



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE UN SISTEMA PUESTA A TIERRA DE UNA SUBESTACIÓN DE  
POTENCIA ELÉCTRICA COMPARANDO LAS NORMAS ANSI / IEEE STD 80-2000 Y  
CEN EN 50522**

**Cesar Fernando Sipaque Quiñonez**

Asesorado por el Ing. Byron Alejandro Pérez Ramos

Guatemala, marzo de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN SISTEMA PUESTA A TIERRA DE UNA SUBESTACIÓN DE  
POTENCIA ELÉCTRICA COMPARANDO LAS NORMAS ANSI / IEEE STD 80-2000 Y  
CEN EN 50522**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**CESAR FERNANDO SIPAQUE QUIÑONEZ**  
ASESORADO POR EL ING. BYRON ALEJANDRO PÉREZ RAMOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, MARZO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Armando Gálvez Castillo
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carillo
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE UN SISTEMA PUESTA A TIERRA DE UNA SUBESTACIÓN DE  
POTENCIA ELÉCTRICA COMPARANDO LAS NORMAS ANSI/IEEE STD 80-2000 Y  
CEN EN 50522**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 28 de abril de 2014.



**Cesar Fernando Sipaque Quiñonez**

Guatemala, 28 de septiembre de 2018

Ingeniero  
Saúl Cabezas Duran  
Coordinador del Área de Potencia  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Universidad de San Carlos de Guatemala

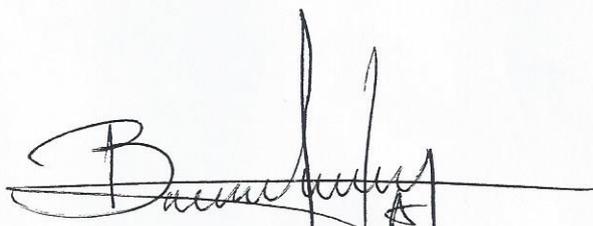
Estimado Ingeniero Cabezas:

Tras haber asesorado al estudiante universitario CESAR FERNANDO SIPAQUE QUIÑONEZ con carné 2003 – 12501 en el desarrollo del trabajo de graduación titulado: **“DISEÑO DE UN SISTEMA PUESTA A TIERRA DE UNA SUBESTACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA COMPARANDO LAS NORMAS ANSI / IEEE STD 80-2000 Y CEN EN 50522”** y haber revisado y corregido su contenido, sin encontrar alguna objeción al respecto, doy mi aprobación al mencionado trabajo de graduación.

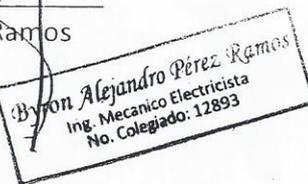
Por lo tanto, el autor de este trabajo de graduación y yo como asesor, nos hacemos responsables del contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, me suscribo de usted.

Atentamente,



Ing. Byron Alejandro Pérez Ramos  
Ingeniero Electricista  
Colegiado 12,893  
Asesor





FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 89. 2018.  
12 DE NOVIEMBRE 2018.

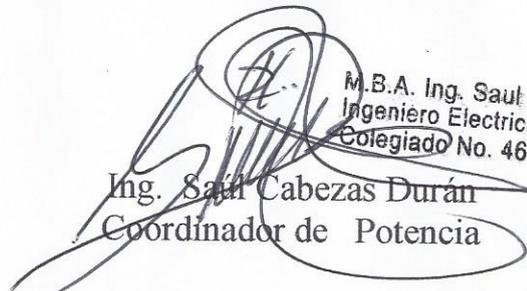
Señor Director  
Ing. Otto Fernando Andrino González  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE UN SISTEMA PUESTA A TIERRA DE UNA SUBESTACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA COMPARANDO LAS NORMAS ANSI/IEEE STD 80-2000 Y CEN EN 50522**, del estudiante; Cesar Fernando Sipaque Quiñonez, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

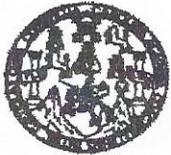
Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,  
**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

  
Ing. Saul Cabezas Durán  
Coordinador de Potencia

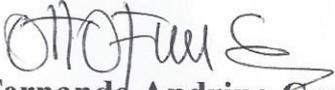
M.B.A. Ing. Saul Cabezas Durán  
Ingeniero Electricista  
Colegiado No. 4648





REF. EIME 89. 2018.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen el Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante: CESAR FERNANDO SIPAQUE QUIÑONEZ titulado: DISEÑO DE UN SISTEMA PUESTA A TIERRA DE UNA SUBESTACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA COMPARANDO LAS NORMAS ANSI/IEEE STD 80-2000 Y CEN EN 50522, procede a la autorización del mismo.

  
Ing. Otto Fernando Andrino González



GUATEMALA, 14 DE NOVIEMBRE 2018.

Universidad de San Carlos  
de Guatemala

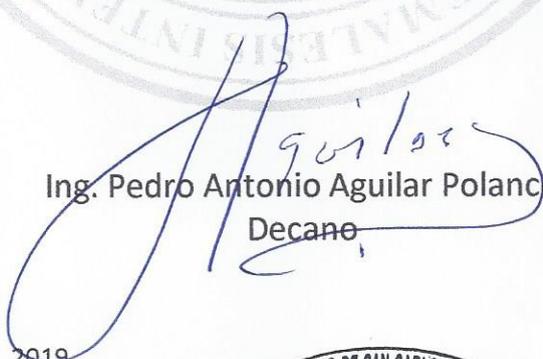


Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 137.2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE UN SISTEMA PUESTA A TIERRA DE UNA SUBESTACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA COMPARANDO LAS NORMAS ANSI/IEEE STD 80-2000 Y CEN EN 50522**, presentado por el estudiante universitario: **Cesar Fernando Sipaque Quiñónez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, marzo de 2019

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por permitirme llegar a este día, darme la sabiduría, salud y oportunidad de lograrlo.
- Mis padres** Gustavo Sipaque y Mirna Quiñonez, por su esfuerzo, apoyo y amor incondicional durante este trayecto, a ustedes les debo todo, mil gracias.
- Mi hija** Marcela, a ti que te llevo todo el tiempo en mi pensamiento y en mi corazón este triunfo va dedicado a ti.
- Mis hermanos** Pamela y Jorge Sipaque, por su cariño y apoyo brindado siempre.
- Mis tías** Rosalba Quiñónez y Esperanza Sipaque, porque son una importante ayuda e influencia en mi vida y en mi carrera.
- Mis primos** Por su ayuda y cariño incondicional.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por ser mi casa de estudios, la que me brindó la oportunidad de llegar a ser un profesional.

**Facultad de Ingeniería**

Por ser la que me brindó los conocimientos adquiridos en mi carrera.

**Mis amigos de  
la Facultad**

Marlon, Henry, Julio, Hugo, Byron, Juan, Josué, Abimael, Luis, Hamilton, Leonel, Carlos, José por los momentos vividos dentro y fuera de la universidad.

**Mi asesor de tesis**

Byron Pérez, por ser parte de este triunfo al llevar a cabo sus consejos profesionales.

