 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG,
diámetro nominal de 1 alambre: 0.02535 pulgadas.
configuración plana.

calibre AWG kCM	Z_{00} Pantalla metálica/tierra Ohms / km	Z_{00} Pantalla metálica Ohms / km	Z_{00} Tierra Ohms / km
6	2 2922 + j 2 0559	11.3797 + j 0.1069	1.8774 + j 2.2210
4	1.6975 + j 2.0129	9.7874 + j 0.0973	1.2474 + j 2.2035
2	1.3360 + j 1.9647	8 4857 + j 0.0882	0.8474 + j 2.1861
1/0	1.1386 + j 1.8989	7.2353 + j 0 0783	0.5994 + j 2.1659
2/0	1.0719 + j 1.8702	6.7908 + j 0.0738	0.5124 + j 2.1574
3/0	1 0286 + j 1 8339	6.2995 + j 0.0701	0.4434 + j 2.1485
4/0	1.0042 + j 1.7896	5 7783 + j 0 0674	0.3884 + j 2 1398
250	0.9950 + j 1.7528	5.4206 + j 0 0641	0 3564 + j 2.1319
300	0.9919 + j 1.7086	5 0256 + j 0.0626	0.3264 + j 2 1250
350	0 9830 + j 1.6846	4.8453 + j 0.0593	0.3054 + j 2.1192
400	0 9858 + j 1.6491	4.5834 + j 0 0582	0 2891 + j 2.1141
500	0.9900 + j 1.5964	4 2470 + j 0.0554	0.2682 + j 2 1058
600	1.0017 + j 1 5332	3.8923 + j 0.0541	0 2527 + j 2.0980
750	1.0096 + j 1.4717	3 5985 + j 0 0512	0 2387 + j 2.0894
1000	1 0293 + j 1 3840	3.2466 + j 0.0475	0.2330 + j 2 0779

XLPE, EPR. Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento, 8 kV.
Espesor de aislamiento: 2.92 mm (0.115 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG,
diámetro nominal de 1 alambre: 0.02535 pulgadas.
configuración trébol.

Calibre AWG kCM	Z_{00} Pantalla metálica/tierra Ohms / km	Z_{00} Pantalla metálica Ohms / km	Z_{00} Tierra Ohms / km
6	2.4606 + j 2 3938	11.3797 + j 0.1069	1.8774 + j 2.6343
4	1 8742 + j 2.3306	9.7874 + j 0.0973	1 2474 + j 2.6077
2	1 5192 + j 2 2578	8 4857 + j 0 0882	0.8474 + j 2 5776
1/0	1 3285 + j 2.1599	7.2353 + j 0 0783	0 5994 + j 2.5418
2/0	1.2594 + j 2 1130	6 7908 + j 0 0738	0.5124 + j 2.5193
3/0	1 2176 + j 2.0601	6.2995 + j 0.0701	0.4434 + j 2 5023
4/0	1 1943 + j 1.9960	5.7783 + j 0.0674	0 3884 + j 2.4843
250	1 1849 + j 1.9440	5.4206 + j 0.0641	0 3564 + j 2.4692
300	1 1809 + j 1.8817	5.0256 + j 0.0626	0.3264 + j 2 4539
350	1 1696 + j 1.8482	4.8453 + j 0.0593	0.3054 + j 2.4415
400	1.1713 + j 1 7999	4 5834 + j 0.0582	0 2891 + j 2.4314
500	1.1680 + j 1.7266	4.2470 + j 0.0554	0 2682 + j 2.4077
600	1.1750 + j 1.6439	3 8923 + j 0.0541	0.2527 + j 2 3912
750	1.1760 + j 1.5649	3.5985 + j 0.0512	0.2387 + j 2.3723
1000	1 1813 + j 1 4538	3.2466 + j 0.0475	0.2330 + j 2.3413

XLPE, EPR. Un conductor con pantalla metálica; 133% nivel de aislamiento, 8 kV.
Espesor de aislamiento: 3.56 mm (0.14015 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG,
diámetro nominal de 1 alambre: 0.02535 pulgadas.
configuración plana.

Calibre AWG kCM	Z_{00}		Z_{00} Tierra Ohms / km
	Pantalla metálica/tierra Ohms / km	Pantalla metálica Ohms / km	
6	2 3478 + j 2.0145	9.9233 + j 0.1192	1.8774 + j 2.2210
4	1 7501 + j 1 9700	8.5882 + j 0 1085	1 2474 + j 2 2035
2	1 3747 + j 1 9305	7.7041 + j 0 0961	0 8474 + j 2.1861
1/0	1 1735 + j 1.8634	6.6336 + j 0.0853	0.5994 + j 2.1659
2/0	1.1144 + j 1.8237	6.1088 + j 0 0823	0.5124 + j 2.1574
3/0	1.0684 + j 1.7869	5.6996 + j 0.0780	0.4434 + j 2 1485
4/0	1.0330 + j 1.7527	5.3700 + j 0.0732	0.3884 + j 2.1398
250	1 0290 + j 1.7050	4 9619 + j 0.0710	0 3564 + j 2.1319
300	1.0161 + j 1.6714	4.7094 + j 0.0677	0.3264 + j 2.1250
350	1.0123 + j 1.6367	4.4705 + j 0.0655	0.3054 + j 2.1192
400	1.0127 + j 1.6012	4.2452 + j 0.0642	0.2891 + j 2.1141
500	1.0135 + j 1.5489	3.9532 + j 0.0610	0.2682 + j 2 1058
600	1.0252 + j 1.4761	3 5919 + j 0.0603	0.2527 + j 2.0980
750	1 0289 + j 1.4158	3 3391 + j 0.0570	0.2387 + j 2.0894
1000	1.0430 + j 1.3304	3.0339 + j 0.0527	0.2330 + j 2.0779

XLPE, EPR. Un conductor con pantalla metálica; 133% nivel de aislamiento, 8 kV.
Espesor de aislamiento: 3.56 mm (0.14015 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG,
diámetro nominal de 1 alambre: 0.02535 pulgadas.
configuración trébol.

Calibre AWG kCM	Z_{00}		Z_{00} Tierra Ohms / km
	Pantalla metálica/tierra Ohms / km	Pantalla metálica Ohms / km	
6	2 5293 + j 2 3210	9.9233 + j 0.1192	1.8774 + j 2.6208
4	1.9366 + j 2 2558	8.5882 + j 0.1085	1.2474 + j 2 5929
2	1.5623 + j 2.1979	7.7041 + j 0.0961	0.8474 + j 2.5639
1/0	1 3627 + j 2.0976	6.6336 + j 0.0853	0.5994 + j 2.5245
2/0	1 3052 + j 2 0402	6.1088 + j 0.0823	0 5124 + j 2.5080
3/0	1.2593 + j 1.9879	5.6996 + j 0.0780	0.4434 + j 2.4916
4/0	1.2230 + j 1 9401	5.3700 + j 0 0732	0.3884 + j 2.4756
250	1.2181 + j 1.8737	4 9619 + j 0.0710	0.3564 + j 2.4595
300	1.2033 + j 1.8277	4 7094 + j 0.0677	0.3264 + j 2 4461
350	1 1972 + j 1.7807	4.4705 + j 0.0655	0.3054 + j 2.4340
400	1 1922 + j 1.7313	4 2452 + j 0.0642	0.2891 + j 2.4182
500	1.1882 + j 1 6626	3.9532 + j 0 0610	0.2682 + j 2.4011
600	1.1926 + j 1.5688	3.5919 + j 0.0603	0 2527 + j 2.3829
750	1.1887 + j 1 4931	3.3391 + j 0.0570	0.2387 + j 2.3646
1000	1.1880 + j 1.3873	3.0339 + j 0.0527	0.2330 + j 2.3345

XLPE, EPR. Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento, 15 kV.
Espesor de aislamiento: 4.45 mm (0.175 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG,
diámetro nominal de 1 alambre: 0.02535 pulgadas.
configuración plana.

Calibre AWG kCM	Z_{00}	Z_{00}	Z_{00}
	Pantalla metálica/tierra Ohms / km	Pantalla metálica Ohms / km	Tierra Ohms / km
4	1.7828 + j 1.9401	7.9518 + j 0.1151	1.2474 + j 2.2035
2	1.4008 + j 1.9051	7.2306 + j 0.1014	0.8474 + j 2.1861
1/0	1.1970 + j 1.8372	6.2614 + j 0.0899	0.5994 + j 2.1659
2/0	1.1277 + j 1.8078	5.9098 + j 0.0849	0.5124 + j 2.1574
3/0	1.0809 + j 1.7709	5.5231 + j 0.0805	0.4434 + j 2.1485
4/0	1.0521 + j 1.7259	5.1106 + j 0.0770	0.3884 + j 2.1398
250	1.0395 + j 1.6888	4.8245 + j 0.0732	0.3564 + j 2.1319
300	1.0322 + j 1.6445	4.5055 + j 0.0711	0.3264 + j 2.1250
350	1.0214 + j 1.6206	4.3570 + j 0.0675	0.3054 + j 2.1192
400	1.0210 + j 1.5851	4.1422 + j 0.0661	0.2891 + j 2.1141
500	1.0207 + j 1.5330	3.8632 + j 0.0627	0.2682 + j 2.1058
600	1.0272 + j 1.4709	3.5661 + j 0.0609	0.2527 + j 2.0980
750	1.0305 + j 1.4107	3.3167 + j 0.0575	0.2387 + j 2.0894
1000	1.0441 + j 1.3254	3.0154 + j 0.0532	0.2330 + j 2.0779

XLPE, EPR. Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento, 15 kV.
Espesor de aislamiento: 4.45 mm (0.175 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG,
diámetro nominal de 1 alambre: 0.02535 pulgadas.
configuración trébol.

Calibre AWG kCM	Z_{00}	Z_{00}	Z_{00}
	Pantalla metálica/tierra Ohms / km	Pantalla metálica Ohms / km	Tierra Ohms / km
4	1.9670 + j 2.1968	7.9518 + j 0.1151	1.2474 + j 2.5705
2	1.5869 + j 2.1507	7.2306 + j 0.1014	0.8474 + j 2.5480
1/0	1.3813 + j 2.0548	6.2566 + j 0.0899	0.5946 + j 2.5150
2/0	1.3168 + j 2.0136	5.9098 + j 0.0849	0.5124 + j 2.5004
3/0	1.2698 + j 1.9618	5.5231 + j 0.0805	0.4434 + j 2.4843
4/0	1.2401 + j 1.8993	5.1106 + j 0.0770	0.3884 + j 2.4674
250	1.2260 + j 1.8488	4.8245 + j 0.0732	0.3564 + j 2.4530
300	1.2134 + j 1.7866	4.5055 + j 0.0711	0.3264 + j 2.4338
350	1.1998 + j 1.7546	4.3570 + j 0.0675	0.3054 + j 2.4222
400	1.1974 + j 1.7082	4.1422 + j 0.0661	0.2891 + j 2.4126
500	1.1915 + j 1.6401	3.8632 + j 0.0627	0.2682 + j 2.3947
600	1.1921 + j 1.5610	3.5661 + j 0.0609	0.2527 + j 2.3790
750	1.1879 + j 1.4858	3.3167 + j 0.0575	0.2387 + j 2.3608
1000	1.1852 + j 1.3802	3.0154 + j 0.0532	0.2330 + j 2.3280

XLPE, EPR. Un conductor con pantalla metálica; 133% nivel de aislamiento, 15 kV.
Espesor de aislamiento: 5.46 mm (0.215 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG,
diámetro nominal de 1 alambre: 0.02535 pulgadas.
configuración plana.

Calibre AWG kCM	Z_{00}	Z_{00}	Z_{00}
	Pantalla metálica/tierra Ohms / km	Pantalla metálica Ohms / km	Tierra Ohms / km
1/0	1.2316 + j 1.7951	5.7533 + j 0.0968	0 5994 + j 2.1659
2/0	1.1605 + j 1.7655	5.4449 + j 0.0915	0 5124 + j 2.1574
3/0	1.1115 + j 1.7283	5.1077 + j 0.0867	0.4434 + j 2.1485
4/0	1.0800 + j 1.6832	4.7479 + j 0.0828	0 3884 + j 2.1398
250	1 0653 + j 1 6461	4.4972 + j 0.0787	0.3564 + j 2.1319
300	1 0553 + j 1 6019	4.2164 + j 0.0763	0.3264 + j 2 1250
350	1 0432 + j 1.5781	4.0840 + j 0.0725	0.3054 + j 2 1192
400	1.0409 + j 1.5430	3.8935 + j 0 0709	0 2891 + j 2.1141
500	1.0379 + j 1.4914	3.6444 + j 0.0672	0 2682 + j 2.1058
600	1 0411 + j 1.4302	3 3780 + j 0.0650	0.2527 + j 2.0980
750	1.0416 + j 1.3710	3.1525 + j 0.0614	0.2387 + j 2 0894
1000	1.0515 + j 1 2876	2.8790 + j 0 0567	0.2330 + j 2.0779

XLPE, EPR. Un conductor con pantalla metálica; 133% nivel de aislamiento, 15 kV.
Espesor de aislamiento: 5.46 mm (0.215 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG,
diámetro nominal de 1 alambre: 0.02535 pulgadas.
configuración trébol.

Calibre AWG kCM	Z_{00}	Z_{00}	Z_{00}
	Pantalla metálica/tierra Ohms / km	Pantalla metálica Ohms / km	Tierra Ohms / km
1/0	1.4204 + j 1 9895	5 7533 + j 0.0968	0 5994 + j 2.5031
2/0	1.3487 + j 1.9489	5.4449 + j 0.0915	0.5124 + j 2.4890
3/0	1.2985 + j 1.8981	5.1077 + j 0.0867	0.4434 + j 2.4735
4/0	1 2651 + j 1.8368	4.7479 + j 0.0828	0.3884 + j 2 4571
250	1 2453 + j 1.7855	4.4972 + j 0.0787	0 3564 + j 2.4384
300	1 2323 + j 1 7272	4 2164 + j 0.0763	0 3264 + j 2.4247
350	1.2172 + j 1 6960	4.0840 + j 0.0725	0.3054 + j 2.4134
400	1 2123 + j 1.6509	3.8935 + j 0.0709	0.2891 + j 2 4041
500	1 2032 + j 1.5848	3.6444 + j 0.0672	0.2682 + j 2 3867
600	1.2001 + j 1 5083	3.3780 + j 0.0650	0.2527 + j 2 3713
750	1.1899 + j 1 4346	3.1525 + j 0.0614	0.2387 + j 2 3485
1000	1.1866 + j 1.3341	2 8790 + j 0.0567	0.2330 + j 2 3217

XLPE, EPR. Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento, 25 kV.
Espesor de aislamiento: 6.6 mm (0.260 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG,
diámetro nominal de 1 alambre: 0.02535 pulgadas.
configuración plana.

Calibre AWG kCM	Z_{00}		
	Pantalla metálica/tierra Ohms / km	Pantalla metálica Ohms / km	Tierra Ohms / km
1/0	1.3065 + j 1.6831	4.7621 + j 0.1123	0.5994 + j 2.1659
2/0	1.2313 + j 1.6534	4.5273 + j 0.1064	0.5124 + j 2.1574
3/0	1.1966 + j 1.5742	4.0297 + j 0.1057	0.4434 + j 2.1485
4/0	1.1563 + j 1.5300	3.7879 + j 0.1008	0.3884 + j 2.1398
250	1.1347 + j 1.4940	3.6185 + j 0.0959	0.3564 + j 2.1319
300	1.1165 + j 1.4516	3.4275 + j 0.0926	0.3264 + j 2.1250
350	1.1007 + j 1.4288	3.3338 + j 0.0884	0.3054 + j 2.1192
400	1.0921 + j 1.3955	3.2021 + j 0.0861	0.2891 + j 2.1141
500	1.0806 + j 1.3469	3.0271 + j 0.0816	0.2682 + j 2.1058
600	1.0742 + j 1.2901	2.8382 + j 0.0785	0.2527 + j 2.0980
750	1.0692 + j 1.2006	2.5677 + j 0.0772	0.2387 + j 2.0894
1000	1.0657 + j 1.1265	2.3830 + j 0.0713	0.2330 + j 2.0779

XLPE, EPR. Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento, 25 kV.
Espesor de aislamiento: 6.6 mm (0.260 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG,
diámetro nominal de 1 alambre: 0.02535 pulgadas.
configuración trébol.

calibre AWG KCM	Z_{00}		
	Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Pantalla metálica Ohms/km	Tierra Ohms/km
1/0	1.4974 + j 1.8312	4.7621 + j 0.1123	0.5994 + j 2.4908
2/0	1.4199 + j 1.7923	4.5273 + j 0.1064	0.5124 + j 2.4772
3/0	1.3791 + j 1.6872	4.0297 + j 0.1057	0.4434 + j 2.4573
4/0	1.3340 + j 1.6308	3.7879 + j 0.1008	0.3884 + j 2.4417
250	1.3083 + j 1.5856	3.6185 + j 0.0959	0.3564 + j 2.4283
300	1.2849 + j 1.5324	3.4275 + j 0.0926	0.3264 + j 2.4150
350	1.2652 + j 1.5042	3.3338 + j 0.0884	0.3054 + j 2.4040
400	1.2526 + j 1.4634	3.2021 + j 0.0861	0.2891 + j 2.3950
500	1.2336 + j 1.4044	3.0271 + j 0.0816	0.2682 + j 2.3781
600	1.2166 + j 1.3356	2.8382 + j 0.0785	0.2527 + j 2.3580
750	1.1984 + j 1.2305	2.5677 + j 0.0772	0.2387 + j 2.3378
1000	1.1831 + j 1.1461	2.3830 + j 0.0713	0.2330 + j 2.3150