**Mi coordinador**

Saúl Cabezas, por su asesoría y apoyo profesional.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XIII
GLOSARIO .....	XV
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. ANTECEDENTES GENERALES .....	1
1.1. Partes del sistema de puesta a tierra .....	1
1.1.1. El suelo.....	1
1.1.2. Resistividad .....	4
1.1.3. Electrodo de puesta a tierra .....	4
1.1.4. Mallas de puesta a tierra .....	5
1.2. Métodos de medición de resistividad del suelo .....	5
1.2.1. Método de medición de resistencia de una varilla ....	5
1.2.2. Método de medición de resistencia de electrodos ya enterrados.....	6
1.2.3. Método Wenner .....	7
1.2.4. Método espaciado desigual .....	9
1.3. Tensiones de paso, contacto y malla .....	10
1.3.1. Tensión de paso .....	10
1.3.2. Tensión de contacto .....	11
1.3.3. Tensión de malla .....	12
1.3.4. Tensión de transferencia .....	12

1.4.	Efecto en las personas de un mal sistema de puesta a tierra .....	13
1.4.1.	Efectos fisiológicos del pasaje de la corriente en el ser humano.....	13
1.4.2.	Corrientes tolerables .....	14
1.4.3.	Resistencia eléctrica del cuerpo humano .....	15
1.4.4.	Influencia de la frecuencia.....	15
1.5.	Corrientes de cortocircuito .....	17
2.	NORMA DE PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES DE TENSIÓN SUPERIOR A 1 KV EN CORRIENTE ALTERNA UNE 50522 .....	19
2.1.	Requisitos fundamentales .....	20
2.1.1.	Corrientes de cortocircuito.....	21
2.1.2.	Criterios de seguridad .....	22
2.1.3.	Requisitos funcionales .....	23
2.2.	Diseño de sistemas de tierra.....	24
2.2.1.	Dimensionado en relación con la corrosión y la resistencia mecánica.....	24
2.2.2.	Dimensionamiento en relación con la resistencia térmica.....	26
2.2.3.	Cálculo de la corriente asignada en los conductores de tierra y de los electrodos de tierra .....	26
2.3.	Dimensionado en relación con las tensiones de contacto.....	27
2.3.1.	Medidas para la cumplimiento de las tensiones de contacto admisibles.....	30
2.3.2.	Proceso de diseño.....	30

2.3.3.	Tensión de contacto y la corriente que pasa por el cuerpo humano .....	34
2.4.	Medidas para evitar tensiones transferidas .....	36
2.5.	Construcción de sistemas de puesta a tierra.....	37
2.5.1.	Montaje de los electrodos de tierra y de los conductores de tierra .....	37
2.5.2.	Rayos y sobretensiones transitorias .....	38
2.5.3.	Medidas para la puesta a tierra del equipo de las instalaciones .....	39
2.6.	Mediciones .....	39
2.7.	Mantenimiento del sistema de puesta a tierra .....	39
3.	NORMA IEEE SOBRE SEGURIDAD DE LAS PUESTAS A TIERRA PARA SUBESTACIONES AC ANSI/IEEE STD 80-2000 .....	41
3.1.	Principales consideraciones de diseño.....	41
3.1.1.	Condiciones de riesgo .....	44
3.2.	Rango de corriente tolerable .....	45
3.2.1.	El efecto de la frecuencia .....	45
3.2.2.	El efecto de la duración y la magnitud .....	46
3.3.	Límite de corriente tolerable por el cuerpo .....	48
3.3.1.	Fórmula de la magnitud y duración de la corriente.....	48
3.4.	Circuito de tierra accidental .....	50
3.4.1.	Trayectorias de corriente a través del cuerpo.....	51
3.4.2.	Circuitos equivalentes accidentales.....	52
3.4.3.	Criterio del voltaje tolerable .....	58
3.5.	Principales consideraciones del diseño .....	60
3.5.1.	Aspectos básicos del diseño de la rejilla .....	62
3.5.2.	Selección de los conductores y conexiones. ....	63

3.5.2.1.	Selección de los materiales para conductores y problemas relacionados a la corrosión.....	64
3.5.3.	Los factores del tamaño de los conductores .....	65
3.5.3.1.	Corrientes simétricas.....	66
3.5.4.	Características del suelo .....	68
3.5.4.1.	El efecto del gradiente de voltaje .....	68
3.5.4.2.	Efecto de la magnitud de corriente .....	69
3.5.4.3.	El efecto de la humedad, temperatura y contenido químico .....	69
3.5.4.4.	Estructura del suelo y selección del modelo de suelo .....	70
3.5.4.5.	Mediciones de resistividad .....	70
3.5.4.6.	Interpretación de las medidas de resistividad del suelo .....	71
3.5.4.7.	Suposición de suelo uniforme .....	72
3.5.4.8.	Modelo de suelo de dos capas.....	73
3.5.4.9.	Modelo de suelo de dos capas por el método gráfico.....	74
3.5.4.10.	Evaluación de la resistencia de tierra...	76
3.5.4.11.	Ecuaciones de Schwarz .....	78
3.5.5.	Determinación de la corriente máxima de rejilla.....	81
3.5.5.1.	Factor de decremento .....	81
3.5.5.2.	Corriente simétrica de rejilla .....	82
3.5.5.3.	Relación X/R .....	82
3.5.6.	Cálculo de voltajes máximos de malla y de paso ....	82
3.5.7.	Voltaje de malla .....	83
3.5.8.	Voltaje de paso.....	83
3.6.	Diseño del sistema de aterrizaje .....	84

3.6.1.	Procedimiento de diseño .....	85
4.	DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA PARA UNA SUBESTACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA .....	89
4.1.	Parámetros de diseño.....	89
4.2.	Norma de puesta a tierra en instalaciones de tensión superior a 1 KV en corriente alterna UNE 50522.....	90
4.2.1.	Datos caso 1.....	90
4.2.1.1.	Cálculo del conductor .....	91
4.2.1.2.	Datos del terreno .....	93
4.2.1.3.	Cálculo de corriente de falla y corriente de diseño .....	95
4.2.1.4.	Cálculo de las tensiones máximas de contacto y de paso.....	95
4.2.1.5.	Cálculo de la resistencia de puesta a tierra .....	97
4.2.1.6.	Cálculo de la elevación del potencial a tierra y la tensión de malla máxima en la red.....	97
4.2.1.7.	Comparación de la tensión de malla máxima en la puesta a tierra con las tensiones tolerables.....	98
4.2.2.	Datos caso 2.....	98
4.2.2.1.	Cálculo del conductor .....	99
4.2.2.2.	Datos del terreno .....	101
4.2.2.3.	Cálculo de corriente de falla y corriente de diseño .....	103

4.2.2.4.	Cálculo de las tensiones máximas de contacto y de paso. ....	103
4.2.2.5.	Cálculo de la resistencia de puesta a tierra .....	105
4.2.2.6.	Cálculo de la elevación del potencial a tierra y la tensión de malla máxima en la red.....	105
4.2.2.7.	Comparación de la tensión de malla máxima en la puesta a tierra con las tensiones tolerables .....	106
4.3.	Norma IEEE sobre seguridad de las puestas a tierra para subestaciones AC ANSI/IEEE STD 80-2000.....	107
4.3.1.	Datos Caso 1.....	107
4.3.1.1.	Cálculo del conductor .....	108
4.3.1.2.	Datos del terreno.....	109
4.3.1.3.	Cálculo de corriente de falla y corriente de diseño.....	111
4.3.1.4.	Cálculo de las tensiones máximas de contacto y de paso .....	111
4.3.1.5.	Cálculo de la resistencia de puesta a tierra .....	112
4.3.1.6.	Cálculo de la elevación del potencial a tierra y la tensión de malla máxima en la red.....	113
4.3.1.7.	Comparación de la tensión de malla máxima en la puesta a tierra con las tensiones tolerables .....	113
4.3.2.	Datos Caso 2.....	114
4.3.2.1.	Cálculo del conductor .....	115

4.3.2.2.	Datos del terreno .....	117
4.3.2.3.	Cálculo de corriente de falla y corriente de diseño .....	119
4.3.2.4.	Cálculo de las tensiones máximas de contacto y de paso.....	119
4.3.2.5.	Cálculo de la resistencia de puesta a tierra .....	120
4.3.2.6.	Cálculo de la elevación del potencial a tierra y la tensión de malla máxima en la red .....	121
4.3.2.7.	Comparación de la tensión de malla máxima en la puesta a tierra con las tensiones tolerables.....	121
CONCLUSIONES .....		123
RECOMENDACIONES .....		125
BIBLIOGRAFÍA.....		127
APÉNDICE.....		129



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Posición de los electrodos método Wenner .....	7
2.	Configuración de los electrodos método Schlumberger .....	9
3.	Diagrama tensión de paso .....	11
4.	Esquema tensión de contacto .....	12
5.	Modelo de impedancia corporal .....	16
6.	Tensión de contacto permitida .....	29
7.	Diagrama de bloques para el diseño del sistema de puesta a tierra ....	33
8.	Contorno equipotencial de una rejilla a tierra típica con varillas a tierra .....	43
9.	Corriente de fibrilación vrs el peso corporal para diferentes animales.....	49
10.	Exposición al voltaje de toque.....	53
11.	Circuito de impedancias para el voltaje de toque .....	54
12.	Circuito del voltaje de toque .....	55
13.	Exposición al voltaje de paso .....	56
14.	Circuito del voltaje de paso .....	56
15.	Modelo de suelo .....	68
16.	Método gráfico de Sunde .....	76
17.	Diagrama de bloques del procedimiento de diseño .....	87
18.	Comparación de corrientes de fusión.....	93
19.	Datos del terreno.....	94
20.	Comparación de corrientes de fusión.....	96
21.	Comparación de corrientes de fusión.....	101

22.	Ingreso de datos del terreno .....	102
23.	Tensión de toque y paso.....	104
24.	Tensión de toque y paso.....	109
25.	Datos del terreno .....	110
26.	Comparación de corrientes de fusión de conductor.....	117
27.	Ingreso de datos del terreno .....	118

## TABLAS

I.	Valores típicos de resistividad de diferentes suelos.....	2
II.	Dimensiones mínimas para los electrodos de tierra .....	25
III.	Constante para los valores para los materiales más habituales asumiendo una temperatura inicial de 20 °C .....	27
IV.	Corriente admisible que pasa a través del cuerpo humano .....	34
V.	Impedancia total del cuerpo humano ZT relacionada con la tensión de contacto UT para una trayectoria de corriente de mano a mano .....	35
VI.	Valores calculados de las tensiones de contacto admisibles en función de la duración de la falla.....	36
VII.	Constantes de los materiales.....	67
VIII.	Cálculo del conector .....	92
IX.	Datos del terreno .....	94
X.	Datos para cálculo de corriente .....	95
XI.	Tensiones tolerables.....	96
XII.	Diseño preliminar .....	97
XIII.	Cálculo del EPR y tensiones de retícula .....	98
XIV.	Comparación de la tensión de malla.....	98
XV.	Selección del conductor.....	100
XVI.	Ingreso de datos del terreno .....	102
XVII.	Ingreso de datos para el cálculo de la corriente de falla .....	103

XVIII.	Tensiones tolerables .....	104
XIX.	Diseño preliminar .....	105
XX.	Cálculo de EPR y tensiones de retícula .....	106
XXI.	Comparación.....	106
XXII.	Selección del conductor .....	108
XXIII.	Datos del terreno.....	110
XXIV.	Ingreso de datos para el cálculo de la corriente de falla .....	111
XXV.	Tensiones tolerables .....	112
XXVI.	Diseño preliminar .....	112
XXVII.	Cálculo del GPR y tensión de retícula.....	113
XXVIII.	Comparación.....	114
XXIX.	Selección del conductor .....	116
XXX.	Ingreso de datos del terreno .....	118
XXXI.	Ingreso de datos para el cálculo de corriente de falla .....	119
XXXII.	Tensiones tolerables .....	120
XXXIII.	Diseño preliminar .....	120
XXXIV.	Cálculo del GPR y tensiones de retícula .....	121
XXXV.	Comparación.....	122



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$\delta$	Conductividad
$\Omega$	Ohm
$\pi$	Pi
$\rho$	Resistividad eléctrica
$\Theta_i$	Temperatura inicial en grados centígrados
$\Theta_f$	Temperatura final en grados centígrados



## GLOSARIO

<b>Aterrizado</b>	Es un sistema, circuito o aparato provisto de una tierra con el propósito de establecer un circuito de retorno a tierra y mantener su potencial casi igual al potencial del planeta tierra.
<b>Aterrizaje</b>	Es una conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por medio de la cual un circuito eléctrico o equipo se conecta a tierra o en elementos conductores de relativamente extensión grande en vez del planeta Tierra.
<b>Corriente a tierra</b>	Es una corriente fluyendo dentro o fuera del planeta Tierra o su equivalente trabajando como aterrizaje.
<b>Electrodo de Tierra</b>	Es un conductor introducido en la tierra y se usa para recoger o disipar corriente desde o hacia el interior del planeta Tierra.
<b>Factor de decremento</b>	Es un factor de ajuste que se usa conjuntamente con los parámetros de la corriente simétrica de falla a tierra en los cálculos de aterrizaje orientados con seguridad. Determina el equivalente rms de la onda de corriente asimétrica para una duración de falla dada.

<b>Factor de división de la corriente de falla</b>	Es un factor que representa al inverso de la relación de la corriente simétrica de falla a la parte de la corriente que fluye entre la rejilla de aterrizaje y en los alrededores del planeta Tierra.
<b>Impedancia de puesta a tierra</b>	Impedancia a una frecuencia dada entre un punto específico de un sistema, instalación o equipo y la tierra de referencia.
<b>Malla de tierra</b>	Es una placa sólida metálica o un sistema de conductores sin cubierta con espacios estrechos que se conectan y con frecuencia se colocan a pocas profundidades sobre una rejilla de tierra o en otros sitios de la superficie de la Tierra.
<b>Relación X/R</b>	Es la relación entre la reactancia y la resistencia del sistema. Esto es un indicador de la disminución en el valor de cualquier compensación de DC. Un valor grande X/R corresponde a una constante de tiempo grande y una razón baja de caída.
<b>Resistividad de puesta a tierra</b>	Parte real de la impedancia de puesta a tierra.
<b>Resistividad eléctrica del suelo</b>	Resistividad típica de una muestra de suelo.
<b>Sistema de aterrizaje</b>	Comprende todas las interconexiones aterrizadas instaladas en un área específica.

<b>Sistema de puesta a tierra</b>	Conjunto de conexiones y dispositivos necesarios para poner a tierra un equipo o un sistema, por separado o conjuntamente.
<b>Subestación eléctrica</b>	Parte de un sistema eléctrico, concentrado en una determinada ubicación que incluye principalmente los extremos de líneas de transporte o distribución, aparataje y edificaciones que también pueden incluir transformadores. Generalmente incluye las instalaciones necesarias para el sistema de seguridad y control, por ejemplo los dispositivos de protección.
<b>Voltaje de malla</b>	Es el voltaje máximo de toque dentro de una malla de una rejilla de tierra.
<b>Voltaje de paso</b>	Es la diferencia de potencial en la superficie terrestre que experimenta una persona a una distancia de un metro con el pie sin tener contacto con cualquier objeto aterrizado.
<b>Voltaje de toque</b>	Es la diferencia de potencial entre el aumento del potencial de la tierra y el potencial de la superficie en un punto donde una persona se encuentre de pie y al mismo tiempo tenga una mano en contacto con una estructura aterrizada.



## RESUMEN

El sistema de puesta a tierra provee un camino de baja impedancia para drenar la corriente de falla a tierra, corrientes de fuga y disturbios presentes en las redes de la energía eléctrica.