XLPE, EPR. Un conductor con pantalla metálica; 133% nivel de aislamiento, 25 kV.
Espesor de aislamiento: 8.76 mm (0.345 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG,
diámetro nominal de 1 alambre: 0.02535 pulgadas.
configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	1 3212 + j 1.6565	4.5782 + j 0.1156	0.5994 + j 2.1659
2/0	1.2451 + j 1.6268	4.3554 + j 0.1096	0.5124 + j 2.1574
3/0	1.1895 + j 1.5899	4.1184 + j 0.1039	0.4434 + j 2.1485
4/0	1.1500 + j 1.5456	3.8679 + j 0.0991	0.3884 + j 2.1398
250	1 1291 + j 1.5094	3 6925 + j 0.0943	0.3564 + j 2.1319
300	1.1117 + j 1.4667	3.4946 + j 0.0910	0.3264 + j 2 1250
350	1.0962 + j 1 4438	3.3979 + j 0.0869	0 3054 + j 2 1192
400	1 0882 + j 1.4103	3.2617 + j 0.0846	0.2891 + j 2.1141
500	1.0775 + j 1.3613	3.0809 + j 0 0803	0.2682 + j 2.1058
600	1.0719 + j 1.3040	2.8857 + j 0.0772	0 2527 + j 2.0980
750	1 0647 + j 1.2489	2.7170 + j 0.0728	0.2387 + j 2.0894
1000	1.0646 + j 1.1719	2.5113 + j 0.0673	0.2330 + j 2.0779

XLPE, EPR. Un conductor con pantalla metálica; 133% nivel de aislamiento, 25 kV.
Espesor de aislamiento: 8.76 mm (0.345 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG,
diámetro nominal de 1 alambre: 0.02535 pulgadas.
configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	1.4979 + j 1.7859	4.5782 + j 0.1156	0.5994 + j 2.4656
2/0	1.4196 + j 1 7482	4.3554 + j 0.1096	0.5124 + j 2.4527
3/0	1 3610 + j 1.7013	4.1184 + j 0.1039	0.4434 + j 2.4385
4/0	1.3175 + j 1.6452	3.8679 + j 0.0991	0 3884 + j 2 4237
250	1 2931 + j 1 6002	3 6925 + j 0.0943	0.3564 + j 2.4109
300	1 2711 + j 1.5472	3.4946 + j 0 0910	0.3264 + j 2.3983
350	1 2491 + j 1.5178	3.3979 + j 0.0869	0 3054 + j 2 3825
400	1.2377 + j 1.4771	3.2617 + j 0.0846	0 2891 + j 2 3740
500	1.2186 + j 1.4176	3 0809 + j 0.0803	0.2682 + j 2.3550
600	1 2063 + j 1.3497	2.8857 + j 0.0772	0.2527 + j 2.3411
750	1.1915 + j 1.2855	2.7170 + j 0.0728	0 2387 + j 2 3250
1000	1.1805 + j 1.1972	2.5113 + j 0.0673	0.2330 + j 2.3030

XLPE, EPR. Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento, 35 kV.
Espesor de aislamiento: 8.76 mm (0.345 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG,
diámetro nominal de 1 alambre: 0.02535 pulgadas.
configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	1.3212 + j 1.6565	4.5782 + j 0.1156	0.5994 + j 2.1659
2/0	1.2451 + j 1.6268	4.3554 + j 0.1096	0.5124 + j 2.1574
3/0	1.1895 + j 1.5899	4.1184 + j 0.1039	0.4434 + j 2.1485
4/0	1.1500 + j 1.5456	3.8679 + j 0.0991	0.3884 + j 2.1398
250	1.1291 + j 1.5094	3.6925 + j 0.0943	0.3564 + j 2.1319
300	1.1117 + j 1.4667	3.4946 + j 0.0910	0.3264 + j 2.1250
350	1.0962 + j 1.4438	3.3979 + j 0.0869	0.3054 + j 2.1192
400	1.0882 + j 1.4103	3.2617 + j 0.0846	0.2891 + j 2.1141
500	1.0775 + j 1.3613	3.0809 + j 0.0803	0.2682 + j 2.1058
600	1.0719 + j 1.3040	2.8857 + j 0.0772	0.2527 + j 2.0980
750	1.0647 + j 1.2489	2.7170 + j 0.0728	0.2387 + j 2.0894
1000	1.0646 + j 1.1719	2.5113 + j 0.0673	0.2330 + j 2.0779

XLPE, EPR. Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento, 35 kV.
Espesor de aislamiento: 8.76 mm (0.345 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG,
diámetro nominal de 1 alambre: 0.02535 pulgadas.
configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	1.4979 + j 1.7859	4.5782 + j 0.1156	0.5994 + j 2.4656
2/0	1.4196 + j 1.7482	4.3554 + j 0.1096	0.5124 + j 2.4527
3/0	1.3610 + j 1.7013	4.1184 + j 0.1039	0.4434 + j 2.4385
4/0	1.3175 + j 1.6452	3.8679 + j 0.0991	0.3884 + j 2.4237
250	1.2931 + j 1.6002	3.6925 + j 0.0943	0.3564 + j 2.4109
300	1.2711 + j 1.5472	3.4946 + j 0.0910	0.3264 + j 2.3983
350	1.2491 + j 1.5178	3.3979 + j 0.0869	0.3054 + j 2.3825
400	1.2377 + j 1.4771	3.2617 + j 0.0846	0.2891 + j 2.3740
500	1.2186 + j 1.4176	3.0809 + j 0.0803	0.2682 + j 2.3550
600	1.2063 + j 1.3497	2.8857 + j 0.0772	0.2527 + j 2.3411
750	1.1915 + j 1.2855	2.7170 + j 0.0728	0.2387 + j 2.3250
1000	1.1805 + j 1.1972	2.5113 + j 0.0673	0.2330 + j 2.3030

XLPE, EPR. Un conductor con pantalla metálica; 133% nivel de aislamiento, 35 kV.
Espesor de aislamiento: 10.67 mm (0.420 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG,
diámetro nominal de 1 alambre: 0.02535 pulgadas.
configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	1 3586 + j 1.5774	4.1092 + j 0 1246	0.5994 + j 2.1659
2/0	1.2800 + j 1.5482	3.9150 + j 0 1183	0.5124 + j 2.1574
3/0	1 2212 + j 1.5120	3.7122 + j 0.1123	0.4434 + j 2 1485
4/0	1.1778 + j 1.4688	3.4999 + j 0.1071	0 3884 + j 2 1398
250	1.1539 + j 1.4336	3.3514 + j 0.1020	0.3564 + j 2.1319
300	1.1329 + j 1.3923	3.1839 + j 0.0984	0.3264 + j 2.1250
350	1 1157 + j 1.3701	3.1005 + j 0.0941	0.3054 + j 2 1192
400	1 1050 + j 1.3378	2 9847 + j 0.0916	0.2891 + j 2.1141
500	1.0907 + j 1 2900	2.8302 + j 0 0861	0 2682 + j 2.1050
600	1.0810 + j 1.2360	2.6632 + j 0.0834	0.2527 + j 2.0980
750	1 0703 + j 1.1836	2 5175 + j 0 0787	0.2387 + j 2.0894
1000	1 0656 + j 1 1105	2.3396 + j 0.0727	0.2330 + j 2 0779

XLPE, EPR. Un conductor con pantalla metálica; 133% nivel de aislamiento, 35 kV.
Espesor de aislamiento: 10.67 mm (0.420 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG,
diámetro nominal de 1 alambre: 0.02535 pulgadas.
configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	1.5262 + j 1.6786	4.1092 + j 0.1246	0.5994 + j 2.4498
2/0	1.4449 + j 1.6428	3.9150 + j 0.1183	0.5124 + j 2.4373
3/0	1 3825 + j 1 5983	3 7122 + j 0.1123	0.4434 + j 2.4237
4/0	1.3345 + j 1.5453	3.4999 + j 0.1071	0.3884 + j 2 4094
250	1 3038 + j 1.5017	3.3514 + j 0.1020	0 3564 + j 2 3919
300	1 2780 + j 1 4520	3.1839 + j 0.0984	0.3264 + j 2 3799
350	1.2557 + j 1.4251	3.1005 + j 0 0941	0.3054 + j 2.3668
400	1.2415 + j 1.3871	2.9847 + j 0.0916	0 2891 + j 2 3586
500	1 2207 + j 1.3320	2.8302 + j 0.0861	0 2682 + j 2 3435
600	1.2042 + j 1 2687	2.6632 + j 0 0834	0.2527 + j 2.3300
750	1.1862 + j 1.12089	2.5175 + j 0.0787	0.2387 + j 2.3145
1000	1 1711 + j 1.1268	2.3396 + j 0.0727	0.2330 + j 2 2932

EPR. Un conductor con pantalla metálica; 5 kV.
Espesor de aislamiento: 2.29 mm (0.09015 pulgadas).
Pantalla metálica con cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045".
configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
8	2.9238 + j 2.2252	69.9813 + j 0.1086	2.8574 + j 2.2385
6	1.9475 + j 2.2068	65.1422 + j 0.0955	1.8774 + j 2.2210
4	1.3257 + j 2.1872	57.2917 + j 0.0871	1.2474 + j 2.2035
2	0.9351 + j 2.1674	50.3320 + j 0.0791	0.8474 + j 2.1861
1/0	0.7002 + j 2.1436	43.0155 + j 0.0704	0.5994 + j 2.1659
2/0	0.6189 + j 2.1334	40.4627 + j 0.0664	0.5124 + j 2.1574
3/0	0.5573 + j 2.1224	37.5169 + j 0.0632	0.4434 + j 2.1485
4/0	0.5117 + j 2.1108	34.3308 + j 0.0611	0.3884 + j 2.1398
250	0.4872 + j 2.1006	32.1380 + j 0.0581	0.3564 + j 2.1319
300	0.4667 + j 2.0906	29.7131 + j 0.0571	0.3264 + j 2.1250
350	0.4503 + j 2.0832	28.6557 + j 0.0539	0.3054 + j 2.1192
400	0.4417 + j 2.0755	27.0508 + j 0.0532	0.2891 + j 2.1141
500	0.4318 + j 2.0633	25.0070 + j 0.0507	0.2682 + j 2.1058
600	0.4300 + j 2.0505	22.8391 + j 0.0498	0.2527 + j 2.0980
750	0.4290 + j 2.0368	21.0664 + j 0.0473	0.2387 + j 2.0894
1000	0.4424 + j 2.0176	18.9046 + j 0.0439	0.2330 + j 2.0779

EPR. Un conductor con pantalla metálica; 5 kV.
Espesor de aislamiento: 2.29 mm (0.09015 pulgadas).
Pantalla metálica con cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045".
configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
8	2.9539 + j 2.6575	69.9813 + j 0.1086	2.8574 + j 2.6747
6	1.9785 + j 2.6283	65.1422 + j 0.0955	1.8774 + j 2.6466
4	1.3596 + j 2.5982	57.2917 + j 0.0871	1.2474 + j 2.6192
2	0.9719 + j 2.5640	50.3320 + j 0.0791	0.8474 + j 2.5881
1/0	0.7409 + j 2.5225	43.0155 + j 0.0704	0.5994 + j 2.5513
2/0	0.6610 + j 2.5043	40.4627 + j 0.0664	0.5124 + j 2.5352
3/0	0.6004 + j 2.4770	37.5169 + j 0.0632	0.4434 + j 2.5104
4/0	0.5572 + j 2.4549	34.3308 + j 0.0611	0.3884 + j 2.4920
250	0.5344 + j 2.4364	32.1380 + j 0.0581	0.3564 + j 2.4765
300	0.5161 + j 2.4168	29.7131 + j 0.0571	0.3264 + j 2.4608
350	0.5002 + j 2.4022	28.6557 + j 0.0539	0.3054 + j 2.4481
400	0.4933 + j 2.3885	27.0508 + j 0.0532	0.2691 + j 2.4377
500	0.4843 + j 2.3596	25.0070 + j 0.0507	0.2682 + j 2.4134
600	0.4853 + j 2.3365	22.8391 + j 0.0498	0.2527 + j 2.3966
750	0.4862 + j 2.3111	21.0664 + j 0.0473	0.2387 + j 2.3773
1000	0.5020 + j 2.2755	18.9046 + j 0.0439	0.2330 + j 2.3512

XLP, EPR. 8 kV, 100% Nivel de aislamiento.

Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.

Espesor de aislamiento: 2.92 mm (0.115 pulgadas).

Pantalla metálica con cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045". configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
6	1.9548 + j 2.2049	58.5707 + j 0.1037	1.8774 + j 2.2210
4	1.3330 + j 2.1853	52.0693 + j 0.0944	1.2474 + j 2.2035
2	0.9423 + j 2.1655	46.2125 + j 0.0856	0.8474 + j 2.1861
1/0	0.7073 + j 2.1415	39.9491 + j 0.0761	0.5994 + j 2.1659
2/0	0.6259 + j 2.1314	37.7296 + j 0.0717	0.5124 + j 2.1574
3/0	0.5643 + j 2.1203	35.1501 + j 0.0681	0.4434 + j 2.1485
4/0	0.5186 + j 2.1086	32.3345 + j 0.0656	0.3884 + j 2.1398
250	0.4941 + j 2.0984	30.3801 + j 0.0624	0.3564 + j 2.1319
300	0.4735 + j 2.0883	28.2025 + j 0.0610	0.3264 + j 2.1250
350	0.4571 + j 2.0809	27.2466 + j 0.0577	0.3054 + j 2.1192
400	0.4483 + j 2.0732	25.7908 + j 0.0568	0.2891 + j 2.1141
500	0.4384 + j 2.0609	23.9254 + j 0.0541	0.2682 + j 2.1058
600	0.4365 + j 2.0480	21.9328 + j 0.0529	0.2527 + j 2.0980
750	0.4354 + j 2.0343	20.2924 + j 0.0501	0.2387 + j 2.0894
1000	0.4486 + j 2.0149	18.2789 + j 0.0465	0.2330 + j 2.0779

XLP, EPR. 8 kV, 100% Nivel de aislamiento.

Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.

Espesor de aislamiento: 2.92 mm (0.115 pulgadas).

Pantalla metálica con cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045". configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
6	1.9882 + j 2.6136	58.5707 + j 0.1037	1.8774 + j 2.6343
4	1.3691 + j 2.5843	52.0693 + j 0.0944	1.2474 + j 2.6077
2	0.9811 + j 2.5509	46.2125 + j 0.0856	0.8474 + j 2.5776
1/0	0.7498 + j 2.5105	39.9491 + j 0.0761	0.5994 + j 2.5418
2/0	0.6688 + j 2.4860	37.7296 + j 0.0717	0.5124 + j 2.5193
3/0	0.6090 + j 2.4661	35.1501 + j 0.0681	0.4434 + j 2.5023
4/0	0.5656 + j 2.4445	32.3345 + j 0.0656	0.3884 + j 2.4843
250	0.5427 + j 2.4263	30.3801 + j 0.0624	0.3564 + j 2.4692
300	0.5242 + j 2.4071	28.2025 + j 0.0610	0.3264 + j 2.4539
350	0.5082 + j 2.3928	27.2466 + j 0.0577	0.3054 + j 2.4415
400	0.5012 + j 2.3793	25.7908 + j 0.0568	0.2891 + j 2.4314
500	0.4920 + j 2.3509	23.9254 + j 0.0541	0.2682 + j 2.4077
600	0.4927 + j 2.3281	21.9328 + j 0.0529	0.2527 + j 2.3912
750	0.4935 + j 2.3029	20.2924 + j 0.0501	0.2387 + j 2.3723
1000	0.5077 + j 2.2628	18.2789 + j 0.0465	0.2330 + j 2.3413

XLP, EPR. 8 kV, 133% Nivel de aislamiento.

Un conductor con pantalla metálica; 133% nivel de aislamiento.

Espesor de aislamiento: 3.56 mm (0.140 pulgadas).

Pantalla metálica con cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045". configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo	Zoo	Zoo
	Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Pantalla metálica Ohms/km	Tierra Ohms/km
6	1 9679 + j 2.2015	49 6785 + j 0 1165	1.8774 + j 2 2210
4	1 3459 + j 2 1818	44 8011 + j 0.1060	1.2474 + j 2.2035
2	0 9522 + j 2.1627	41.4993 + j 0.0939	0 8474 + j 2.1861
1/0	0.7171 + j 2.1386	36 3495 + j 0.0833	0 5994 + j 2 1659
2/0	0.6384 + j 2.1276	33.6675 + j 0.0804	0.5124 + j 2.1574
3/0	0.5766 + j 2 1164	31.5891 + j 0.0762	0.4434 + j 2.1485
4/0	0.5281 + j 2.1056	29 9158 + j 0.0715	0.3884 + j 2.1398
250	0 5062 + j 2.0943	27 6739 + j 0 0695	0.3564 + j 2 1319
300	0.4828 + j 2.0851	26.3401 + j 0.0662	0 3264 + j 2 1250
350	0.4690 + j 2.0767	25.0446 + j 0.0641	0 3054 + j 2.1192
400	0.4602 + j 2.0689	23.8078 + j 0.0628	0.2891 + j 2.1141
500	0.4501 + j 2 0565	22.2075 + j 0.0597	0.2682 + j 2.1058
600	0.4505 + j 2.0425	20.1823 + j 0.0592	0.2527 + j 2.0980
750	0.4493 + j 2.0286	18 7837 + j 0.0559	0.2387 + j 2.0894
1000	0.4622 + j 2 0090	17 0457 + j 0 0518	0.2330 + j 2.0779

XLP, EPR. 8 kV, 133% Nivel de aislamiento.

Un conductor con pantalla metálica; 133% nivel de aislamiento.

Espesor de aislamiento: 3.56 mm (0.140 pulgadas).

Pantalla metálica con cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045". configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo	Zoo	Zoo
	Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Pantalla metálica Ohms/km	Tierra Ohms/km
6	2.0057 + j 2.5957	49.6785 + j 0.1165	1.8774 + j 2.6208
4	1.3860 + j 2.5649	44.8011 + j 0.1060	1.2474 + j 2.5929
2	0.9936 + j 2 5337	41.4993 + j 0.0939	0.8474 + j 2 5639
1/0	0.7612 + j 2.4896	36 3495 + j 0.0833	0.5994 + j 2 5245
2/0	0 6846 + j 2.4698	33.6675 + j 0 0804	0.5124 + j 2.5080
3/0	0.6245 + j 2.4505	31.5891 + j 0 0762	0.4434 + j 2.4916
4/0	0.5773 + j 2.4319	29.9158 + j 0.0715	0.3884 + j 2.4756
250	0.5576 + j 2.4115	27.6739 + j 0.0695	0.3564 + j 2.4595
300	0.5354 + j 2.3952	26.3401 + j 0.0662	0.3264 + j 2.4461
350	0 5229 + j 2.3799	25.0446 + j 0.0641	0.3054 + j 2.4340
400	0 5145 + j 2.3610	23.8078 + j 0.0628	0.2891 + j 2.4182
500	0 5061 + j 2 3388	22.2075 + j 0.0597	0 2682 + j 2.4011
600	0 5093 + j 2.3129	20.1823 + j 0.0592	0 2527 + j 2.3829
750	0 5097 + j 2 2881	18.7837 + j 0.0559	0.2387 + j 2.3646
1000	0.5233 + j 2 2487	17 0457 + j 0.0518	0.2330 + j 2 3345

XLP, EPR. 15 kV, 100% Nivel de aislamiento.

Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.

Espesor de aislamiento: 4.45 mm (0.175 pulgadas).

Pantalla metálica con cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045". configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
4	1.3543 + j 2.1794	41.0067 + j 0.1129	1.2474 + j 2.2035
2	0.9592 + j 2.1606	38.6889 + j 0.0992	0.8474 + j 2.1861
1/0	0.7240 + j 2.1365	34.1552 + j 0.0880	0.5994 + j 2.1659
2/0	0.6425 + j 2.1263	32.5027 + j 0.0831	0.5124 + j 2.1574
3/0	0.5807 + j 2.1151	30.5584 + j 0.0788	0.4434 + j 2.1485
4/0	0.5349 + j 2.1033	28.3998 + j 0.0755	0.3884 + j 2.1398
250	0.5102 + j 2.0929	26.8765 + j 0.0717	0.3564 + j 2.1319
300	0.4895 + j 2.0827	25.1544 + j 0.0697	0.3264 + j 2.1250
350	0.4729 + j 2.0753	24.3879 + j 0.0661	0.3054 + j 2.1192
400	0.4641 + j 2.0674	23.2131 + j 0.0648	0.2891 + j 2.1141
500	0.4539 + j 2.0550	21.6886 + j 0.0615	0.2682 + j 2.1058
600	0.4518 + j 2.0420	20.0369 + j 0.0597	0.2527 + j 2.0980
750	0.4505 + j 2.0280	18.6576 + j 0.0564	0.2387 + j 2.0894
1000	0.4634 + j 2.0084	16.9418 + j 0.0522	0.2330 + j 2.0779

XLP, EPR. 15 kV, 100% Nivel de aislamiento.

Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.

Espesor de aislamiento: 4.45 mm (0.175 pulgadas).

Pantalla metálica con cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045". configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
4	1.3953 + j 2.5397	41.0067 + j 0.1129	1.2474 + j 2.5705
2	1.0015 + j 2.5154	38.6889 + j 0.0992	0.8474 + j 2.5480
1/0	0.7695 + j 2.4774	34.1552 + j 0.0880	0.5994 + j 2.5150
2/0	0.6891 + j 2.4607	32.5027 + j 0.0831	0.5124 + j 2.5004
3/0	0.6289 + j 2.4417	30.5584 + j 0.0788	0.4434 + j 2.4843
4/0	0.5851 + j 2.4209	28.3998 + j 0.0755	0.3884 + j 2.4674
250	0.5618 + j 2.4033	26.8765 + j 0.0717	0.3564 + j 2.4530
300	0.5421 + j 2.3802	25.1544 + j 0.0697	0.3264 + j 2.4338
350	0.5259 + j 2.3667	24.3879 + j 0.0661	0.3054 + j 2.4222
400	0.5186 + j 2.3537	23.2131 + j 0.0648	0.2891 + j 2.4126
500	0.5099 + j 2.3308	21.6886 + j 0.0615	0.2682 + j 2.3947
600	0.5101 + j 2.3084	20.0369 + j 0.0597	0.2527 + j 2.3790
750	0.5104 + j 2.2839	18.6576 + j 0.0564	0.2387 + j 2.3608
1000	0.5232 + j 2.2419	16.9418 + j 0.0522	0.2330 + j 2.3280

XLP, EPR. 15 kV, 133% Nivel de aislamiento.

Un conductor con pantalla metálica; 133% nivel de aislamiento.

Espesor de aislamiento: 5.46 mm (0.215 pulgadas).

Pantalla metálica con cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045". configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	0.7349 + j 2.1330	31.1523 + j 0.0951	0.5994 + j 2.1659
2/0	0.6533 + j 2.1228	29.7607 + j 0.0898	0.5124 + j 2.1574
3/0	0.5915 + j 2.1115	28.1146 + j 0.0851	0.4434 + j 2.1485
4/0	0.5455 + j 2.0996	26.2717 + j 0.0814	0.3884 + j 2.1398
250	0.5208 + j 2.0892	24.9600 + j 0.0773	0.3564 + j 2.1319
300	0.4999 + j 2.0789	23.4754 + j 0.0750	0.3264 + j 2.1250
350	0.4833 + j 2.0714	22.7950 + j 0.0713	0.3054 + j 2.1192
400	0.4744 + j 2.0635	21.7641 + j 0.0696	0.2891 + j 2.1141
500	0.4641 + j 2.0510	20.4169 + j 0.0661	0.2682 + j 2.1058
600	0.4618 + j 2.0378	18.9458 + j 0.0640	0.2527 + j 2.0980
750	0.4605 + j 2.0238	17.7070 + j 0.0604	0.2387 + j 2.0894
1000	0.4731 + j 2.0040	16.1543 + j 0.0558	0.2330 + j 2.0779

XLP, EPR. 15 kV, 133% Nivel de aislamiento.

Un conductor con pantalla metálica; 133% nivel de aislamiento.

Espesor de aislamiento: 5.46 mm (0.215 pulgadas).

Pantalla metálica con cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045". configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	0.7827 + j 2.4612	31.1523 + j 0.0951	0.5994 + j 2.5031
2/0	0.7022 + j 2.4449	29.7607 + j 0.0898	0.5124 + j 2.4890
3/0	0.6418 + j 2.4263	28.1146 + j 0.0851	0.4434 + j 2.4735
4/0	0.5977 + j 2.4060	26.2717 + j 0.0814	0.3884 + j 2.4571
250	0.5734 + j 2.3843	24.9600 + j 0.0773	0.3564 + j 2.4384
300	0.5542 + j 2.3664	23.4754 + j 0.0750	0.3264 + j 2.4247
350	0.5380 + j 2.3531	22.7950 + j 0.0713	0.3054 + j 2.4134
400	0.5305 + j 2.3403	21.7641 + j 0.0696	0.2891 + j 2.4041
500	0.5215 + j 2.3178	20.4169 + j 0.0661	0.2682 + j 2.3867
600	0.5214 + j 2.2958	18.9458 + j 0.0640	0.2527 + j 2.3713
750	0.5202 + j 2.2668	17.7070 + j 0.0604	0.2387 + j 2.3485
1000	0.5338 + j 2.2304	16.1543 + j 0.0558	0.2330 + j 2.3217

XLP, EPR. 25 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 6.60 mm (0.26 pulgadas).
Pantalla metálica con cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045".
configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	0.7630 + j 2.1234	25.3315 + j 0.1109	0.5994 + j 2.1659
2/0	0.6812 + j 2.1130	24.3804 + j 0.1050	0.5124 + j 2.1574
3/0	0.6295 + j 2.0976	21.8133 + j 0.1045	0.4434 + j 2.1485
4/0	0.5832 + j 2.0855	20.6722 + j 0.0996	0.3884 + j 2.1398
250	0.5581 + j 2.0748	19.8430 + j 0.0948	0.3564 + j 2.1319
300	0.5369 + j 2.0642	18.8794 + j 0.0915	0.3264 + j 2.1250
350	0.5201 + j 2.0565	18.4370 + j 0.0874	0.3054 + j 2.1192
400	0.5109 + j 2.0484	17.7530 + j 0.0851	0.2891 + j 2.1141
500	0.5002 + j 2.0356	16.8415 + j 0.0807	0.2682 + j 2.1058
600	0.4974 + j 2.0220	15.8248 + j 0.0776	0.2527 + j 2.0980
750	0.5049 + j 2.0029	14.3330 + j 0.0764	0.2387 + j 2.0894
1000	0.5166 + j 1.9824	13.2981 + j 0.0706	0.2330 + j 2.0779

XLP, EPR. 25 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 6.60 mm (0.26 pulgadas).
Pantalla metálica con cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045".
configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	0.8188 + j 2.4364	25.3315 + j 0.1109	0.5994 + j 2.4908
2/0	0.7379 + j 2.4203	24.3804 + j 0.1050	0.5124 + j 2.4772
3/0	0.6897 + j 2.3922	21.8133 + j 0.1045	0.4434 + j 2.4573
4/0	0.6448 + j 2.3723	20.6722 + j 0.0996	0.3884 + j 2.4417
250	0.6207 + j 2.3555	19.8430 + j 0.0948	0.3564 + j 2.4283
300	0.6008 + j 2.3377	18.8794 + j 0.0915	0.3264 + j 2.4150
350	0.5841 + j 2.3246	18.4370 + j 0.0874	0.3054 + j 2.4040
400	0.5760 + j 2.3118	17.7530 + j 0.0851	0.2891 + j 2.3950
500	0.5661 + j 2.2895	16.8415 + j 0.0807	0.2682 + j 2.3781
600	0.5636 + j 2.2626	15.8248 + j 0.0776	0.2527 + j 2.3580
750	0.5736 + j 2.2299	14.3330 + j 0.0764	0.2387 + j 2.3378
1000	0.5862 + j 2.1965	13.2981 + j 0.0706	0.2330 + j 2.3150

XLP, EPR. 25 kV, 133% Nivel de aislamiento.

Un conductor con pantalla metálica; 133% nivel de aislamiento.

Espesor de aislamiento: 8.76 mm (0.345 pulgadas).

Pantalla metálica con cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045". configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	0.7696 + j 2.1210	24 2566 + j 0.1142	0.5994 + j 2.1659
2/0	0.6878 + j 2.1106	23.3772 + j 0.1082	0 5124 + j 2.1574
3/0	0.6256 + j 2 0991	22.3298 + j 0 1027	0 4434 + j 2 1485
4/0	0 5794 + j 2 0870	21.1374 + j 0.0979	0.3884 + j 2 1398
250	0 5543 + j 2.0763	20.2722 + j 0.0931	0.3564 + j 2.1319
300	0 5332 + j 2.0658	19 2684 + j 0.0900	0.3264 + j 2.1250
350	0 5164 + j 2.0581	18.8085 + j 0.0858	0.3054 + j 2.1192
400	0.5072 + j 2.0500	18.0977 + j 0.0836	0.2891 + j 2.1141
500	0.4965 + j 2.0372	17.1520 + j 0 0793	0 2682 + j 2 1058
600	0 4938 + j 2 0237	16.0990 + j 0.0763	0.2527 + j 2.0980
750	0 4919 + j 2 0093	15.1932 + j 0.0720	0.2387 + j 2.0894
1000	0 5039 + j 1.9890	14 0355 + j 0 0665	0.2330 + j 2.0779

XLP, EPR. 25 kV, 133% Nivel de aislamiento.

Un conductor con pantalla metálica; 133% nivel de aislamiento.

Espesor de aislamiento: 8.76 mm (0.345 pulgadas).

Pantalla metálica con cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045". configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	0.8228 + j 2 4089	24 2566 + j 0.1142	0.5994 + j 2.4656
2/0	0.7418 + j 2.3937	23.3772 + j 0.1082	0.5124 + j 2.4527
3/0	0.6808 + j 2.3763	22 3298 + j 0.1027	0.4434 + j 2 4385
4/0	0 6359 + j 2.3573	21 1374 + j 0.0979	0.3884 + j 2.4237
250	0 6119 + j 2.3411	20 2722 + j 0 0931	0.3564 + j 2.4109
300	0.5920 + j 2 3241	19.2684 + j 0 0900	0.3264 + j 2.3983
350	0 5742 + j 2 3066	18.8085 + j 0.0858	0 3054 + j 2.3825
400	0 5661 + j 2 2943	18.0977 + j 0.0836	0.2891 + j 2.3740
500	0 5556 + j 2 2702	17.1520 + j 0.0793	0 2682 + j 2.3550
600	0 5545 + j 2 2492	16.0990 + j 0.0763	0.2527 + j 2.3411
750	0 5537 + j 2 2264	15.1932 + j 0.0720	0.2387 + j 2 3250
1000	0 5669 + j 2.1942	14.0355 + j 0.0665	0.2330 + j 2 3030

XLP, EPR. 35 kV, 100% Nivel de aislamiento.

Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.

Espesor de aislamiento: 8.76 mm (0.345 pulgadas).

Pantalla metálica con cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045". configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	0.7696 + j 2.1210	24.2566 + j 0.1142	0.5994 + j 2.1659
2/0	0.6878 + j 2.1106	23.3772 + j 0.1082	0.5124 + j 2.1574
3/0	0.6256 + j 2.0991	22.3298 + j 0.1027	0.4434 + j 2.1485
4/0	0.5794 + j 2.0870	21.1374 + j 0.0979	0.3884 + j 2.1398
250	0.5543 + j 2.0763	20.2722 + j 0.0931	0.3564 + j 2.1319
300	0.5332 + j 2.0658	19.2684 + j 0.0900	0.3264 + j 2.1250
350	0.5164 + j 2.0581	18.8085 + j 0.0858	0.3054 + j 2.1192
400	0.5072 + j 2.0500	18.0977 + j 0.0836	0.2891 + j 2.1141
500	0.4965 + j 2.0372	17.1520 + j 0.0793	0.2682 + j 2.1058
600	0.4938 + j 2.0237	16.0990 + j 0.0763	0.2527 + j 2.0980
750	0.4919 + j 2.0093	15.1932 + j 0.0720	0.2387 + j 2.0894
1000	0.5039 + j 1.9890	14.0355 + j 0.0665	0.2330 + j 2.0779

XLP, EPR. 35 kV, 100% Nivel de aislamiento.

Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.

Espesor de aislamiento: 8.76 mm (0.345 pulgadas).

Pantalla metálica con cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045". configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	0.8228 + j 2.4089	24.2566 + j 0.1142	0.5994 + j 2.4656
2/0	0.7418 + j 2.3937	23.3772 + j 0.1082	0.5124 + j 2.4527
3/0	0.6808 + j 2.3763	22.3298 + j 0.1027	0.4434 + j 2.4385
4/0	0.6359 + j 2.3573	21.1374 + j 0.0979	0.3884 + j 2.4237
250	0.6119 + j 2.3411	20.2722 + j 0.0931	0.3564 + j 2.4109
300	0.5920 + j 2.3241	19.2684 + j 0.0900	0.3264 + j 2.3983
350	0.5742 + j 2.3066	18.8085 + j 0.0858	0.3054 + j 2.3825
400	0.5661 + j 2.2943	18.0977 + j 0.0836	0.2891 + j 2.3740
500	0.5556 + j 2.2702	17.1520 + j 0.0793	0.2682 + j 2.3550
600	0.5545 + j 2.2492	16.0990 + j 0.0763	0.2527 + j 2.3411
750	0.5537 + j 2.2264	15.1932 + j 0.0720	0.2387 + j 2.3250
1000	0.5669 + j 2.1942	14.0355 + j 0.0665	0.2330 + j 2.3030

XLP, EPR. 35 kV, 133% Nivel de aislamiento.

Un conductor con pantalla metálica; 133% nivel de aislamiento.

Espesor de aislamiento: 10.67 mm (0.42 pulgadas).

Pantalla metálica con cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045". configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo	Zoo	Zoo
	Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Pantalla metálica Ohms/km	Tierra Ohms/km
1/0	0.7890 + j 2.1136	21.5247 + j 0.1234	0.5994 + j 2.1659
2/0	0.7070 + j 2.1031	20.8142 + j 0.1171	0.5124 + j 2.1574
3/0	0.6448 + j 2.0915	19.9686 + j 0.1112	0.4434 + j 2.1485
4/0	0.5983 + j 2.0792	19.0016 + j 0.1060	0.3884 + j 2.1398
250	0.5731 + j 2.0685	18.2950 + j 0.1009	0.3564 + j 2.1319
300	0.5518 + j 2.0578	17.4697 + j 0.0974	0.3264 + j 2.1250
350	0.5349 + j 2.0501	17.0877 + j 0.0931	0.3054 + j 2.1192
400	0.5256 + j 2.0418	16.4970 + j 0.0907	0.2891 + j 2.1141
500	0.5147 + j 2.0288	15.7050 + j 0.0860	0.2682 + j 2.1058
600	0.5117 + j 2.0151	14.8161 + j 0.0826	0.2527 + j 2.0980
750	0.5096 + j 2.0005	14.0439 + j 0.0779	0.2387 + j 2.0894
1000	0.5212 + j 1.9800	13.0488 + j 0.0720	0.2330 + j 2.0779

XLP, EPR. 35 kV, 133% Nivel de aislamiento.

Un conductor con pantalla metálica; 133% nivel de aislamiento.

Espesor de aislamiento: 10.67 mm (0.42 pulgadas).