Los sistemas de puesta a tierra son necesarios para mantener la seguridad del personal, el desempeño del equipo porque sin ellos se presentan riesgos de sufrir accidentes o dañar los equipos eléctricos dentro de una instalación, ocasionada por desbalance de fases, descargas atmosféricas, corrientes de fuga, entre otros.

Debido a la importancia que tiene un sistema de tierra dentro de una instalación eléctrica, se presenta la necesidad de llevar a cabo un riguroso estudio alrededor de un sistema de puesta a tierra, para proponer posibles soluciones, confiables y seguras garantizando con esto que los sistemas eléctricos estén sólidamente aterrizados, así como proponer mejoras a sistemas ya existentes.

El presente trabajo es la comparación de las normas para puestas a tierra europea y americana, estas son la norma americana ANSI/IEEE STD 80-2000 y la norma europea CEN EN 50522, estas se seleccionaron con base en la norma americana que se usa comúnmente en Guatemala, mientras la europea es la que rige a gran parte del viejo continente.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Realizar un diseño asistido por un software de un sistema de puesta a tierra para subestaciones eléctricas de potencia comparando las normas CEN EN 50522 y la ANSI/IEEE STD 80-2000.

### **Específicos**

1. Revisar los métodos utilizados para el sistema de tierras en subestaciones, con enfoque a seguridad, desarrollando criterios para un diseño seguro.
2. Diseñar un sistema de puesta a tierra funcional, aplicando las normas CEN EN 50522 y ANSI/IEEE STD 80-2000.
3. Establecer las diferencias entre las normas la CEN EN 50522 Y ANSI/IEEE STD 80-2000 de puesta a tierra, con base en parámetros y resultados obtenidos.



## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de puesta a tierra en subestaciones de potencia velan por la seguridad de los seres vivos, que se encuentren sobre o en las cercanías de una subestación eléctrica durante un eventual traspaso de corriente hacia el suelo. A nivel técnico la red de puesta a tierra busca garantizar una referencia de potencial, permitir la circulación de corrientes no equilibradas y con el diseño adecuado velar por la correcta inversión de los recursos asignados.

Generalmente para estos diseños de sistemas de puesta a tierra se deben hacer referencias a normas que recopilan la experiencia, conocimientos del tema y buscan contar con todos los parámetros de seguridad. Las aplicadas al país son provenientes principalmente de Estados Unidos, pero se debe conocer que existen otras para este tipo de diseño que también velan por la seguridad de los equipos y usuarios, como es el caso de la europea vigente para todo este continente.

Las normas europea y americana se mantienen en continua actualización y la propuesta corresponde a comparación de las vigentes, se analizan los parámetros de diseño y el cálculo que deben ser considerados en un sistema debido a que el costo de los equipos instalados en una subestación de distribución o de potencia es elevado, el buen funcionamiento y tiempo de vida útil depende en gran parte a la solidez y confiabilidad de este sistema, y es conveniente orientar al desarrollo de un sistema más efectivo y eficaz.

El presente trabajo busca comparar a nivel técnico las ventajas y desventajas de cada norma y así comparar cual es la de mayor aplicación en el país.

# 1. ANTECEDENTES GENERALES

Son conexiones de baja impedancia con la suficiente capacidad de disipar corriente, para prevenir almacenamiento de carga eléctrica que pueda resultar un peligro para los equipos conectados y/o las personas.

Se define la puesta a tierra como:

Un conjunto de conductores eléctricos (cables y electrodos) directamente enterrados en el suelo y distribuidos a través de una instalación especialmente diseñada para soportar corrientes excepcionales en caso de falla o descargas atmosféricas, entre otras eventualidades.

La red de tierra permite la circulación de corrientes que puedan aparecer en la instalación y si ésta se combina con la protección diferencial, esta asegura la protección de las personas y animales contra contactos indirectos, cerrándose el circuito a través de las masas metálicas de los aparatos<sup>1</sup>.

El propósito del aterrizaje en las subestaciones eléctricas es dar seguridad a las personas, equipos y brindar una trayectoria de baja impedancia a las corrientes de falla.

## 1.1. Partes del sistema de puesta a tierra

Todo sistema de puesta a tierra estará constituido por el conjunto de conductores, así como sus derivaciones y empalmes que conectan los elementos que deban quedar puestos a tierras con los electrodos.

### 1.1.1. El suelo

El suelo es la parte más exterior de la corteza terrestre, que está compuesta de varios materiales minerales que se fueron asentando en el

---

<sup>1</sup> CANELA MORALES, Jose Guadalupe. *Diseño e instalacion de sistema de puesta a tierra*. p. 10.

durante millones de años, este se clasifica por diferentes circunstancias ya sea por funcionalidad o por sus características físicas. Por funcionalidad se encuentran: suelo arenoso, calizo, humíferos, arcillosos, pedregosos y mixtos.

“En los problemas de Ingeniería de puesta a tierra uno de los factores decisivos para el dimensionamiento y comportamiento de un sistema de tierra es la condición del suelo a través de este van a circular las líneas de corriente; ello involucra entonces no solo el volumen de terreno sobre el cual este emplazada la instalación de tierra, sino también el de sus alrededores”.<sup>2</sup>

Otro punto relevante es la resistividad del suelo expresada en [ohm-metro], esta unidad es la resistencia entre dos caras opuestas de un cubo de 1 metro por lado de tierra homogénea, el valor obtenido es ohm-metro<sup>2</sup> por metro. Algunos valores típicos de resistividad se dan en la tabla I.

Tabla I. **Valores típicos de resistividad de diferentes suelos**

<b>Tipos de suelo</b>	<b>Resistencia en ohms Metro</b>
Terrenos pantanosos	1-30
Limo	20-100
Humus	10-150
Turba húmeda	5-100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100-200
Margas del jurásico	30-40
Arena arcillosa	50-500
Arena silíceo	200-300
Suelo pedregoso cubierto de césped	300-500
Suelo pedregoso desnudo	1 500-3 000
Calizas blandas	100-300
Calizas compactas	1 000-5 000
Calizas agrietadas	500-1 000
Pizarras	50-300
Rocas de mica y cuarzo	800

<sup>2</sup> DE LA VEGA ORTEGA, Miguel. *Problemas de ingeniería de puesta a tierra*. p. 18.

Continuación de la tabla I.

Granitos y gres procedentes de alteración	1 500-10 000
Granitos y gres muy alterados	100-600
Hormigón	2 000-3 000
Balasto o grava	3 000-5 000

Fuente: elaboración propia.

Los dos factores principales que afectan el valor de resistividad de suelo son la porosidad del material y el contenido de agua. Porosidad es un término que describe el tamaño y número de huecos dentro del material, lo cual está relacionado con su tamaño de partícula y diámetro del poro. Varía entre 80/90% en el sedimento de lagos, hasta 30/40% en el caso de arena y arcilla no consolidada y menos en piedra caliza consolidada.

La temperatura y el contenido de agua tienen una influencia importante en la resistividad del terreno y luego en el comportamiento del sistema de tierra. Un incremento en el contenido de agua provoca una reducción drástica de la resistividad, hasta alcanzar un 20% del nivel original cuando el efecto tiende a estabilizarse. Minerales y sales disueltas en el agua pueden ayudar a reducir aún más la resistividad, particularmente cuando éstas están produciéndose en forma natural y no terminan diluyéndose con el tiempo. El contenido de agua varía estacionalmente y es probable que origine variaciones en la impedancia del sistema de tierra. Aun cuando existe información respecto del efecto que esto tiene en barras individuales, no se puede aún garantizar el efecto en grandes subestaciones que abarcan una gran área.<sup>3</sup>

“El comportamiento físico de los suelos depende de las propiedades y modo de agregación de sus minerales y de la forma, volumen y relleno (generalmente agua y aire) de los poros. Además de estas relaciones conviene estudiar el efecto que sobre dichas propiedades ejercen la presión y la temperatura”.<sup>4</sup>

---

<sup>3</sup> MORALES OSORIO, Nelson. *Sistema de puesta a tierra*. p. 26.