Pantalla metálica con cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045". configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo	Zoo	Zoo
	Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Pantalla metálica Ohms/km	Tierra Ohms/km
1/0	0.8451 + j 2.3841	21.5247 + j 0.1234	0.5994 + j 2.4498
2/0	0.7638 + j 2.3692	20.8142 + j 0.1171	0.5124 + j 2.4373
3/0	0.7025 + j 2.3523	19.9686 + j 0.1112	0.4434 + j 2.4237
4/0	0.6573 + j 2.3336	19.0016 + j 0.1060	0.3884 + j 2.4094
250	0.6317 + j 2.3129	18.2950 + j 0.1009	0.3564 + j 2.3919
300	0.6115 + j 2.2964	17.4697 + j 0.0974	0.3264 + j 2.3799
350	0.5939 + j 2.2814	17.0877 + j 0.0931	0.3054 + j 2.3668
400	0.5856 + j 2.2694	16.4970 + j 0.0907	0.2891 + j 2.3586
500	0.5754 + j 2.2489	15.7050 + j 0.0860	0.2682 + j 2.3435
600	0.5738 + j 2.2282	14.8161 + j 0.0826	0.2527 + j 2.3300
750	0.5726 + j 2.2057	14.0439 + j 0.0779	0.2387 + j 2.3145
1000	0.5851 + j 2.1740	13.0488 + j 0.0720	0.2330 + j 2.2932

TIPO CFE. Cables de Energía XLP, EPR. 5 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 2.3 mm (0.0905 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG, diámetro de 1 alambre: 0.02535".
configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
8	3.2073 + j 2.1146	14.6226 + j 0.1086	2.8574 + j 2.2385
6	2.2448 + j 2.0867	12.9580 + j 0.0955	1.8774 + j 2.2210
4	1.5837 + j 2.0874	13.5964 + j 0.0700	1.2474 + j 2.2035
2	1.2812 + j 2.0076	9.8120 + j 0.0764	0.8474 + j 2.1861
1/0	1.0771 + j 1.9535	8.4781 + j 0.0657	0.5994 + j 2.1659
2/0	1.0130 + j 1.9257	7.8960 + j 0.0619	0.5124 + j 2.1574
3/0	0.9731 + j 1.8906	7.2542 + j 0.0590	0.4434 + j 2.1485
4/0	0.9430 + j 1.8576	6.7514 + j 0.0553	0.3884 + j 2.1398
250	0.9377 + j 1.8216	6.2743 + j 0.0527	0.3564 + j 2.1319
300	0.9307 + j 1.7886	5.8876 + j 0.0503	0.3264 + j 2.1250
350	0.9329 + j 1.7544	5.5258 + j 0.0491	0.3054 + j 2.1192
400	0.9317 + j 1.7297	5.2977 + j 0.0470	0.2891 + j 2.1141
500	0.9420 + j 1.6770	4.8571 + j 0.0451	0.2682 + j 2.1058
600	0.9610 + j 1.6132	4.4009 + j 0.0447	0.2527 + j 2.0980
750	0.9702 + j 1.5612	4.0964 + j 0.0413	0.2387 + j 2.0894
1000	0.9998 + j 1.4709	3.6462 + j 0.0386	0.2330 + j 2.0779

TIPO CFE. Cables de Energía XLP, EPR. 5 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 2.3 mm (0.0905 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG, diámetro de 1 alambre: 0.02535".
configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
8	3.3567 + j 2.4864	14.6226 + j 0.1086	2.8574 + j 2.6667
6	2.3972 + j 2.4445	12.9580 + j 0.0955	1.8774 + j 2.6391
4	1.8151 + j 2.3827	13.5964 + j 0.0700	1.2474 + j 2.6122
2	1.4484 + j 2.3247	9.8120 + j 0.0764	0.8474 + j 2.5817
1/0	1.2521 + j 2.2437	8.4781 + j 0.0657	0.5994 + j 2.5475
2/0	1.1876 + j 2.1966	7.8960 + j 0.0619	0.5124 + j 2.5244
3/0	1.1522 + j 2.1451	7.2542 + j 0.0590	0.4434 + j 2.5088
4/0	1.1232 + j 2.0954	6.7514 + j 0.0553	0.3884 + j 2.4904
250	1.1200 + j 2.0431	6.2743 + j 0.0527	0.3564 + j 2.4750
300	1.1136 + j 1.9955	5.8876 + j 0.0503	0.3264 + j 2.4608
350	1.1162 + j 1.9465	5.5258 + j 0.0491	0.3054 + j 2.4481
400	1.1144 + j 1.9117	5.2977 + j 0.0470	0.2891 + j 2.4377
500	1.1230 + j 1.8384	4.8571 + j 0.0451	0.2682 + j 2.4194
600	1.1369 + j 1.7502	4.4009 + j 0.0447	0.2527 + j 2.3977
750	1.1409 + j 1.6810	4.0964 + j 0.0413	0.2387 + j 2.3784
1000	1.1613 + j 1.5642	3.6462 + j 0.0386	0.2330 + j 2.3521

TIPO CFE. Cables de Energía XLP, EPR. 15 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 4.4 mm (0.175 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG, diámetro de 1 alambre: 0.02535".
configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
2	1.3801 + j 1.9253	7.6016 + j 0.0972	0.8474 + j 2.1861
1/0	1.1688 + j 1.8683	6.7109 + j 0.0843	0.5994 + j 2.1659
2/0	1.1008 + j 1.8392	6.3180 + j 0.0796	0.5124 + j 2.1574
3/0	1.0557 + j 1.8026	5.8846 + j 0.0755	0.4434 + j 2.1485
4/0	1.0210 + j 1.7685	5.5364 + j 0.0708	0.3884 + j 2.1398
250	1.0107 + j 1.7316	5.2056 + j 0.0673	0.3564 + j 2.1319
300	0.9991 + j 1.6980	4.9305 + j 0.0641	0.3264 + j 2.1250
350	0.9965 + j 1.6633	4.6705 + j 0.0621	0.3054 + j 2.1192
400	0.9921 + j 1.6384	4.5033 + j 0.0596	0.2891 + j 2.1141
500	0.9955 + j 1.5857	4.1777 + j 0.0567	0.2682 + j 2.1058
600	1.0063 + j 1.5227	3.8338 + j 0.0553	0.2527 + j 2.0980
750	1.0096 + j 1.4717	3.5985 + j 0.0512	0.2387 + j 2.0894
1000	1.0293 + j 1.3840	3.2466 + j 0.0475	0.2330 + j 2.0779

TIPO CFE. Cables de Energía XLP, EPR. 15 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 4.4 mm (0.175 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG, diámetro de 1 alambre: 0.02535".
configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
2	1.5583 + j 2.1764	7.6016 + j 0.0972	0.8474 + j 2.5431
1/0	1.3501 + j 2.0969	6.7109 + j 0.0843	0.5994 + j 2.5119
2/0	1.3317 + j 1.9796	6.3180 + j 0.0796	0.5124 + j 2.4918
3/0	1.2394 + j 2.0049	5.8846 + j 0.0755	0.4434 + j 2.4829
4/0	1.2044 + j 1.9574	5.5364 + j 0.0708	0.3884 + j 2.4674
250	1.1935 + j 1.9065	5.2056 + j 0.0673	0.3564 + j 2.4530
300	1.1800 + j 1.8599	4.9305 + j 0.0641	0.3264 + j 2.4386
350	1.1731 + j 1.8108	4.6705 + j 0.0621	0.3054 + j 2.4222
400	1.1670 + j 1.7777	4.5033 + j 0.0596	0.2891 + j 2.4126
500	1.1667 + j 1.7082	4.1777 + j 0.0567	0.2682 + j 2.3958
600	1.1729 + j 1.6268	3.8338 + j 0.0553	0.2527 + j 2.3799
750	1.1698 + j 1.5619	3.5985 + j 0.0512	0.2387 + j 2.3618
1000	1.1760 + j 1.4517	3.2466 + j 0.0475	0.2330 + j 2.3320

TIPO CFE. Cables de Energía XLP, EPR. 25 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 6.6 mm (0.26 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG, diámetro de 1 alambre: 0.02535".
configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	1 2437 + j 1.7792	5.5849 + j 0.0992	0.5994 + j 2.1659
2/0	1.1720 + j 1.7495	5.2900 + j 0.0938	0.5124 + j 2 1574
3/0	1.1221 + j 1.7123	4.9684 + j 0.0889	0.4434 + j 2 1485
4/0	1 0832 + j 1.6778	4.7063 + j 0.0835	0 3884 + j 2.1398
250	1.0683 + j 1.6408	4.4595 + j 0.0794	0 3564 + j 2 1319
300	1.0526 + j 1.6072	4 2504 + j 0.0757	0 3264 + j 2 1250
350	1.0458 + j 1 5728	4.0523 + j 0.0731	0 3054 + j 2 1192
400	1.0385 + j 1.5482	3.9229 + j 0.0703	0 2891 + j 2 1141
500	1.0358 + j 1.4965	3.6703 + j 0 0667	0 2682 + j 2.1058
600	1 0395 + j 1.4352	3.4004 + j 0.0645	0.2527 + j 2.0980
750	1.0377 + j 1.3858	3.2121 + j 0.0599	0.2387 + j 2.0894
1000	1.0489 + j 1 3017	2 9286 + j 0.0554	0 2330 + j 2 0779

TIPO CFE. Cables de Energía XLP, EPR. 25 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 6.6 mm (0.26 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG, diámetro de 1 alambre: 0.02535".
configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	1.4258 + j 1 9598	5 5849 + j 0.0992	0.5994 + j 2.4882
2/0	1.3534 + j 1.9199	5.2900 + j 0.0938	0.5124 + j 2.4747
3/0	1.3030 + j 1 8706	4 9684 + j 0.0889	0.4434 + j 2 4609
4/0	1 2595 + j 1 8230	4 7063 + j 0.0835	0.3884 + j 2.4417
250	1 2418 + j 1.7740	4.4595 + j 0.0794	0 3564 + j 2.4272
300	1 2237 + j 1.7304	4 2504 + j 0.0757	0 3264 + j 2 4150
350	1 2142 + j 1 6859	4.0523 + j 0 0731	0.3054 + j 2.4040
400	1 2046 + j 1.6546	3.9229 + j 0.0703	0 2891 + j 2 3950
500	1.1968 + j 1.5891	3.6703 + j 0.0667	0 2682 + j 2.3790
600	1.1915 + j 1.5114	3.4004 + j 0 0645	0 2527 + j 2 3588
750	1.1830 + j 1.4511	3.2121 + j 0.0599	0 2387 + j 2.3418
1000	1.1817 + j 1.3498	2.9286 + j 0 0554	0 2330 + j 2.3157

TIPO CFE. Cables de Energía XLP, EPR. 35 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 8.8 mm (0.26 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG, diámetro de 1 alambre: 0.02535".
configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	1.3212 + j 1.6565	4 5782 + j 0.1156	0.5994 + j 2.1659
2/0	1 2451 + j 1.6268	4 3554 + j 0.1096	0.5124 + j 2.1574
3/0	1.1895 + j 1.5899	4.1184 + j 0.1039	0.4434 + j 2.1485
4/0	1.1500 + j 1.5456	3.3679 + j 0 0991	0.3884 + j 2.1398
250	1.1291 + j 1.5094	3.6925 + j 0.0943	0 3564 + j 2 1319
300	1 1117 + j 1.4667	3.4946 + j 0.0910	0.3264 + j 2 1250
350	1 0962 + j 1.4438	3.3979 + j 0 0869	0.3054 + j 2.1192
400	1 0882 + j 1.4103	3.2617 + j 0.0846	0.2891 + j 2 1141
500	1.0775 + j 1.3613	3.0809 + j 0.0803	0.2682 + j 2.1058
600	1.0719 + j 1.3040	2.8857 + j 0.0772	0.2527 + j 2 0980
750	1.0647 + j 1 2489	2.7170 + j 0.0728	0.2387 + j 2.0894
1000	1.0646 + j 1.1719	2.5113 + j 0.0673	0.2330 + j 2.0779

TIPO CFE. Cables de Energía XLP, EPR. 35 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 8.8 mm (0.26 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 22 AWG, diámetro de 1 alambre: 0.02535".
configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	1.4979 + j 1.7859	4.5782 + j 0 1156	0.5994 + j 2.4656
2/0	1.4196 + j 1.7482	4.3554 + j 0.1096	0.5124 + j 2.4527
3/0	1.3610 + j 1.7013	4.1184 + j 0.1039	0.4434 + j 2.4385
4/0	1.3175 + j 1.6452	3.3679 + j 0.0991	0.3884 + j 2.4237
250	1.2931 + j 1.6002	3 6925 + j 0.0943	0 3564 + j 2.4109
300	1.2711 + j 1.5472	3 4946 + j 0.0910	0 3264 + j 2 3983
350	1 2491 + j 1.5178	3.3979 + j 0.0869	0 3054 + j 2 3825
400	1 2377 + j 1.4771	3 2617 + j 0.0846	0 2891 + j 2 3740
500	1 2186 + j 1 4176	3.0809 + j 0.0803	0 2682 + j 2 3550
600	1 2063 + j 1.3497	2.8857 + j 0 0772	0.2527 + j 2.3411
750	1 1915 + j 1.2855	2.7170 + j 0 0728	0.2387 + j 2.3250
1000	1.1805 + j 1.1972	2.5113 + j 0.0673	0.2330 + j 2.3030

TIPO CFE. Cables de Energía XLP, EPR. 69 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 16.51 mm (0.65 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 19 AWG, diámetro de 1 alambre: 0.03589".
configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo	Zoo	Zoo
	Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Pantalla metálica Ohms/km	Tierra Ohms/km
500	1 0492 + j 0.7963	1.6505 + j 0.1031	0.2682 + j 2.1058
600	1 0246 + j 0.7665	1.5907 + j 0.0976	0 2527 + j 2 0980
750	0.9959 + j 0.7254	1 5122 + j 0.0922	0.2387 + j 2.0894
800	0 9699 + j 0.6787	1.4216 + j 0.0946	0 .2353 + j 2.0872
1000	0.9498 + j 0.6383	1.3588 + j 0.0888	0 2330 + j 2.0779

TIPO CFE Cables de Energía XLP, EPR. 69 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 16.51 mm (0.65 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 19 AWG, diámetro de 1 alambre: 0.03589".
configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo	Zoo	Zoo
	Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Pantalla metálica Ohms/km	Tierra Ohms/km
500	1.1151 + j 0 7836	1.6505 + j 0.1031	0.2682 + j 2.3112
600	1.0865 + j 0.7531	1.5907 + j 0.0976	0.2527 + j 2.2988
750	1.0525 + j 0.7111	1.5122 + j 0.0922	0 2387 + j 2.2845
800	1.0193 + j 0.6635	1.4216 + j 0.0946	0..2353 + j 2.2742
1000	0 9944 + j 0.6229	1.3588 + j 0.0888	0.2330 + j 2.2588

TIPO CFE. Cables de Energía XLP, EPR. 115 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 20.32 mm (0.8 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 19 AWG, diámetro de 1 alambre: 0.03589".
configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo	Zoo	Zoo
	Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Pantalla metálica Ohms/km	Tierra Ohms/km
750	0 9510 + j 0.6423	1.3502 + j 0.1011	0.2387 + j 2.0894
800	0.9245 + j 0.6043	1.2775 + j 0.1030	0..2353 + j 2.0872
1000	0.9046 + j 0.5699	1.2266 + j 0.0969	0.2330 + j 2 0779

TIPO CFE. Cables de Energía XLP, EPR. 115 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 20.32 mm (0.8 pulgadas).
Pantalla metálica de alambre de cobre, 19 AWG, diámetro de 1 alambre: 0.03589".
configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo	Zoo	Zoo
	Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Pantalla metálica Ohms/km	Tierra Ohms/km
750	0 9938 + j 0.6272	1 3502 + j 0.1011	0 2387 + j 2.2658
800	0 9626 + j 0.5890	1 2775 + j 0.1030	0..2353 + j 2.2592
1000	0 9390 + j 0.5549	1.2266 + j 0.0969	0.2330 + j 2 2444

TIPO CFE. Cables de Energía XLPE, EPR. 5 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 2.3 mm (0.905 pulgadas).
Pantalla metálica de cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045".
configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
8	2 9207 + j 2.2259	73 5567 + j 0.1047	2.8574 + j 2.2385
6	1 9444 + j 2 2075	68.3097 + j 0 0918	1.8774+ j 2.2210
4	1.3226 + j 2.1880	59.7651 + j 0.0839	1 2474 + j 2.2035
2	0.9292 + j 2.1690	54.2537 + j 0.0734	0 8474 + j 2.1861
1/0	0.6916 + j 2.1460	47 4150 + j 0.0630	0.5994 + j 2.1659
2/0	0.6103 + j 2 1359	44.3443 + j 0 0595	0.5124 + j 2 1574
3/0	0.5488 + j 2.1249	40.8388 + j 0.0567	0.4434 + j 2.1485
4/0	0.5005 + j 2.1142	38.1095 + j 0.0531	0 3884 + j 2.1398
250	0 4761+ j 2 1041	35 4301 + j 0.0507	0.3564 + j 2 1319
300	0.4530 + j 2 0950	33.2853 + j 0.0485	0.3264 + j 2.1250
350	0 4394 + j 2.0868	31.2501 + j 0.0474	0.3054 + j 2.1192
400	0 4281 + j 2.0801	29 9853 + j 0.0454	0.2891 + j 2.1141
500	0 4184 + j 2.0680	27.4970 + j 0..0436	0.2682 + j 2.1058
600	0.4168 + j 2.0554	24.8996 + j 0.0433	0.2527 + j 2.0980
750	0.4135 + j 2.0428	23.1897 + j 0.0400	0.2387 + j 2.0894
1000	0.4271 + j 2.0239	20..5968 + j 0.0375	0 2330 + j 2.0779

TIPO CFE. Cables de Energía XLPE, EPR. 5 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 2.3 mm (0.905 pulgadas).
Pantalla metálica de cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045".
configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
8	2.9488 + j 2 6506	73.5567 + j 0.1047	2.8574 + j 2.6667
6	1.9734 + j 2.6219	68.3097 + j 0.0918	1.8774+ j 2.6391
4	1.3546 + j 2.5923	59.7651 + j 0.0839	1 2474 + j 2.6122
2	0 9628 + j 2.5597	54.2537 + j 0.0734	0 8474 + j 2.5817
1/0	0 7283 + j 2.5220	47.4150 + j 0.0630	0 5994 + j 2.5475
2/0	0 6477 + j 2 4971	44.3443 + j 0 0595	0.5124 + j 2.5244
3/0	0.5884 + j 2.4787	40.8388 + j 0.0567	0.4434 + j 2 5088
4/0	0 5415 + j 2.4579	38.1095 + j 0.0531	0 3884 + j 2 4904
250	0 5190 + j 2.4396	35.4301 + j 0.0507	0 3564 + j 2.4750
300	0.4974 + j 2 4227	33 2853 + j 0 0485	0.3264 + j 2.4608
350	0.4854 + j 2.4071	31.2501 + j 0.0474	0.3054 + j 2.4481
400	0 4751 + j 2.3947	29.9853 + j 0.0454	0.2891 + j 2 4377
500	0.4676 + j 2.3716	27.4970 + j 0.0436	0.2682 + j 2 4194
600	0.4681 + j 2 3440	24.8996 + j 0 0433	0 2527 + j 2.3977
750	0.4661 + j 2 3199	23.1897 + j 0 0400	0.2387 + j 2.3784
1000	0.4825 + j 2.2846	20..5968 + j 0.0375	0.2330 + j 2.3521

TIPO CFE. Cables de Energía XLPE, EPR. 15 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 4.4 mm (0.175 pulgadas).
Pantalla metálica de cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045".
configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
2	0.9536 + j 2 1623	40 9044 + j 0.0950	0.8474 + j 2.1861
1/0	0.7157 + j 2.1391	36.8231 + j 0.0823	0.5994 + j 2 1659
2/0	0 6342 + j 2 1289	34 9198 + j 0.0776	0.5124 + j 2.1574
3/0	0.5725 + j 2.1177	32.6925 + j 0.0736	0.4434 + j 2.1485
4/0	0 5241 + j 2.1069	30.9063 + j 0.0690	0 3884 + j 2 1398
250	0.4995 + j 2.0966	29.1143 + j 0.0656	0.3564 + j 2.1319
300	0.4762 + j 2.0874	27.6439 + j 0 0626	0.3264 + j 2.1250
350	0 4624 + j 2 0790	26.2217 + j 0.606	0 3054 + j 2.1192
400	0 4510 + j 2 0722	25.3220 + j 0.0582	0.2891 + j 2.1141
500	0.4410 + j 2.0599	23 5209 + j 0.0554	0.2682 + j 2.1058
600	0.4390 + j 2.0470	21.5922 + j 0.0541	0.2527 + j 2 0980
750	0 4354 + j 2.0343	20 2924 + j 0.0501	0 2387 + j 2.0894
1000	0.4486 + j 2.0149	18.2789 + j 0.0465	0.2330 + j 2.0779

TIPO CFE. Cables de Energía XLPE, EPR. 15 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 4.4 mm (0.175 pulgadas).
Pantalla metálica de cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045".
configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
2	0.9931 + j 2.5128	40.9044 + j 0.0950	0.8474 + j 2.5431
1/0	0 7577 + j 2 4778	36. 8231 + j 0.0823	0.5994 + j 2.5119
2/0	0.6776 + j 2 4627	34.9198 + j 0.0776	0 5124 + j 2.4989
3/0	0.6176 + j 2.4438	32.6925 + j 0.0736	0.4434 + j 2.4829
4/0	0 5705 + j 2.4257	30.9063 + j 0 0690	0.3884 + j 2.4674
250	0 5474 + j 2.4082	29.1143 + j 0.0656	0 3564 + j 2 4530
300	0 5252 + j 2.3911	27.6439 + j 0.0626	0 3264 + j 2 4386
350	0 5120 + j 2.3717	26.2217 + j 0.606	0.3054 + j 2.4222
400	0.5013 + j 2 3600	25 3220 + j 0 0582	0.2891 + j 2.4126
500	0.4932 + j 2 3383	23.5209 + j 0.0554	0.2682 + j 2.3958
600	0.4938 + j 2.3160	21.5922 + j 0.0541	0.2527 + j 2.3799
750	0 4912 + j 2.2929	20 2924 + j 0.0501	0 2387 + j 2.3618
1000	0.5055 + j 2.2541	18.2789 + j 0.0465	0.2330 + j 2.3320

TIPO CFE. Cables de Energía XLPE, EPR. 25 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 6.6 mm (0.26 pulgadas).
Pantalla metálica de cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045".
configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	0.7390 + j 2.1317	30.1596 + j 0.0975	0.5994 + j 2.1659
2/0	0.6574 + j 2.1214	28.8492 + j 0.0922	0.5124 + j 2.1574
3/0	0.5955 + j 2.1101	27.2969 + j 0.0874	0.4434 + j 2.1485
4/0	0.5469 + j 2.0992	26.0281 + j 0.0821	0.3884 + j 2.1398
250	0.5221 + j 2.0887	24.7396 + j 0.0780	0.3564 + j 2.1319
300	0.4986 + j 2.0794	23.6640 + j 0.743	0.3264 + j 2.1250
350	0.4846 + j 2.0709	22.6104 + j 0.0719	0.3054 + j 2.1192
400	0.4731 + j 2.0640	21.9352 + j 0.0690	0.2891 + j 2.1141
500	0.4629 + j 2.0515	20.5676 + j 0.0655	0.2682 + j 2.1058
600	0.4606 + j 2.0383	19.0756 + j 0.0634	0.2527 + j 2.0980
750	0.4568 + j 2.0254	18.0519 + j 0.0589	0.2387 + j 2.0894
1000	0.4695 + j 2.0057	16.4409 + j 0.0545	0.2330 + j 2.0779

TIPO CFE. Cables de Energía XLPE, EPR. 25 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 6.6 mm (0.26 pulgadas).
Pantalla metálica de cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045".
configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	0.7860 + j 2.4450	30.1596 + j 0.0975	0.5994 + j 2.4882
2/0	0.7054 + j 2.4292	28.8492 + j 0.0922	0.5124 + j 2.4747
3/0	0.6451 + j 2.4123	27.2969 + j 0.0874	0.4434 + j 2.4609
4/0	0.5967 + j 2.3905	26.0281 + j 0.0821	0.3884 + j 2.4417
250	0.5731 + j 2.3729	24.7396 + j 0.0780	0.3564 + j 2.4272
300	0.5507 + j 2.3578	23.6640 + j 0.743	0.3264 + j 2.4150
350	0.5378 + j 2.3436	22.6104 + j 0.0719	0.3054 + j 2.4040
400	0.5270 + j 2.3323	21.9352 + j 0.0690	0.2891 + j 2.3950
500	0.5182 + j 2.3113	20.5676 + j 0.0655	0.2682 + j 2.3790
600	0.5169 + j 2.2847	19.0756 + j 0.0634	0.2527 + j 2.3588
750	0.5139 + j 2.2627	18.0519 + j 0.0589	0.2387 + j 2.3418
1000	0.5277 + j 2.2270	16.4409 + j 0.0545	0.2330 + j 2.3157

TIPO CFE. Cables de Energía XLPE, EPR. 35 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 8.8 mm (0.345 pulgadas).
Pantalla metálica de cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045".
configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	0.7696 + j 2 1210	24 2566 + j 0.1142	0.5994 + j 2.1659
2/0	0.6878 + j 2 1106	23.3772 + j 0.1082	0.5124 + j 2 1574
3/0	0.6256 + j 2.0991	22.3298 + j 0 1027	0.4434 + j 2 1485
4/0	0.5794 + j 2.0870	21 1374 + j 0.0979	0.3884 + j 2.1398
250	0.5543 + j 2.0763	20.2722 + j 0.0931	0 3564 + j 2 1319
300	0 5332 + j 2.0658	19.2684 + j 0 0900	0.3264 + j 2.1250
350	0.5164 + j 2 0581	18 8085 + j 0.0858	0 3054 + j 2 1192
400	0 5072 + j 2 0500	18.0977 + j 0.0836	0 2891 + j 2 1141
500	0.4965 + j 2 0372	17 1520 + j 0 0793	0.2682 + j 2.1058
600	0 4938 + j 2 0237	16.0990 + j 0.0763	0 2527 + j 2 0980
750	0.4919 + j 2.0093	15.1932 + j 0 0720	0.2387 + j 2.0894
1000	0.5039 + j 1.9890	14.0355 + j 0.0665	0.2330 + j 2.0779

TIPO CFE. Cables de Energía XLPE, EPR. 35 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 8.8 mm (0.345 pulgadas).
Pantalla metálica de cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045".
configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	0 8228 + j 2 4089	24 2566 + j 0.1142	0.5994 + j 2.4656
2/0	0.7418 + j 2.3937	23.3772 + j 0.1082	0 5124 + j 2 4527
3/0	0.6808 + j 2.3763	22 3298 + j 0.1027	0.4434 + j 2 4385
4/0	0.6359 + j 2 3573	21.1374 + j 0.0979	0.3884 + j 2.4237
250	0.6119 + j 2.3411	20.2722 + j 0 0931	0.3564 + j 2 4109
300	0.5920 + j 2 3241	19.2684 + j 0.0900	0 3264 + j 2.3983
350	0 5742 + j 2.3066	18.8085 + j 0.0858	0.3054 + j 2.3825
400	0.5661 + j 2.2943	18.0977 + j 0 0836	0.2891 + j 2.3740
500	0.5556 + j 2.2702	17 1520 + j 0.0793	0 2682 + j 2 3550
600	0 5545 + j 2.2492	16.0990 + j 0.0763	0 2527 + j 2.3411
750	0.5537 + j 2.2264	15.1932 + j 0 0720	0.2387 + j 2 3250
1000	0 5669 + j 2.1942	14.0355 + j 0.0665	0 2330 + j 2 3030

TIPO CFE. Cables de Energía XLPE, EPR. 69 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 16.51 mm (0.65 pulgadas).
Pantalla metálica de cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045".
configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo	Zoo	Zoo
	Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Pantalla metálica Ohms/km	Tierra Ohms/km
500	0.5636 + j 2.0039	12.7087 + j 0.1020	0.2682 + j 2.1058
600	0.5554 + j 1.9922	12.3303 + j 0.0965	0.2527 + j 2.0980
750	0.5526 + j 1.9771	11.7878 + j 0.0912	0.2387 + j 2.0894
800	0.5658 + j 1.9651	11.0714 + j 0.0937	0.2353 + j 2.0872
1000	0.5761 + j 1.9481	10.5744 + j 0.0879	0.2330 + j 2.0779

TIPO CFE. Cables de Energía XLPE, EPR. 69 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 16.51 mm (0.65 pulgadas).
Pantalla metálica de cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045".
configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo	Zoo	Zoo
	Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Pantalla metálica Ohms/km	Tierra Ohms/km
500	0.6259 + j 2.1882	12.7087 + j 0.1020	0.2682 + j 2.3112
600	0.6177 + j 2.1713	12.3303 + j 0.0965	0.2527 + j 2.2988
750	0.6154 + j 2.1497	11.7878 + j 0.0912	0.2387 + j 2.2845
800	0.6289 + j 2.1283	11.0714 + j 0.0937	0.2353 + j 2.2742
1000	0.6393 + j 2.1043	10.5744 + j 0.0879	0.2330 + j 2.2588

TIPO CFE. Cables de Energía XLPE, EPR. 115 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 20.32 mm (0.8 pulgadas).
Pantalla metálica de cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045".
configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo	Zoo	Zoo
	Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Pantalla metálica Ohms/km	Tierra Ohms/km
750	0.5850 + j 1.9576	10.4628 + j 0.1002	0.2387 + j 2.0894
800	0.5974 + j 1.9450	9.8945 + j 0.1022	0.2353 + j 2.0872
1000	0.6072 + j 1.9277	9.4957 + j 0.0961	0.2330 + j 2.0779

TIPO CFE. Cables de Energía XLPE, EPR. 115 kV, 100% Nivel de aislamiento.
Un conductor con pantalla metálica; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 20.32 mm (0.8 pulgadas).
Pantalla metálica de cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045".
configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo	Zoo	Zoo
	Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Pantalla metálica Ohms/km	Tierra Ohms/km
750	0.6470 + j 2.1095	10.4628 + j 0.1002	0.2387 + j 2.2658
800	0.6605 + j 2.0911	9.8945 + j 0.1022	0.2353 + j 2.2592
1000	0.6701 + j 2.0675	9.4957 + j 0.0961	0.2330 + j 2.2444

TIPO URD. (Distribución Residencial Subterránea)
Cables de Energía XLPE, EPR. 15 kV.
Un conductor de cobre; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 4.4 mm (0.175 pulgadas).
Neutro concéntrico completo.
configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
2	1.7034 + j 1.0416	2.6776 + j 0.1207	0.8474 + j 2.1861
1/0	1.4303 + j 0.8704	2.1403 + j 0.0947	0.5994 + j 2.1659
2/0	1.2401 + j 0.6182	1.6108 + j 0.0912	0.5124 + j 2.1574
3/0	1.1466 + j 0.5744	1.4746 + j 0.0864	0.4434 + j 2.1485
4/0	0.9998 + j 0.4480	1.2079 + j 0.0835	0.3884 + j 2.1398

TIPO URD. (Distribución Residencial Subterránea)
Cables de Energía XLPE, EPR. 15 kV.
Un conductor de cobre; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 4.4 mm (0.175 pulgadas).
Neutro concéntrico completo.
configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
2	1.8984 + j 1.2528	3.1374 + j 0.1052	0.8474 + j 2.5549
1/0	1.5485 + j 0.8507	2.1403 + j 0.0947	0.5994 + j 2.5165
2/0	1.3112 + j 0.5870	1.6108 + j 0.0912	0.5124 + j 2.4960
3/0	1.2099 + j 0.5434	1.4746 + j 0.0864	0.4434 + j 2.4802
4/0	1.0419 + j 0.4196	1.2079 + j 0.0835	0.3884 + j 2.4609

TIPO URD. (Distribución Residencial Subterránea)
Cables de Energía XLPE, EPR. 25 kV.
Un conductor de cobre; 100% nivel de aislamiento.
Espesor de aislamiento: 6.6 mm (0.26 pulgadas).
Neutro concéntrico completo.
configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	1.3734 + j 0.7330	1.8660 + j 0.1079	0.5994 + j 2.1659
2/0	1.1634 + j 0.5185	1.4181 + j 0.1035	0.5124 + j 2.1574
3/0	1.0717 + j 0.4849	1.3003 + j 0.0982	0.4434 + j 2.1485
4/0	0.9265 + j 0.3834	1.0734 + j 0.0944	0.3884 + j 2.1398

TIPO URD. (Distribución Residencial Subterránea)

Cables de Energía XLPE, EPR. 25 kV.

Un conductor de cobre; 100% nivel de aislamiento.

Espesor de aislamiento: 6.6 mm (0.26 pulgadas).

Neutro concéntrico completo.

configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	1.4593 + j 0.7058	1.8660 + j 0.1079	0.5994 + j 2.4922
2/0	1.2129 + j 0.4894	1.4181 + j 0.1035	0.5124 + j 2.4734
3/0	1.1156 + j 0.4573	1.3003 + j 0.0982	0.4434 + j 2.4538
4/0	0.9555 + j 0.3598	1.0734 + j 0.0944	0.3884 + j 2.4351

TIPO URD. (Distribución Residencial Subterránea)

Cables de Energía XLPE, EPR. 15 kV.

Un conductor de cobre; 100% nivel de aislamiento.

Espesor de aislamiento: 4.4 mm (0.175 pulgadas).

Pantalla metálica de cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045.

configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
2	0.9592 + j 2.1606	38.6889 + j 0.0992	0.8474 + j 2.1861
1/0	0.7240 + j 2.1365	34.1552 + j 0.0880	0.5994 + j 2.1659
2/0	0.6425 + j 2.1263	32.5027 + j 0.0831	0.5124 + j 2.1574
3/0	0.5807 + j 2.1151	30.5584 + j 0.0788	0.4434 + j 2.1485
4/0	0.5349 + j 2.1033	28.3998 + j 0.0755	0.3884 + j 2.1398

TIPO URD. (Distribución Residencial Subterránea)

Cables de Energía XLPE, EPR. 15 kV.

Un conductor de cobre; 100% nivel de aislamiento.

Espesor de aislamiento: 4.4 mm (0.175 pulgadas).

Pantalla metálica de cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045.

configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
2	1.0024 + j 2.5221	38.6889 + j 0.0992	0.8474 + j 2.5549
1/0	0.7697 + j 2.4789	34.1552 + j 0.0880	0.5994 + j 2.5165
2/0	0.6885 + j 2.4564	32.5027 + j 0.0831	0.5124 + j 2.4960
3/0	0.6283 + j 2.4376	30.5584 + j 0.0788	0.4434 + j 2.4802
4/0	0.5840 + j 2.4146	28.3998 + j 0.0755	0.3884 + j 2.4609

TIPO URD. (Distribución Residencial Subterránea)

Cables de Energía XLPE, EPR. 25 kV.

Un conductor de cobre; 100% nivel de aislamiento.

Espesor de aislamiento: 6.6 mm (0.26 pulgadas).

Pantalla metálica de cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045. configuración plana.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	0.7471 + j 2 1290	28.3549 + j 0.1023	0.5994 + j 2 1659
2/0	0.6654 + j 2.1187	27.1858 + j 0.0967	0.5124 + j 2 1574
3/0	0.6035 + j 2.1073	25 7975 + j 0.0917	0.4434 + j 2.1485
4/0	0.5574 + j 2 0954	24.2317 + j 0.0875	0.3884 + j 2.1398

TIPO URD. (Distribución Residencial Subterránea)

Cables de Energía XLPE, EPR. 25 kV.

Un conductor de cobre; 100% nivel de aislamiento.

Espesor de aislamiento: 6.6 mm (0.26 pulgadas).

Pantalla metálica de cinta de cobre de 1" de ancho y espesor nominal de 0.0045. configuración trébol.

calibre AWG KCM	Zoo Pantalla metálica/tierra Ohms/km	Zoo Pantalla metálica Ohms/km	Zoo Tierra Ohms/km
1/0	0.7975 + j 2.4451	28.3549 + j 0.1023	0.5994 + j 2.4922
2/0	0.7159 + j 2.4243	27.1858 + j 0.0967	0.5124 + j 2.4734
3/0	0.6545 + j 2.4018	25 7975 + j 0.0917	0.4434 + j 2.4538
4/0	0.6094 + j 2 3792	24.2317 + j 0.0875	0.3884 + j 2.4351

CABLE VINANEL 2000.
TIPO THW.
600 VOLTS.

Calibre AWG KCM	<i>Tubo conduit.</i>	<i>Al aire libre, charola para cables</i>
	<i>Impedancia de secuencia cero con cable de tierra. Zoo Ohms/Km</i>	<i>Impedancia de secuencia cero con cable de tierra. Zoo Ohms/Km</i>
14	11.0208 + j 2.7070	11.0208 + j 2.7070
12	7.2126 + j 2.6710	7.2126 + j 2.6710
10	4.7988 + j 2.6352	5.0270 + j 2.4274
8	3.4970 + j 2.3780	3.4970 + j 2.3780
6	2.5338 + j 2.3337	2.7367 + j 1.9977
4	2.1195 + j 1.9708	2.1195 + j 1.9708
2	1.7184 + j 1.9435	1.8004 + j 1.4886
1/0	1.4493 + j 1.9052	1.5291 + j 1.4640
2/0	1.4352 + j 1.4554	1.3328 + j 1.0070
3/0	1.3572 + j 1.4464	1.2561 + j 1.0025
4/0	1.2922 + j 1.4373	1.1924 + j 0.9981
250	1.1484 + j 0.9968	0.9429 + j 0.6802
300	1.1102 + j 0.9941	0.9070 + j 0.6798
350	1.0822 + j 0.9919	0.8809 + j 0.6799
400	1.0602 + j 0.9902	0.8605 + j 0.6801
500	1.0279 + j 0.9873	0.8309 + j 0.6804
600	0.8079 + j 0.6862	0.6986 + j 0.5839
750	0.7828 + j 0.6859	0.6772 + j 0.5866
1000	0.7569 + j 0.6880	0.5549 + j 0.5169

CABLE VINANEL 2000.
TIPO THWN.
600 VOLTS.