<sup>4</sup> *Para rayos*. <http://www.para-rayos.com/datos/gel20061.pdf>. Consulta: 29 de julio de 2015.

### 1.1.2. Resistividad

La resistividad eléctrica  $\rho$  de un material describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él. De igual manera se puede definir la conductividad  $\delta$  como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material. La resistencia eléctrica que presenta un conductor homogéneo viene determinada por la resistividad del material que lo constituye y la geometría del conductor.

Para un conductor rectilíneo y homogéneo de sección  $s$  y longitud  $l$  la resistencia eléctrica es:

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

La unidad de resistividad en el Sistema Internacional es el ohm por metro ( $\Omega \cdot m$ ). La conductividad se define como el inverso de la resistividad.

$$\delta = \frac{1}{\rho}$$

La unidad de conductividad en el Sistema Internacional es el siemens (S). La resistividad es una de las magnitudes físicas con mayor amplitud de variación para diversos materiales. Además, su valor depende de diversos factores como la temperatura, humedad o presión.<sup>5</sup>

### 1.1.3. Electrodo de puesta a tierra

Esta es la forma más común de electrodos, porque su costo de instalación es relativamente barato y pueden usarse para alcanzar en profundidad, suelo de baja resistividad, sólo con excavación limitada y relleno. Están disponibles en diversos tamaños, longitudes, diámetros y materiales. La barra es de cobre puro o de acero recubierto de cobre. El tipo recubierto se usa cuando la barra se entierra por medios mecánicos (impacto) ya que el acero usado tiene alta resistencia mecánica. La capa de cobre debe ser de alta pureza y aplicada electrolíticamente. Esto último asegura que el cobre no se deslice al enterrar la barra. En condiciones de suelo más agresivo, por ejemplo cuando hay alto contenido de sal, se usan barras de cobre sólido. Barras de acero inoxidable son más anódicas que el cobre y se usan ante riesgo de corrosión galvánica. Sin embargo, debe considerarse el hecho que el acero inoxidable tiene baja capacidad de transporte de corriente en comparación con el cobre. En cada extremo de la barra hay sectores tratados que permiten disponer de un extremo aguzado, un extremo con una cabeza endurecida o con hilo para atornillar barras adicionales. Es importante en el caso de barras recubiertas, que la capa de cobre se mantenga intacta en la sección fileteada. Algunos fabricantes también tienen una barra taladradora de cabeza de

---

<sup>5</sup> GASULLA FORNER, Manuel. *Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica del subsuelo*. p. 8.

cruz, que es particularmente útil si los acoplamientos de barra tienen un diámetro mayor que la barra. Se asegura que este tipo de cabeza permite enterrar hasta mayor profundidad.<sup>6</sup>

#### **1.1.4. Mallas de puesta a tierra**

Es una placa sólida metálica o un sistema de conductores sin cubierta con espacios estrechos que se conectan y con frecuencia se colocan a pocas profundidades sobre una rejilla de tierra o en otros sitios de la superficie de la tierra. Se trata de obtener una medida extra de protección minimizando el peligro de la exposición a altos voltajes de paso o toque en áreas o lugares de operaciones críticas que frecuentemente utilizan las personas. El enrejado metálico aterrizado son formas comunes de una malla de tierra colocando en o sobre la superficie del suelo o red (malla) de alambre colocada bajo el material superficial.

### **1.2. Métodos de medición de resistividad del suelo**

Existen varias formas o métodos para la medición de la resistividad del suelo, entre ellos se tiene el método Wenner, método de medición de resistencia de una varilla, el método de medición de resistencia de electrodos ya enterrados y el método Schlumberger-Palmer. A continuación, se explica cada uno de los métodos tal y como los presenta *Rodríguez Araya, Michael Eduardo en su tesis "Propuesta metodológica de aterrizamiento en instalaciones comerciales e industriales"*.

#### **1.2.1. Método de medición de resistencia de una varilla**

Es también llamado método de variación de profundidad, consiste en medir la resistencia de puesta a tierra de un electrodo tipo varilla, así como la utilización de los parámetros de la varilla y sustituirlo en esta ecuación, para

---

<sup>6</sup> MORALES OSORIO, Nelson. *Sistema de puesta a tierra*. p. 18.

obtener la resistividad del terreno, muy importante es que solo es aplicable para terrenos homogéneos, éste se basa en la utilización de la siguiente ecuación.

$$\rho = \frac{2\pi LR}{\ln\left(\frac{4L}{a}\right) - 1}$$

Donde:

L= longitud del electrodo

a= radio del electrodo

R= valor de la resistencia leída por el equipo

$\rho$ = resistividad del terreno

Este método es aplicable en áreas pequeñas o sin suficiente espacio para aplicar el método Wenner o de Schlumberger-Palmer así también cuando nuestro instrumento medidor de resistencia sólo tenga tres electrodos.

Consiste en enterrar los electrodos con una separación de 20 cm o 30 cm, y con una profundidad que permita obtener información suficiente para el cálculo de la resistividad, dado las variaciones de la resistencia que presenta la varilla mientras se cambia la profundidad.

### **1.2.2. Método de medición de resistencia de electrodos ya enterrados**

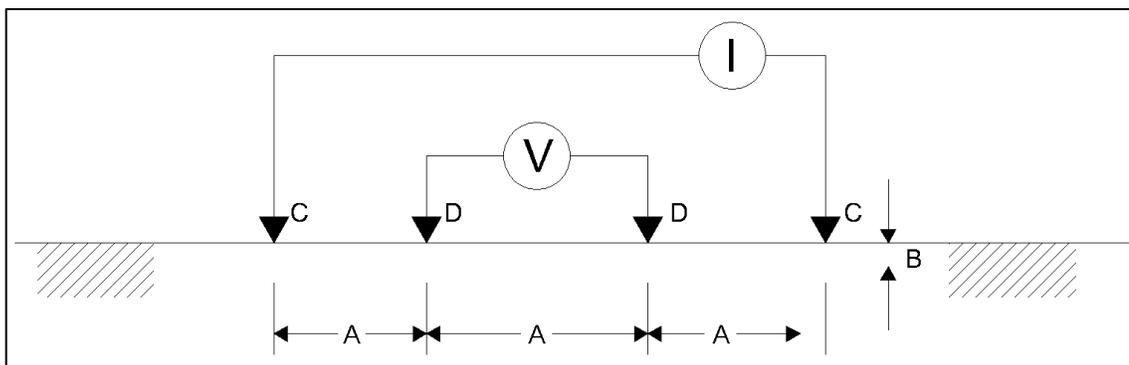
Es un método de emergencia, con un resultado no confiable, aplica para lugares que tiene una puesta a tierra que se desea modificar o construir uno adicional, es aplicable para configuraciones sencillas y consiste en que a partir

del electrodo puesto a tierra se debe medir la resistencia del sistema y calcular la resistividad del suelo.

### 1.2.3. Método Wenner

Consiste en disponer equidistantemente cuatro electrodos en el suelo, a 90 grados con la superficie, los cuatro electrodos tienen que estar a una misma profundidad, la resistividad dependerá de la distancia entre ellos y no del material del electrodo, como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Posición de los electrodos método Wenner



Fuente: Norma IEEE. *Guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system.* p. 81.

Este método funciona de la siguiente manera:

- Se inyecta una corriente directa a los electrodos que están dispuestos en los extremos (C).