Calibre AWG KCM	<i>Tubo conduit.</i>	<i>Al aire libre,escalera.</i>
	<i>Impedancia de secuencia cero con cable de tierra. Zoo Ohms/Km</i>	<i>Impedancia de secuencia cero con cable de tierra. Zoo Ohms/Km</i>
14	11.0297 + j 2.7274	11.0297 + j 2.7274
12	7.2208 + j 2.6885	7.2208 + j 2.6885
10	4.8017 + j 2.6410	5.0308 + j 2.4324
8	3.5016 + j 2.3835	3.5016 + j 2.3835
6	2.5483 + j 2.3515	2.7543 + j 2.0102
4	2.1264 + j 1.9759	2.1264 + j 1.9759
2	1.7245 + j 1.9467	1.8069 + j 1.4892
1/0	1.4592 + j 1.9115	1.5397 + j 1.4662
2/0	1.4450 + j 1.4564	1.3415 + j 1.0043
3/0	1.3664 + j 1.4472	1.2642 + j 0.9999
4/0	1.2998 + j 1.4380	1.1992 + j 0.9958
250	1.1566 + j 0.9942	0.9492 + j 0.6754
300	1.1180 + j 0.9915	0.9129 + j 0.6752
350	1.0896 + j 0.9893	0.8865 + j 0.6753
400	1.0672 + j 0.9881	0.8659 + j 0.6760
500	1.0338 + j 0.9855	0.8354 + j 0.6770
600	0.8107 + j 0.6801	0.7027 + j 0.5793
750	0.7888 + j 0.6806	0.6822 + j 0.5807
1000	0.7654 + j 0.6801	0.5608 + j 0.5074

APENDICE C

CALCULO DE UN SISTEMA DE TIERRAS

CALCULO DE CORTO CIRCUITO MONOFASICO.

Objetivo.

Determinar las potencias y corrientes de corto circuito en los buses del sistema, para verificar las capacidades interruptivas de los dispositivos de protección, diseñar las redes de tierra y calcular las barras en la subestación principal.

Procedimiento.

Se obtendrán los valores de corriente de corto circuito, a partir de la reactancia equivalente de Thevenin en cada punto de falla utilizando valores en por unidad.

Consideraciones.

Se considerará para los motores una carga agrupada, con reactancia subtransitoria igual a 25% (0.25 p.u.), con una conexión en delta y que para fines de cálculo 1HP = 1KVA.

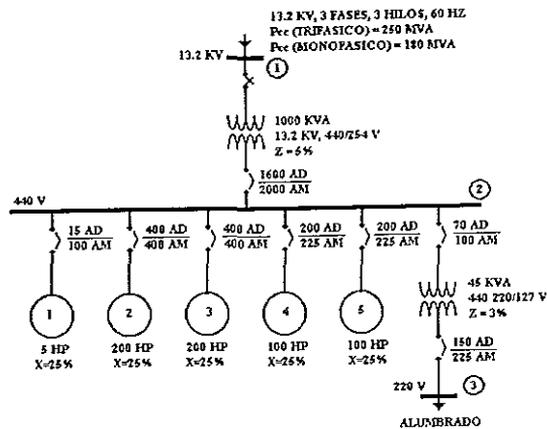
No hay contribución de corrientes al punto de falla, de las cargas de alumbrado.

Datos de la compañía suministradora para la acometida de 13.2 kV:

Potencia de corto circuito trifásico: 250 MVA.

Potencia de corto circuito monofásico: 180 MVA.

└ Diagrama unifilar del sistema eléctrico de potencia.



↳ Valores en p.u. referidos a una base de 1000 kVA.

Los valores de voltaje nominal en los buses se consideran voltajes base.

↳ Reactancias de secuencia positiva y negativa.

Cía. suministradora:

$$X_{1,2} = \frac{1 \text{ MVA}}{250 \text{ MVA}} = 0.004 \text{ p.u.}$$

Transformador 1 MVA:

$$X_{1,2} = \frac{5\%}{100} \left[\frac{13.2 \text{ KV}}{13.2 \text{ KV}} \right]^2 \frac{1 \text{ MVA}}{1 \text{ MVA}} = 0.05 \text{ p.u.}$$

Motor 5 HP:

$$X_{1,2} = \frac{25\%}{100} \left[\frac{440 \text{ V}}{440 \text{ V}} \right]^2 \frac{1 \text{ MVA}}{5 \text{ KVA}} = 50 \text{ p.u.}$$

Motor 200 HP:

$$X_{1,2} = \frac{25\%}{100} \left[\frac{440 \text{ V}}{440 \text{ V}} \right]^2 \frac{1 \text{ MVA}}{200 \text{ KVA}} = 1.25 \text{ p.u.}$$

Motor 100 HP

$$X_{1,2} = \frac{25\%}{100} \left[\frac{440 \text{ V}}{440 \text{ V}} \right]^2 \frac{1 \text{ MVA}}{100 \text{ KVA}} = 2.5 \text{ p.u.}$$

Transformador 45 kVA:

$$X_{1,2} = \frac{3\%}{100} \left[\frac{440 \text{ V}}{440 \text{ V}} \right]^2 \frac{1 \text{ MVA}}{45 \text{ KVA}} = 0.6666 \text{ p.u.}$$

▢ **Reactancias de secuencia cero:**

Cía suministradora:

$$I_o = I_{cc} = \frac{P_{cc1\phi}}{3V_{LL}} = \frac{180MVA}{3(13.2kV)} = 7872.9582[A]$$

$$I_{BASE} = \frac{1MVA}{3(13.2kV)} = 43.7386[A]$$

$$I_{p.u.} = \frac{7872.9582A}{43.7386A} = 180 p.u.$$

$$I_{a0} = \frac{180 p.u.}{3} = 60 p.u.$$

$$(I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = 3I_{a0})$$

partiendo de la siguiente expresión:

$$I_{a0} = \frac{E}{X_1 + X_2 + X_0}$$

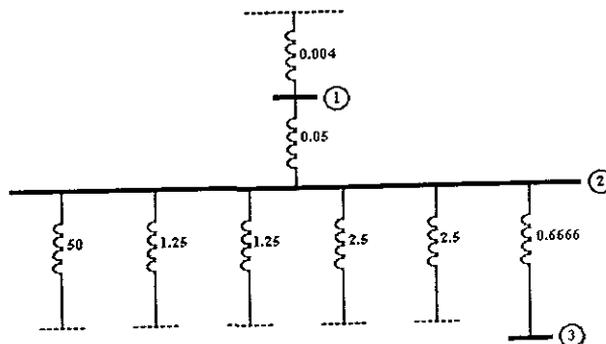
despejando X_0 y sustituyendo valores:

$$X_0 = \frac{E}{I_{a0}} - 2X_1 = \frac{1}{60} - 2(0.004) = 0.00866 p.u.$$

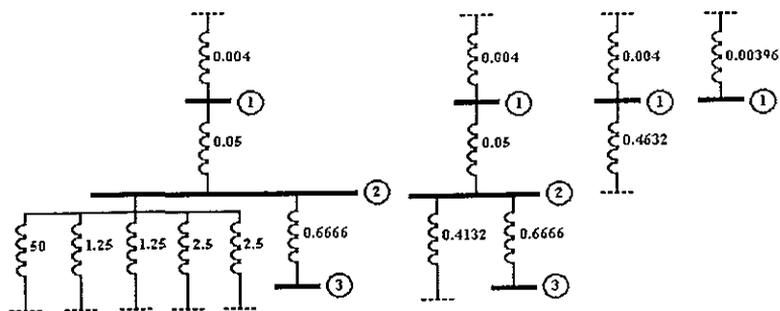
Transformador 1MVA: $X_0 = X_1 = X_2 = 0.05 p.u.$

Transformador 45KVA: $X_0 = X_1 = X_2 = 0.6666 p.u.$

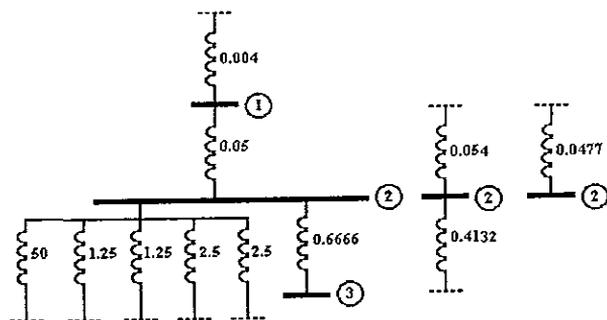
▢ **Diagrama unifilar de reactancias de secuencia positiva y negativa.**



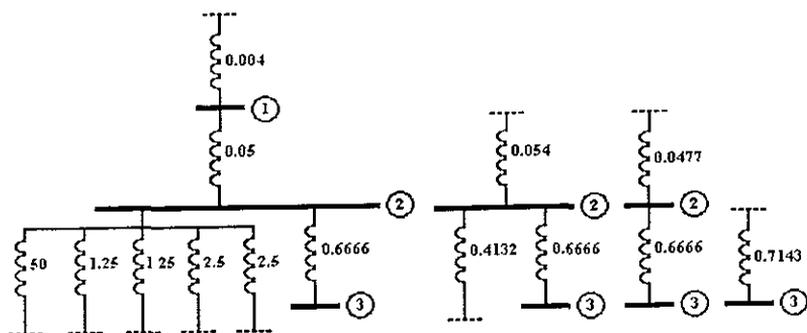
• Para la barra 1.



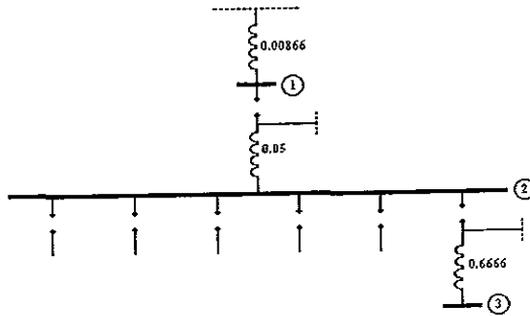
• Para la barra 2.



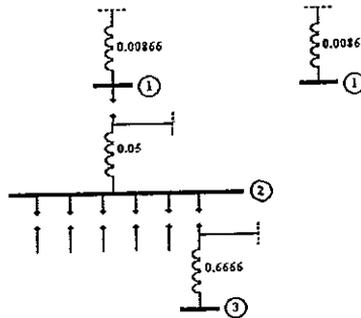
• Para la barra 3.



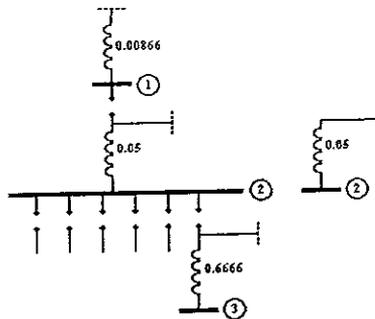
▢ Diagrama unifilar de reactancias de secuencia cero.



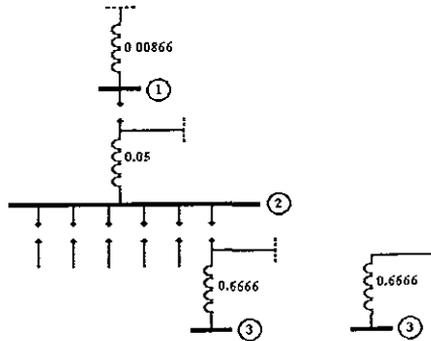
• Para la barra 1.



• Para la barra 2.



• Para la barra 3.



∩ Cálculo matemático de corto circuito monofásico.

De los diagramas de reactancias de secuencia positiva, negativa y cero:

• Para la barra 1.

$$X_1 = X_2 = 0.00396 \text{ p.u.}$$

$$X_0 = 0.00866 \text{ p.u.}$$

$$I_{d1} = I_{d2} = I_{d0} = \frac{E}{x_1 + x_2 + x_0} = \frac{1}{0.00396 + 0.00396 + 0.00866} = 60.3136 \text{ p.u.}$$

$$I_a = I_{d1} + I_{d2} + I_{d0} = 3I_{d0} = 3(60.3136) = 180.9408 \text{ p.u.}$$

$$I_{BASE} = \frac{1 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 13.2 \text{ KV}} = 43.7386 \text{ A}$$

$$I_s = (180.9408)(43.7386) = \underline{\underline{7914.1013 \text{ AMPERES}}}$$

• Para la barra 2.

$$X_1 = X_2 = 0.0477 \text{ p.u.}$$

$$X_0 = 0.05 \text{ p.u.}$$

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{E}{X_1 + X_2 + X_0} = \frac{1}{0.0477 + 0.0477 + 0.05} = 6.8775 \text{ p.u.}$$

$$I_s = I_{s1} + I_{s2} + I_{s0} = 3I_{s0} = 3(6.8775) = 20.6327 \text{ p.u.}$$

$$I_{BASE} = \frac{1 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 440 \text{ V}} = 1312.1597 \text{ A}$$

$$I_s = (20.6327)(1312.1597) = \underline{27073.3974 \text{ AMPERES}}$$

• Para la barra 3.

$$X_1 = X_2 = 0.7143 \text{ p.u.}$$

$$X_0 = 0.6666 \text{ p.u.}$$

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{E}{X_1 + X_2 + X_0} = \frac{1}{0.7143 + 0.7143 + 0.6666} = 0.4772 \text{ p.u.}$$

$$I_s = I_{s1} + I_{s2} + I_{s0} = 3I_{s0} = 3(0.4772) = 1.4318 \text{ p.u.}$$

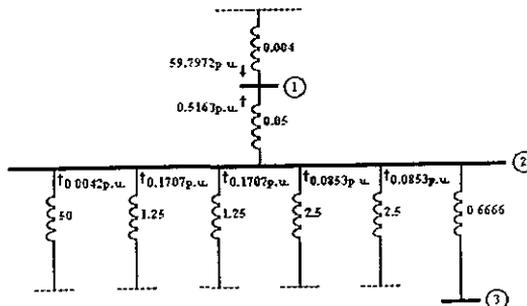
$$I_{BASE} = \frac{1 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 220 \text{ V}} = 2624.3194 \text{ A}$$

$$I_s = (1.4318)(2624.3194) = \underline{3757.5005 \text{ AMPERES}}$$

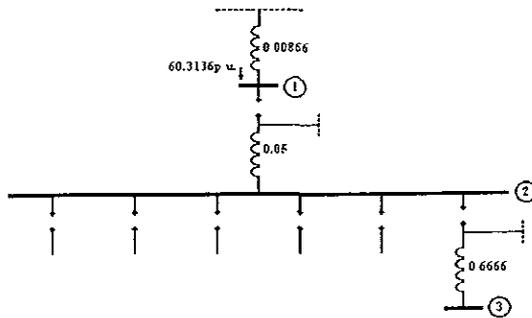
▢ Aportaciones de corrientes al punto de falla.

• Para la barra 1.

➤ Secuencia positiva y negativa.

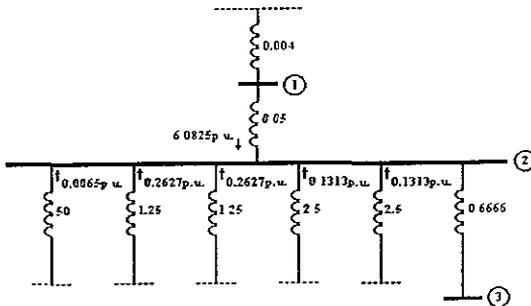


➤ *Secuencia cero.*

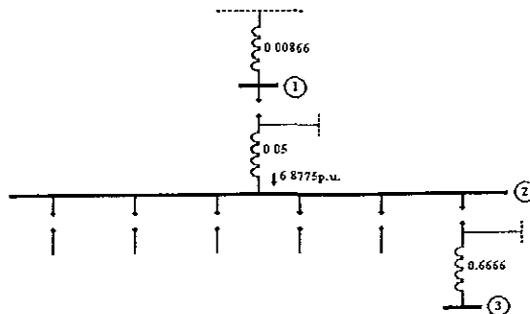


• Para la barra 2.

➤ *Secuencia positiva y negativa.*

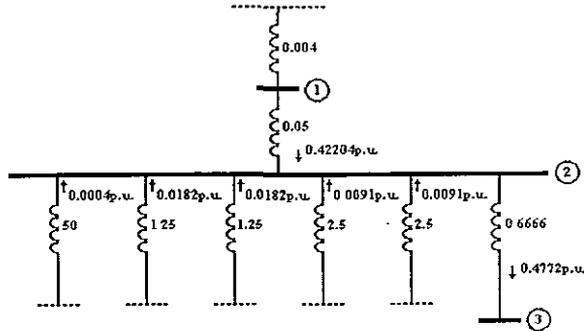


➤ *Secuencia cero.*

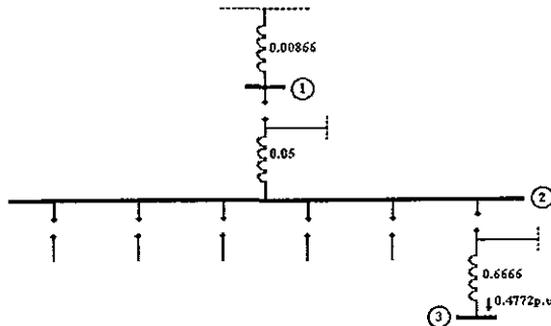


• Para la barra 3.

➤ *Secuencia positiva y negativa.*



➤ *Secuencia cero.*



▢ Cálculo de corto circuito monofásico considerando la impedancia de los cables de alimentación de los motores y el transformador de alumbrado.

Consideraciones:

1. Conductores: Cable de Cu, aislamiento THW, 75°C, 600Volts.
2. Canalizaciones: Tubería conduit de fierro galvanizado con tres conductores unipolares.
3. Impedancia base:

$$Z_{BASE} = \frac{V_{BASE}}{\sqrt{3} I_{BASE}} = \frac{440}{\sqrt{3} 1312.1597} = 0.1936 \text{ Ohms}$$

4. Impedancias de los cables alimentadores:

• **Motor 200 HP, 440 V:**

Alimentador: Calibre 400 KCM.

Longitud: 50 metros.

$$\begin{aligned} Z_{1,2} &= 2.97 + j 4.04 \text{ [m}\Omega\text{/100''}] \text{ a } 25^\circ\text{C} \\ &= 2.97 + j 4.04 \text{ [m}\Omega\text{/100''}][50 \text{ m}][1''/0.3048 \text{ m}] \\ &= 4.8708 + j 6.62565 \text{ [m}\Omega\text{]} \\ &= (4.8708 + j 6.62565 \text{ [m}\Omega\text{]}) / 0.1936 \text{ [}\Omega\text{]} \end{aligned}$$

$$Z_{1,2} = 0.0252 + j 0.0342 \text{ p.u.}$$

$$\begin{aligned} Z_0 &= 1.06026 + j 0.99021 \text{ [}\Omega\text{/Km]} \\ &= 1.06026 + j 0.99021 \text{ [}\Omega\text{/Km}][50 \text{ m}][1 \text{ Km}/1000 \text{ m}] \\ &= 0.053013 + j 0.04951 \text{ [}\Omega\text{]} \\ &= (0.053013 + j 0.04951 \text{ [}\Omega\text{]}) / 0.1936 \text{ [}\Omega\text{]} \end{aligned}$$

$$Z_0 = 0.27382 + j 0.25573 \text{ p.u.}$$

• **Motor 100 HP, 440 V:**

Alimentador: Calibre 2/0 AWG.

Longitud: 20 metros

$$\begin{aligned} Z_{1,2} &= 8.35 + j 4.35 \text{ [m}\Omega\text{/100''}] \text{ a } 25^\circ\text{C} \\ &= 8.35 + j 4.35 \text{ [m}\Omega\text{/100''}][20 \text{ m}][1''/0.3048 \text{ m}] \\ &= 5.479 + j 2.8544 \text{ [m}\Omega\text{]} \\ &= (5.479 + j 2.8544 \text{ [m}\Omega\text{]}) / 0.1936 \text{ [}\Omega\text{]} \end{aligned}$$

$$Z_{1,2} = 0.0283 + j 0.014744 \text{ p.u.}$$

$$\begin{aligned} Z_0 &= 1.43524 + j 1.45541 \text{ [}\Omega\text{/Km]} \\ &= 1.43524 + j 1.45541 \text{ [}\Omega\text{/Km}][20 \text{ m}][1 \text{ Km}/1000 \text{ m}] \\ &= 0.0287 + j 0.029108 \text{ [}\Omega\text{]} \\ &= (0.0287 + j 0.029108 \text{ [}\Omega\text{]}) / 0.1936 \text{ [}\Omega\text{]} \end{aligned}$$

$$Z_0 = 0.14824 + j 0.15035 \text{ p.u.}$$

- **Motor 5 HP, 440 V:**

Alimentador: Calibre 12 AWG.

Longitud: 10 metros.

$$\begin{aligned} Z_{1,2} &= 162 + j 5.23 \text{ [m}\Omega/100\text{''}] a 25^\circ\text{C} \\ &= 162 + j 5.23 \text{ [m}\Omega/100\text{''}][10 \text{ m}][1\text{''}/0.3048 \text{ m}] \\ &= 53.152 + j 1.716 \text{ [m}\Omega] \\ &= (53.152 + j 1.716 \text{ [m}\Omega]) / 0.1936 \text{ [\Omega]} \end{aligned}$$

$$Z_{1,2} = 0.2744 + j 0.00886 \text{ p.u.}$$

$$\begin{aligned} Z_0 &= 7 21265 + j 2.67103 \text{ [\Omega/Km]} \\ &= 7 21265 + j 2.67103 \text{ [\Omega/Km]}[10 \text{ m}][1 \text{ Km}/1000 \text{ m}] \\ &= 0.07212 + j 0.02671 \text{ [\Omega]} \\ &= (0.07212 + j 0.02671 \text{ [\Omega]}) / 0.1936 \text{ [\Omega]} \end{aligned}$$

$$Z_0 = 0.37252 + j 0.13796 \text{ p.u.}$$

- **Transformador 45 kVA, 440 V:**

Alimentador: Calibre 4 AWG.

Longitud: 15 metros.

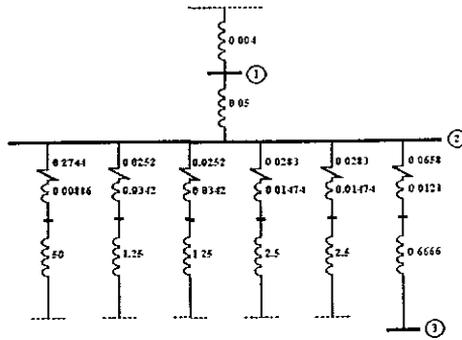
$$\begin{aligned} Z_{1,2} &= 25.9 + j 4.77 \text{ [m}\Omega/100\text{''}] a 25^\circ\text{C} \\ &= 25.9 + j 4.77 \text{ [m}\Omega/100\text{''}][15 \text{ m}][1\text{''}/0.3048 \text{ m}] \\ &= 12.745 + j 2.347 \text{ [m}\Omega] \\ &= (12.745 + j 2.347 \text{ [m}\Omega]) / 0.1936 \text{ [\Omega]} \end{aligned}$$

$$Z_{1,2} = 0.0658 + j 0.0121 \text{ p.u.}$$

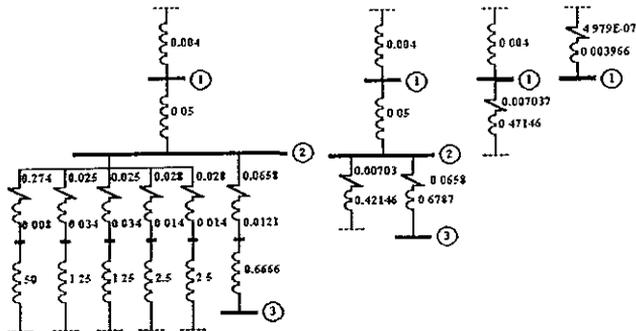
$$\begin{aligned} Z_0 &= 2.11951 + j 1.97082 \text{ [\Omega/Km]} \\ &= 2.11951 + j 1.97082 \text{ [\Omega/Km]}[15 \text{ m}][1 \text{ Km}/1000 \text{ m}] \\ &= 0.03179 + j 0.02956 \text{ [\Omega]} \\ &= (0.03179 + j 0.02956 \text{ [\Omega]}) / 0.1936 \text{ [\Omega]} \end{aligned}$$

$$Z_0 = 0.1642 + j 0.15268 \text{ p.u.}$$

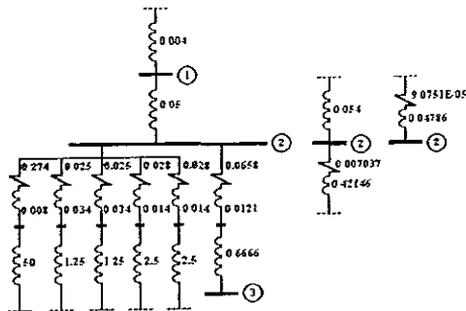
2) Diagrama unifilar de impedancias de secuencia positiva y negativa.



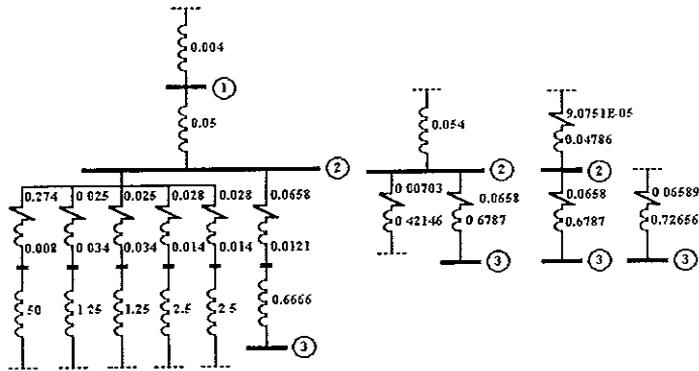
• Para la barra 1.



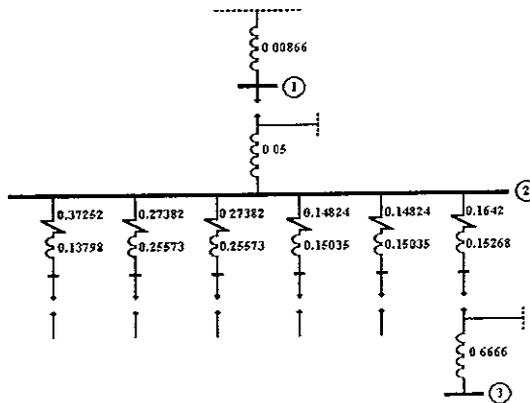
• Para la barra 2.



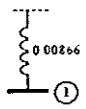
• Para la barra 3.



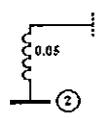
• Diagrama unifilar de impedancias de secuencia cero.



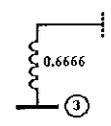
• Para la barra 1



• Para la barra 2.



• Para la barra 3.



↳ **Cálculo matemático de corto circuito monofásico.**

De los diagramas de reactancias de secuencia positiva, negativa y cero:

• **Para la barra 1.**

$$Z_1 = Z_2 = 4.9794 \times 10^{-7} + j 0.003966 = 0.003966 \angle 90^\circ \text{ p.u.}$$

$$Z_0 = j 0.00866 = 0.00866 \angle 90^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_{s1} = I_{s2} = I_{s0} = \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

$$= \frac{1 \angle 0^\circ}{0.00396 \angle 90^\circ + 0.00396 \angle 90^\circ + 0.00866 \angle 90^\circ} = 60.27001 \angle -90^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_s = I_{s1} + I_{s2} + I_{s0} = 3I_{s0} = 3 (60.27001 \angle -90^\circ) = 180.81003 \angle -90^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_{BASE} = \frac{1 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 13.2 \text{ KV}} = 43.7386 \text{ A}$$

$$I_s = (180.81003)(43.7386) = \underline{7908.3775 \text{ AMPERES}}$$

• **Para la barra 2.**

$$Z_1 = Z_2 = 9.0751 \times 10^{-5} + j 0.04786 = 0.04786 \angle 90^\circ \text{ p.u.}$$

$$Z_0 = j 0.05 = 0.05 \angle 90^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_{s1} = I_{s2} = I_{s0} = \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

$$= \frac{1 \angle 0^\circ}{0.04786 \angle 90^\circ + 0.04786 \angle 90^\circ + 0.05 \angle 90^\circ} = 6.86247 \angle -90^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_s = I_{s1} + I_{s2} + I_{s0} = 3I_{s0} = 3 (6.86247 \angle -90^\circ) = 20.58741 \angle -90^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_{BASE} = \frac{1 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 440 \text{ V}} = 1312.1597 \text{ A}$$

$$I_s = (20.58741)(1312.1597) = \underline{27013.96973 \text{ AMPERES}}$$

• **Para la barra 3.**

$$Z_1 = Z_2 = 0.0658907 + j 0.72656 = 0.72954 \angle 84.81^\circ \text{ p.u.}$$

$$Z_0 = j 0.6666 = 0.6666 \angle 90^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_{s1} = I_{s2} = I_{s0} = \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

$$= \frac{1 \angle 0^\circ}{2 (0.72954 \angle 84.81^\circ) + 0.6666 \angle 90^\circ} = 0.47085 \angle -86.44^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_s = I_{s1} + I_{s2} + I_{s0} = 3I_{s0} = 3 (0.47085 \angle -86.44^\circ) = 1.41255 \angle -86.44^\circ \text{ p.u.}$$

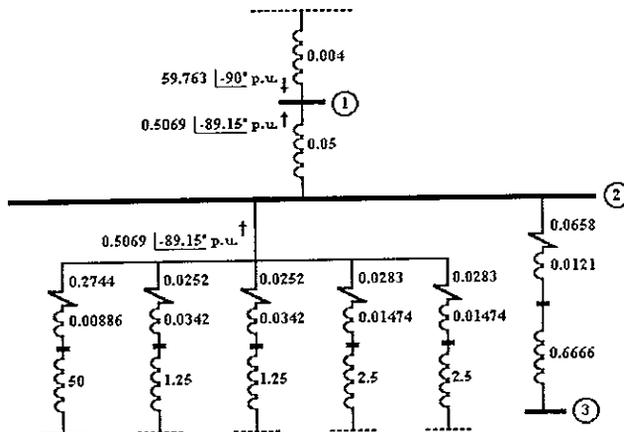
$$I_{BASE} = \frac{1 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 220 \text{ V}} = 2624.3194 \text{ A}$$

$$I_s = (1.41255)(2624.3194) = \underline{3706.9823 \text{ AMPERES}}$$

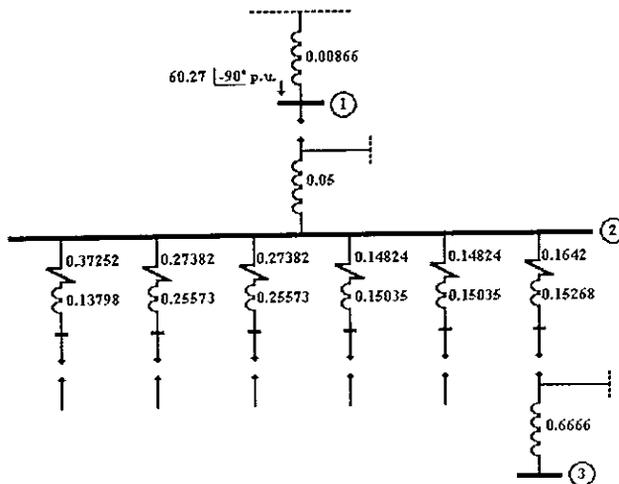
↳ Aportaciones de corrientes al punto de falla.

• Para la barra 1.

➤ Secuencia positiva y negativa.

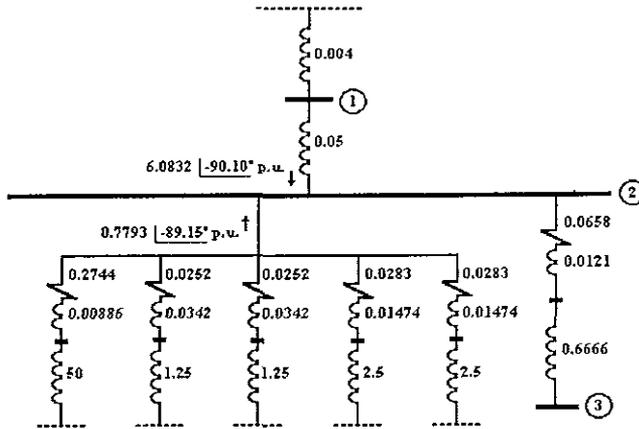


➤ Secuencia cero.

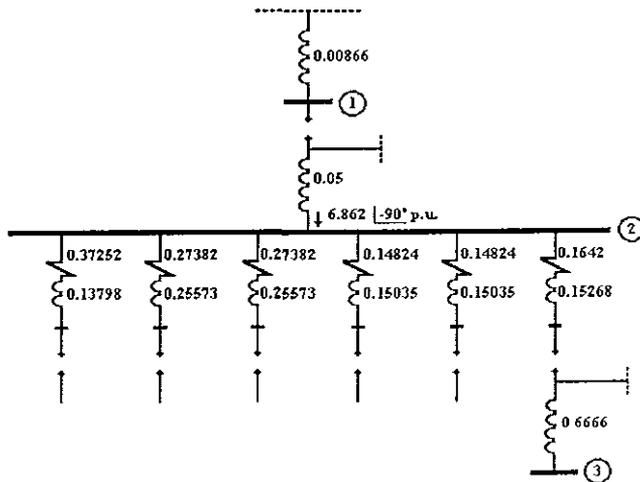


• Para la barra 2.

➤ *Secuencia positiva y negativa.*

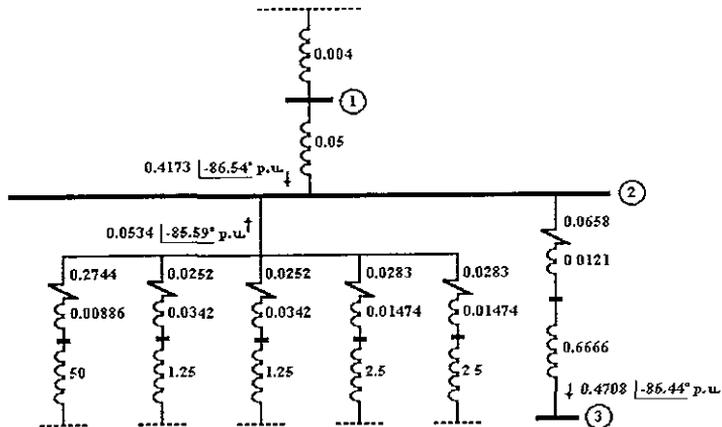


➤ *Secuencia cero.*

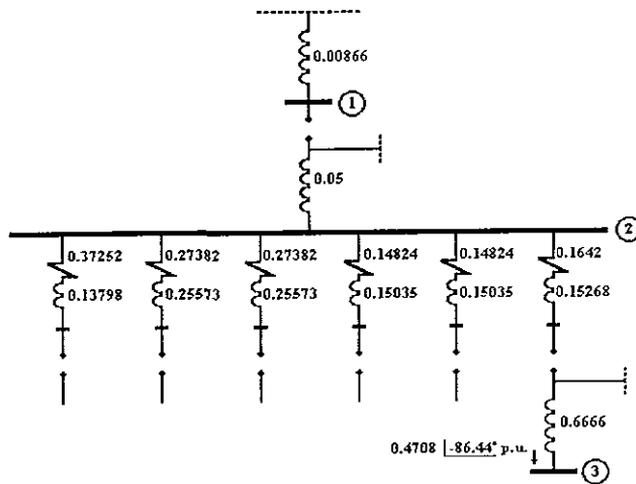


• Para la barra 3.

➤ Secuencia positiva y negativa.