- Los dos electrodos que están dispuestos en el centro (D) miden la diferencia de potencial.
- Por medio de la ley de Ohm el dispositivo calcula la resistencia.

A partir de los datos obtenidos se puede calcular la resistividad del suelo a partir de la ecuación:

$$\rho = \frac{4\pi AR}{1 + \frac{2A}{(A^2 + 4B^2)^{0,5}} - \frac{2A}{(4A^2 + 4B^2)^{0,5}}}$$

Donde:

$\rho$  = resistividad promedio a la profundidad en ohm-metro

A= distancia entre electrodos en metros

B= profundidad de enterrado de los electrodos en metros

R= lectura del dispositivo en ohms

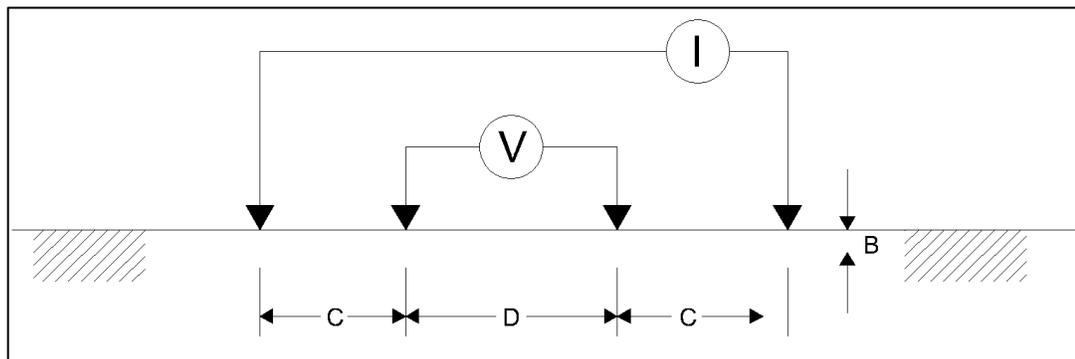
Se dice que la resistividad es un promedio por que se deben realizar varias mediciones a lo largo del terreno y así sacar un promedio, esto para procurar que la resistencia no varíe mucho entre las diferentes posiciones que se tomen, si esto ocurriese, el suelo no sería uniforme y se deberán de tomar otros factores en cuenta.

La variación del espaciamiento de los electrodos para calcular la resistividad se realiza desde unos pocos metros hasta un espaciamiento igual o mayor a la máxima dimensión esperada del sistema de puesta a tierra, se recomienda colocar el primer espaciamiento de los electrodos a 0,5 m, y así sucesivamente hasta cubrir el terreno, y la profundidad de los electrodos debe ser menor a un 10 % de la distancia de separación de los electrodos.

### 1.2.4. Método espaciamiento desigual

Este método es una variante del método Wenner, porque el método Wenner cuando se presentan largas distancias hay un descenso en la magnitud de potencial entre los dos electrodos internos y los equipos que existen para medición, no se les hace posible tomar estos datos; por tal razón se toma la configuración de la figura 2.

Figura 2. Configuración de los electrodos método Schlumberger



Fuente: IEEE. *Guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system.* p.83.

Donde la relación es

$$\rho = \frac{\pi c(na + a)R}{a}$$

c= separación entre el electrodo de corriente con el de tensión

d= separación entre los electrodos de tensión

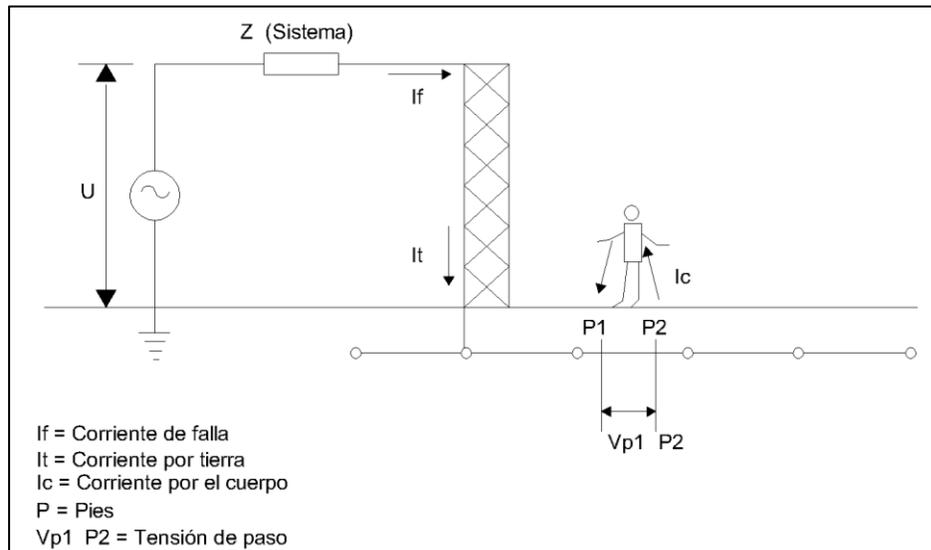
### **1.3. Tensiones de paso, contacto y malla**

La circulación a tierra de las corrientes de falla producen gradientes de tensión sobre la superficie del suelo, en la vecindad de los sistemas de tierras, la tensión que exista entre los pies de una persona parada sobre el suelo, se le conoce como tensión de paso; en tanto que la tensión que existe entre la mano y ambos pies de una persona, se le conoce como potencial de contacto.

#### **1.3.1. Tensión de paso**

La tensión de paso es la diferencia de potencial entre dos puntos de la superficie del terreno, separados por una distancia de un paso, que asimila a un metro en la dirección del gradiente de potencial máximo. Es decir, es la tensión a la que pueda verse sometido el cuerpo humano como consecuencia de una corriente de falla que circula a tierra y es aplicada ente los pies de una persona situados a la distancia de un paso (1 metro).

Figura 3. Diagrama tensión de paso



Fuente: CANELA MORALES, José Guadalupe. *Diseño e instalación de sistemas de puesta a tierra*. p. 78.

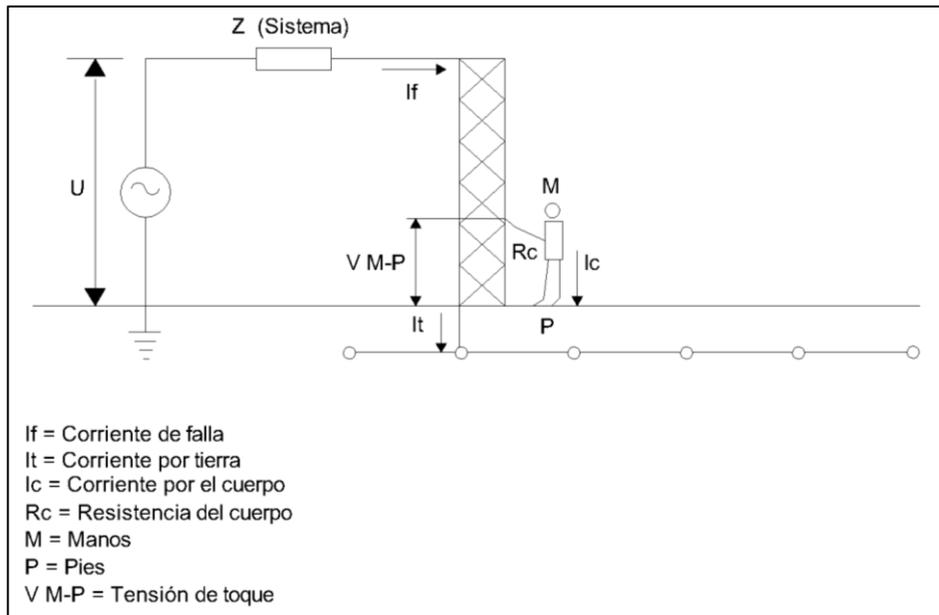
“En resumidas cuentas la tensión de paso es la diferencia de potencial que genera la resistencia que se ubica entre las dos piernas del individuo al tenerlas separadas aproximadamente un metro una de otra y puestas a tierra, y que este individuo se encuentre cerca de un sistema de puestas a tierra”.<sup>7</sup>

### 1.3.2. Tensión de contacto

Es diferencia de tensión entre el GPR y la tensión en la superficie en el punto en donde una persona se para, mientras al mismo tiempo tiene sus manos en contacto con una estructura puesta a tierra.