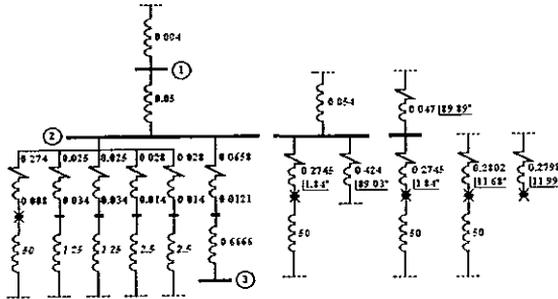
➤ Secuencia cero.



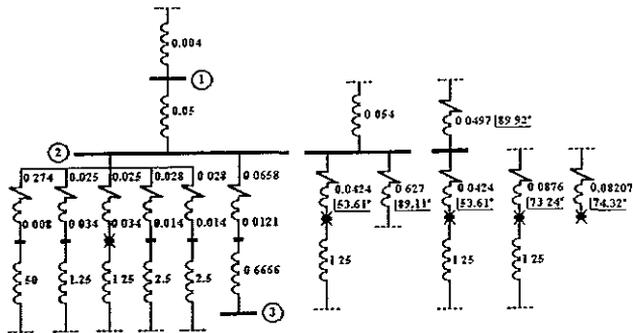
↳ Cálculo de corto circuito monofásico considerando que el punto de falla se encuentra en las terminales de los cables de alimentación de los motores.

↳ Diagrama unifilar de impedancias de secuencia positiva y negativa.

• Para el motor 5 HP.



• Para el motor 200 HP.



• Para el motor 100 HP.

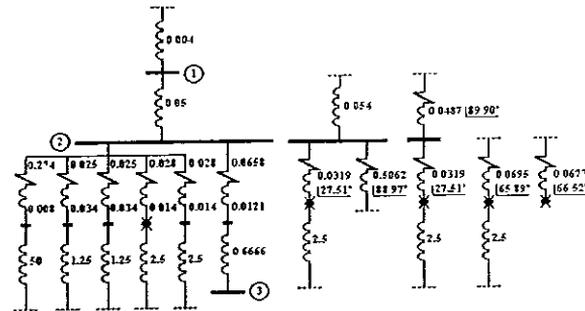
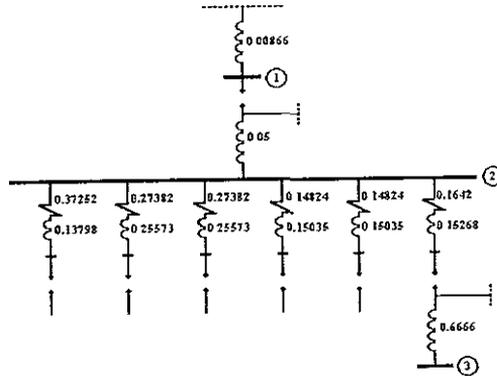
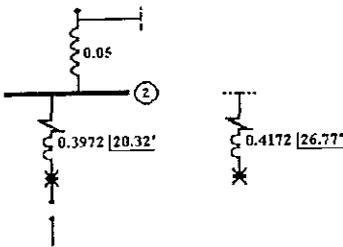


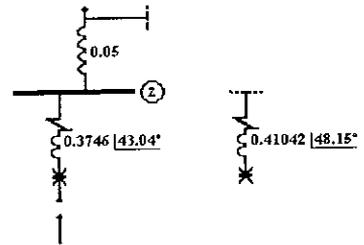
Diagrama unifilar de impedancias de secuencia cero.



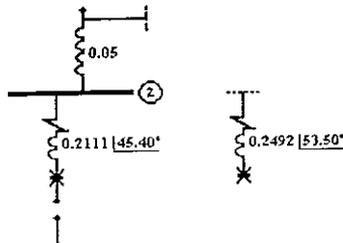
• Para el motor 5 HP.



• Para el motor 200 HP.



• Para el motor 100 HP.



┆ **Cálculo matemático de corto circuito monofásico.**

De los diagramas de reactancias de secuencia positiva, negativa y cero:

• **Para el motor 5 HP.**

$$Z_1 = Z_2 = 0.2737 + j 0.0581 = 0.2798 \angle 11.99^\circ \text{ p.u.}$$

$$Z_0 = 0.3725 + j 0.1879 = 0.4172 \angle 26.77^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_0} = \frac{1 \angle 0^\circ}{0.2798 \angle 11.99^\circ + 0.2798 \angle 11.99^\circ + 0.4172 \angle 26.77^\circ} = 1.0321 \angle -18.29^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = 3I_{a0} = 3 (1.0321 \angle -18.29^\circ) = 3.0964 \angle -18.29^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_{BASE} = \frac{1 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 440 \text{ V}} = 1312.1597 \text{ A}$$

$$I_a = (3.0964)(1312.1597) = \underline{4062.9713 \text{ AMPERES}}$$

• **Para el motor 200 HP.**

$$Z_1 = Z_2 = 0.0221 + j 0.07902 = 0.08207 \angle 74.32^\circ \text{ p.u.}$$

$$Z_0 = 0.2738 + j 0.3057 = 0.4104 \angle 48.15^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_0} = \frac{1 \angle 0^\circ}{0.08207 \angle 74.32^\circ + 0.08207 \angle 74.32^\circ + 0.4104 \angle 48.15^\circ} = 1.778 \angle -55.56^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = 3I_{a0} = 3 (1.778 \angle -55.56^\circ) = 5.334 \angle -55.56^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_{BASE} = \frac{1 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 440 \text{ V}} = 1312.1597 \text{ A}$$

$$I_a = (5.334)(1312.1597) = \underline{6999.0598 \text{ AMPERES}}$$

• **Para el motor 100 HP.**

$$Z_1 = Z_2 = 0.0269 + j 0.0621 = 0.0677 \angle 66.52^\circ \text{ p.u.}$$

$$Z_0 = 0.1482 + j 0.2003 = 0.2492 \angle 53.50^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_0} = \frac{1 \angle 0^\circ}{0.0677 \angle 66.52^\circ + 0.0677 \angle 66.52^\circ + 0.2492 \angle 53.50^\circ} = 2.615 \angle -58.09^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = 3I_{a0} = 3 (2.615 \angle -58.09^\circ) = 7.847 \angle -58.09^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_{BASE} = \frac{1 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 440 \text{ V}} = 1312.1597 \text{ A}$$

$$I_a = (7.847)(1312.1597) = \underline{10296.8488 \text{ AMPERES}}$$

A partir de la corriente I_{falla} encontrada en las terminales de los motores se está en la posibilidad de calcular el calibre del cable de puesta a tierra de los motores

APENDICE B

CALCULO DE CORTO CIRCUITO MONOFASICO

PROYECTO SUBESTACION ROSARIO 2000 kVA, 23 kV

OBJETIVO:

Verificar que los potenciales de contacto y de paso en la red de tierras de la subestación no excedan los valores límites de los potenciales tolerables por el cuerpo humano

Verificar también que la resistencia a tierra de la red se encuentre dentro del rango de los valores recomendados por las normas.

PROCEDIMIENTO:

Esta basada en la norma IEEE STD 80-1986 IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING.

REFERENCIAS:

Corriente de corto circuito monofásica en bus de acometida 23 kV, de Luz y Fuerza 8800 A (bus 1420 Azcapotzalco), la red de tierras se construirá en una área de 20 m de largo y 15 m de ancho en el área de la subestación.

DATOS PARA EL CALCULO:

$I_{cc1\phi} = 8800$ [A] (Bus 1420 Azcapotzalco)
 $V = 23$ [kV]
 $\rho_i = 25$ [Ω -m]
 $\rho_s = 6000$ [Ω -m] (firme de concreto)
 $h = 0.6$ [m]
 $L_{red} = 10$ [m]
Ancho de red = 4 [m]
 $t_f = 0.5$ [s]
Relación X/R en el bus de falla = 10
 $L_{falla} = 3$ [m]
 $D_{falla} = 0.0159$ [m]
Espesor capa de concreto = 10 [cm]

DISEÑO DE LA RED:

Factor de decremento D_f

Para $X'R = 10$ y $t_f = 0.5$ [s] de tabla 4 $\Rightarrow D_f = 1.026$

FACTOR DE PROYECCION C_p :

Considerando que no existe incremento futuro de I_{cc}

$$\therefore C_p = 1$$

CORRIENTE MAXIMA DE MALLA DE LA ECUACION 30:

$$I_{c1} = I_{cc} D_f C_p = (8800)(1.026)(1) = 9028.8 \text{ [A]}$$

SECCION DE CONDUCTOR DE LA ECUACION 25:

$$A_{cmals} = 1973.52 I \sqrt{\frac{\frac{t_c \alpha_r \rho_r \times 10^{-4}}{TCAP}}{\ln \left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right) \right]}}$$

De la tabla No. 2:

α_r = Coeficiente Térmico de Resistividad a la Temperatura a 20 °C = 0.00378

ρ_r = Resistividad del Conductor a 20 °C = 4.397

TCAP = Factor de Capacidad Térmica = 3.846

T_m = Temperatura Máxima Permissible de Fusión = 1083 °C

T_a = Temperatura Ambiente = 40 °C

K_0 = 245

t_c = Tiempo de Corriente de Falla = 0.5 segundos

$$A_{cmals} = 1973.52 (9028.8) \sqrt{\frac{(0.5)(0.00378)(4.397) \times 10^{-4}}{(3.846)}}{\ln \left\{ 1 + \left[\frac{1083 - 40}{245 + 40} \right] \right\}} = 6676.63 \text{ CM} = 6.676 \text{ kCM}$$

Por resistencia mecánica se empleará calibre mínimo 4/0 AWG (211.6 kCM) con diámetro $d = 0.0134$ m.

Factor de reducción (Cs)

Factor de reflexión (K) DE ECUACION 6:

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} = \frac{25 - 6000}{25 + 6000} = -0.99$$

De la figura No 9 $\Rightarrow Cs = 0.55$

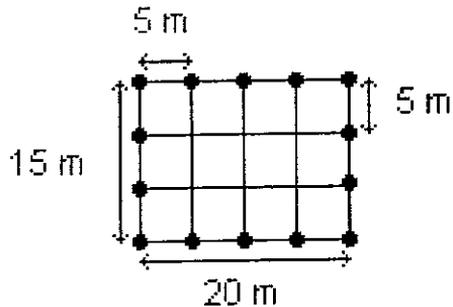
Calculo de Potenciales Tolerables de ecuaciones 20-a y 21-a:

$$I_p = [1000 + 6(0.55)6000] \frac{0.157}{0.5} = 4618.3 [A']$$

$$L = [1000 + 1.5(0.55)6000] \frac{0.157}{0.5} = 1321.1 [V']$$

DISEÑO:

- Paralelas $\Rightarrow 4$
- Transversales $\Rightarrow 5$
- Varillas $\Rightarrow 14$



$$L = L_c + 1.15 L_r$$

$$L = (4 \times 20) + (5 \times 15) + 1.15 (14 \times 3)$$

$$L = 203.3 \text{ m}$$

Cálculo de la resistencia a tierra

$$R_t = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{d} = \frac{25}{(2\pi)(203.3)} \ln \frac{(4)(203.3)}{0.0134} = 0.215 (\Omega)$$

Considerando la siguiente igualdad

$$I_c R_t \leq E_t$$

$$(9028.8)(0.2155) \leq 1321.1$$

$$1945.7 > 1321.1$$

\therefore No Cumple

Como no cumple se procede a los siguientes cálculos:

- Cálculo del valor de “n” de la ecuación 36:

$$\text{Para } E_{t_m} \Rightarrow n \approx \sqrt{n_A n_B}$$

$$n = \sqrt{(4)(5)} = 4.5$$

Para $E_{p_m} \Rightarrow n =$ Mayor número de conductores.

$$n = 5$$

- Cálculo de K_h de la ecuación 34:

$$K_h = \sqrt{1 + h/h_0}$$

$$K_h = \sqrt{1 + 0.6} = 1.2649$$

- Cálculo de K_m de la ecuación 33:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\text{Ln} \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \text{Ln} \frac{8}{\pi(2n-1)} \right]$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\text{Ln} \left(\frac{5^2}{(16)(0.6)(0.0134)} + \frac{[5+(2)(0.6)]^2}{(8)(5)(0.0134)} - \frac{0.6}{(4)(0.0134)} \right) + \frac{1}{1.2649} \text{Ln} \frac{8}{\pi[2(4.5) - 1]} \right]$$

$$K_m = 0.7378$$

- Cálculo de K_i , de la ecuación 35:

$$K_i = 0.656 + 0.172n$$

$$K_i = 0.656 + (0.172)(4.5) = 1.43$$

- Potencial de contacto en la malla de la ecuación 37:

$$E_c = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L_c + 1.15 L_r} = \frac{(25)(0.7378)(1.43)(9028.8)}{203.3} = 1171.4 [V]$$

- Potencial de paso en la malla de la ecuación 39:

$$E_{pm} = \frac{\rho K_i K_j G}{L_r + 1.15L_r}$$

Donde.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right]$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{(2)(0.6)} + \frac{1}{5.6} + \frac{1}{5} (1 - 0.5^3) \right] = 0.3778$$

$$K_i = 0.656 + \{(0.172)(5)\} = 1.516$$

$$E_{pm} = \frac{(25)(0.3778)(1.516)(9028.8)}{203.3} = 635.9[V]$$

- Comparación de potenciales.

$$E_{\text{malla}} < E_t \\ 1171.4 < 1321.1$$

$$E_{pm} < E_p \\ 635.9 < 4618.3$$

Como la malla cumple por potenciales, el diseño es correcto.

- Resistencia a tierra de la malla de la ecuación 28:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_r} + \frac{1}{20A} \left(1 + \frac{1}{1+h} \frac{1}{20/A} \right) \right]$$

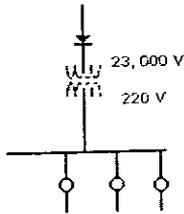
$$R_g = 25 \left[\frac{1}{203.3} + \frac{1}{(20)(300)} \left(1 + \frac{1}{1+0.6} \frac{1}{20/300} \right) \right] = 0.72[\Omega]$$

La malla tiene una $R_g < 5$ ohms que es el valor máximo permitido para subestaciones de distribución

CALCULO DEL SISTEMA DE TIERRAS PARA EQUIPO ELECTRICO

OBJETIVO:

Realizar un sistema de tierras para aterrizar el equipo eléctrico de baja tensión, en base a la corriente de corto circuito que aporta el transformador



Datos del Transformador:

$$kVA = 2000$$

$$kV = 23 / 0.22$$

$$Z\% = 8.59$$

$$I_s = \frac{kVA}{kV} = \frac{2000}{0.22} = 9090.91 [A]$$

$$I_{c3\phi} = \frac{I_s}{Z} = \frac{9090.91}{0.0859} = 105830.15 [A]$$

Calculando la sección del conductor con ayuda de la ecuación 24:

$$A_{cmbs} = I \sqrt{\frac{t_c \sigma_r \rho_r \times 10^{-4}}{TCAP} \ln \left\{ 1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right) \right\}}$$

De la tabla No. 2:

α = Coeficiente Térmico de Resistividad a la Temperatura a 20 °C = 0.00378

ρ_r = Resistividad del Conductor a 20 °C = 4.397

TCAP = Factor de Capacidad Térmica = 3.846

T_m = Temperatura Máxima Permissible de Fusión = 1083 °C

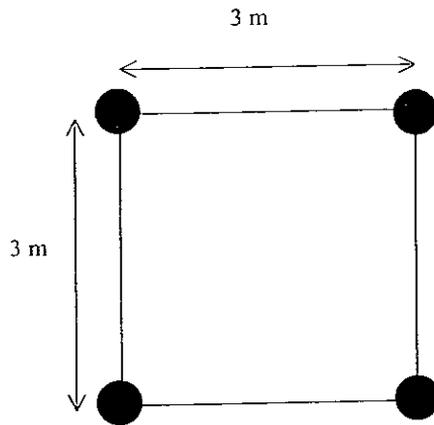
T_a = Temperatura Ambiente = 40 °C

K_0 = 245

t_c = Tiempo de Corriente de Falla = 0.5 segundos

$$A_{cmis} = 1973.52 \sqrt{\frac{(0.5)(0.00378)(4.397) \times 10^{-4}}{(3.846)}} \frac{1}{\ln \left\{ 1 + \left[\frac{1083 - 40}{245 + 40} \right] \right\}} = 22.89 \text{ mm}^2$$

El conductor calibre 3 AWG tiene una sección 26.7 mm^2 , pero se utilizará un conductor calibre 2 AWG (33.6 mm^2) por ser comercial y se propone el siguiente arreglo para aterrizar el equipo eléctrico.



CALCULO DE RESISTENCIA A TIERRA DEL SISTEMA DE TIERRAS ELECTRONICO.

OBJETIVO:

Verificar que la resistencia a tierra del sistema electrónico se encuentre dentro de los valores recomendados por las normas.

PROCEDIMIENTO:

Está basado en la norma IEEE Std 142-1991, Recommended Practice For Grounding Of Industrial And Commercial Power Systems (ANSI).

RESISTENCIA DE TERRENO:

De las mediciones realizadas en campo, el valor de resistividad del terreno a emplear en los calculos es de 25 [Ω -m].

RESISTENCIA A TIERRA DE UN ELECTRODO (VARILLA):

Longitud = 3.0 m.

Diámetro = 0.016 m (5/8").

$$R = \frac{25}{2\pi(3)} \ln \frac{(2.943)(3)}{0.016} = 8.373 [\Omega]$$

Si se considera una resistencia total a tierra para el sistema electrónico igual o menor a 3 Ohms.

Para n varillas en paralelo, la resistencia total será:

$$R_1 = \frac{R}{n} F_M$$

Donde :

R = Resistencia a tierra de una variable en ohms

n = Número de varillas

F_M = Factor de multiplicación (IEEE Std 142-1991)

Para dos varillas.

$$R_T = \frac{8.373}{2} (1.16) = 4.856 [\Omega]$$

Ejemplo de un sistema de tierras para Equipo Electrónico

Para tres varillas:

$$R_T = \frac{8.373}{3} (1.16) = 3.60 [\Omega]$$

Para cuatro varillas:

$$R_T = \frac{8.373}{4} ($$

Como el valor de R_T es menor de 3Ω se emplearán 4 varillas en paralelo espaciadas como mínimo la longitud de una varilla (3 m) con una resistencia a tierra con una resistencia a tierra de Ω .