<sup>7</sup> RODRÍGUEZ ARAYA, Michael Eduardo. *Propuesta metodológica de aterrizamiento en instalaciones comerciales e industriales*. p. 39.

Figura 4. **Esquema tensión de contacto**



Fuente: CANELA MORALES, José Guadalupe. *Diseño e instalación de sistemas de puesta a tierra*. p. 78.

### 1.3.3. Tensión de malla

La tensión de malla es aquel voltaje que se produce cuando se eleva al máximo la tensión de contacto, que se pueda encontrar dentro de una malla de una red (se define como malla a una de las cuadrículas de la red).

### 1.3.4. Tensión de transferencia

La tensión de transferencia es un caso especial de la tensión de contacto, cuando el GPR (máxima elevación de potencial en la red de una subestación con respecto a un punto distante que se asume que está al potencial de tierra remoto) total es transferido hacia o desde la subestación.

## **1.4. Efecto en las personas de un mal sistema de puesta a tierra**

Al circular la corriente de tierra por los electrodos se origina en ellos y en la tierra que los rodea fenómenos de naturaleza eléctrica, magnética y térmica. Así, por ejemplo, desde el punto de vista de la seguridad para las personas, el potencial de electrodo y su distribución sobre el terreno son el problema central por atender, ya que se manifiesta como voltajes de contacto y de paso en ellas si se encuentran en la zona de influencia del sistema de puesta a tierra; tales tensiones no sólo les puede afectar a su salud, sino hasta ocasionarles la muerte.<sup>8</sup>

### **1.4.1. Efectos fisiológicos del pasaje de la corriente en el ser humano**

En la norma IEC 60479-1 se define que la circulación de la corriente eléctrica por el cuerpo humano puede producir principalmente los siguientes efectos nocivos:

- **Tetanización:** es un movimiento incontrolado de los músculos debido a la acción de la corriente eléctrica, con pérdida de control generalmente de brazos y piernas.
- **Asfixia:** significa que si el centro nervioso que regula la respiración se ve afectado por la corriente, puede llegar a producirse un paro respiratorio.
- **Quemaduras:** son el pasaje de la corriente por el cuerpo humano acompañado de disipación de calor por efecto joule, produciendo quemaduras internas y externas.
- **Fibrilación ventricular:** en cardiología se denomina fibrilación a una sucesión de contracciones rápidas y desordenadas de las fibras del

---

<sup>8</sup>. DE LA VEGA ORTEGA, Miguel. *Problemas de ingeniería de puesta a tierra*. p. 41.

miocardio, cuando la fibrilación afecta a los ventrículos es rápidamente mortal. En la mayoría de los accidentes eléctricos fatales, la muerte del afectado se produce por esta causa. La fibrilación ventricular se desencadena cuando una corriente de amplitud suficiente excita las fibras de los ventrículos durante la fracción del ciclo cardíaco en la que se produce la relajación del miocardio. Este período de relajación se denomina período vulnerable y abarca una fracción relativamente pequeña del ciclo cardíaco entre un 10 % y 20 %.

- Otros efectos: efectos fisiológicos tales como las contracciones musculares, dificultades de respiración, incremento en la presión arterial, perturbaciones en la formación y propagación de los impulsos en el corazón, incluida la fibrilación auricular y paros cardíacos temporales, estos efectos usualmente no son mortales y son reversibles.

#### **1.4.2. Corrientes tolerables**

La disciplina tecnológica de la medicina que se ocupa de tales efectos es la electrofisiología; y a partir de una larga serie de experimentos, algunos en personas y muchos en animales, se ha determinado el grado de peligrosidad de la corriente sobre el cuerpo humano, es decir, los valores de corriente y de voltaje que son peligrosos para él, tales magnitudes ya están normalizadas y sirven de base para el diseño de los sistemas de puesta a tierra, los cuales se describen a continuación:

- 1 mA: nivel de percepción, ligera sensación de hormigueo
- 1 a 6 mA: desagradable. No se pierde el control muscular

- 9 a 25 mA: dolor. Dificultad o imposibilidad de soltar un objeto energizado agarrado con la mano.
- 25 a 60 mA: aparecen contracciones musculares que pueden dificultar la respiración excepto en casos de paro respiratorio, los efectos desaparecen cuando la corriente se interrumpe. Cuando existe paro respiratorio con técnicas de resucitación se puede salvar a la persona.
- 60 a 100 mA: ocurre fibrilación ventricular, paro respiratorio, paro cardiaco. Los daños causados son severos y puede morir la persona.

### **1.4.3. Resistencia eléctrica del cuerpo humano**

Entre los factores determinantes tenemos la edad, el sexo, las tasas de alcohol en sangre, el estado de la superficie de contacto (humedad, suciedad, etc.), la presión de contacto.

El valor máximo de resistencia se establece en 3000 Ohmios y el mínimo en 500 Ohmios. La piel seca tiene una gran resistencia, del orden de 4.000 Ohmios para la corriente alterna. En el caso de piel húmeda se reducen los niveles de resistencia hasta 1500 Ohmios, con lo que sólo con 100 V la intensidad que atraviesa el organismo puede producir la muerte. La sudoración también es un factor que puede disminuir la resistencia de la piel. La resistencia en el interior del organismo es, en general, 1000 veces menor que la de la piel, siendo menor para la corriente alterna. En el interior del organismo la resistencia disminuye en proporción directa a la cantidad de agua que presentan los distintos tejidos; así, de mayor a menor resistencia tenemos los huesos, el tendón, la grasa, la piel, los músculos, la sangre y los nervios.<sup>9</sup>

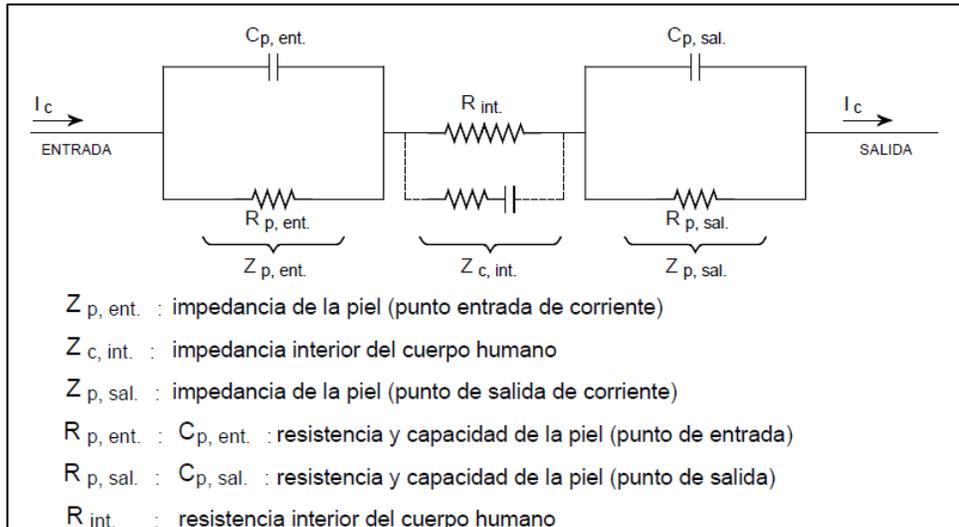
### **1.4.4. Influencia de la frecuencia**

La impedancia del cuerpo humano disminuye con el aumento de la frecuencia, hecho que se puede explicar a partir del modelo de la norma IEC 60479-1 presentado en la figura 5.

---

<sup>9</sup> RIVADENEIRA VERGARA, Luis Armando. *Análisis de fallas y control de protecciones como prevención de riesgos eléctricos*. p. 28.

Figura 5. **Modelo de impedancia corporal**



Fuente: THEVENET, Daniel. *Curso de electricidad, electrónica e instrumentación biomédica con seguridad CEEIBS referido a la norma IEC 60479-1*. p. 61.

Las impedancias de los puntos de entrada y salida del cuerpo (piel) presentan una componente resistiva y otra capacitiva, mientras que la del interior es prácticamente resistiva con un valor próximo a los 500W. Por ello, es la impedancia de la piel la que tiene la contribución más importante a la impedancia total del cuerpo humano, siendo muy influida por el estado de la misma.

Como puede observarse además en el modelo, la impedancia de la piel es la de un circuito paralelo R-C y disminuye su valor con el aumento de la frecuencia.

Para altas frecuencias la impedancia de la piel es prácticamente despreciable, quedando como impedancia total del cuerpo, únicamente la resistencia interna del mismo.

## 1.5. Corrientes de cortocircuito

Desde el punto de vista eléctrico, un cortocircuito es la conexión accidental o intencionada, mediante una resistencia o impedancia relativamente baja, de dos o más puntos de un circuito que está operando en condiciones normales a voltajes diferentes. Un cortocircuito origina aumentos bruscos en las corrientes que circulan por el sistema, ocasionando daños al equipamiento existente. Algunos de los incidentes más graves por cortocircuitos en la red eléctrica son debidos a la caída de un rayo en una línea de transmisión, el incendio de un transformador, la inundación de una subestación, etc.<sup>10</sup>

Al producirse un cortocircuito:

- Los voltajes caen. Los generadores se aceleran porque dejan de transmitir potencia activa y existe elevación del flujo de potencia.
- La corriente que fluye inmediatamente ocurrida la falla en un sistema eléctrico de potencia, se determina mediante las impedancias de los elementos de la red y de las máquinas sincrónicas.

---

<sup>10</sup> *Metodología cálculo de corrientes de cortocircuito.* <http://www.scribd.com/doc/126520010/Metodologia-Calculo-de-Corrientes-de-Cortocircuito>. Consulta: 29 de julio de 2015.



## **2. NORMA DE PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES DE TENSIÓN SUPERIOR A 1 KV EN CORRIENTE ALTERNA UNE 50522**

Este capítulo es un extracto de la normativa europea UNE EN 50522 aprobada por los miembros de CEN (Comité Europeo de Normalización) y es aplicable a especificar los requisitos para el diseño y construcción de los sistemas de puesta a tierra en las instalaciones eléctricas en redes de tensión nominal superior a 1 kV a.c. y frecuencia nominal hasta 60 Hz, a fin de proporcionar la seguridad y el funcionamiento adecuado. Esta normativa es aplicable para los siguientes casos:

- Subestación, incluyendo las subestaciones para alimentación ferroviaria
- Instalaciones eléctricas en mástiles, postes y apoyos
- Subestaciones de conmutación y transformación ubicadas fuera de un área de funcionamiento eléctrico cerrado.
- Instalaciones de potencia incluyendo generadores y transformadores con todos los dispositivos correspondientes y todos los sistemas eléctricos auxiliares.
- El sistema eléctrico de una fábrica, la planta industrial o en otros locales industriales, agrícolas, comerciales o públicos.

Esta norma europea no se aplica al diseño y montaje de los siguientes sistemas de puesta a tierra:

- Líneas aéreas y subterráneas entre las instalaciones separadas
- Ferrocarriles eléctricos
- Equipos e instalaciones de minería
- Instalaciones de lámparas fluorescentes
- Instalaciones en barcos y plataformas marinas
- Equipos electrostáticos (por ejemplo, precipitadores electrostáticos, unidades de spray de pintura).
- Sitios de prueba.
- Equipos médicos, por ejemplo, equipos de rayos X médicos.

## **2.1. Requisitos fundamentales**

Esta norma precisa los criterios para el diseño, el montaje y los ensayos del sistema de puesta a tierra de forma que funcione en todas las condiciones y garantice la seguridad de la vida humana en cualquier lugar al que las personas tengan legítimo acceso. Asimismo, especifica los criterios para asegurar que se mantenga la integridad del equipo conectado y en proximidad al sistema de tierras.

Las instalaciones y los materiales deben ser capaces de soportar las influencias eléctricas, mecánicas, climáticas y ambientales previstas para su emplazamiento.

El diseño deberá tener en cuenta:

- Propósito en que la instalación se desea aplicar.

Los requisitos del usuario tales como potencia, fiabilidad, disponibilidad y la capacidad de la red eléctrica para resistir los efectos de fenómenos transitorios como arranque de grandes motores, interrupciones de suministro cortas y reactivación de la instalación.

- La seguridad de los operarios y el público
- Las influencias del ambiente
- La posibilidad de ampliación y el mantenimiento

### **2.1.1. Corrientes de cortocircuito**

Las instalaciones deben estar diseñadas, construidas y montadas para resistir con seguridad los efectos mecánicos y térmicos que resultan de las corrientes de cortocircuito.

El objetivo es determinar el peor escenario de falla para cada aspecto relevante de los requisitos funcionales y como puedan diferir. Los siguientes tipos de fallas deben ser examinados para cada nivel de tensión presente en la instalación:

- Trifásico a tierra
- Bifásico a tierra
- Monofásico a tierra
- Fases a fase por tierra (falla que se establece por la tierra)

Las posibles fallas dentro y fuera del emplazamiento de la instalación deben ser examinadas para encontrar el punto de la peor falta a tierra.

No se considerarán fallas simultáneas en sistemas de tensión diferentes.

Las instalaciones deben estar protegidas con dispositivos automáticos para desconectar cortocircuitos trifásicos y cortocircuitos entre fases.

Las instalaciones deben estar protegidas ya sea mediante dispositivos automáticos que desconecten fallas a tierra o que indiquen la presencia de una falla a tierra. La selección del dispositivo depende del método de puesta a tierra del neutro.

El valor normalizado de la duración asignada del cortocircuito es 1,0s aunque la duración asignada debe determinarse teniendo en cuenta el tiempo de desconexión de la falta.

### **2.1.2. Criterios de seguridad**

El peligro para los seres humanos es que la corriente fluya a través de la región cardíaca, y que ésta sea capaz de causar fibrilación ventricular. El límite de corriente, para supuestos de frecuencia industrial. Este límite de corriente corporal se traduce a límites de tensión para poder compararlo con las tensiones de contacto y de paso calculadas, teniendo en cuenta:

- Proporción de la corriente fluyendo a través de la región cardíaca.
- Impedancia corporal a lo largo del camino de la corriente.
- Resistencia entre los puntos de contacto del cuerpo y, por ejemplo, estructuras de metal a la mano, guante incluido, pies al sistema de puesta a tierra, incluidos zapatos y grava.
- Duración de la falla.

Tiene que admitirse que incidencia de fallas, la magnitud de la falla de corriente, la duración de la falla y la presencia de seres humanos, son de naturaleza probabilística.

Como normal general, al cumplir los requisitos de la tensión de contacto, se satisface también los de la tensión de paso, dado que los límites de la tensión de paso tolerable son mucho más altos que los de la tensión de contacto, debido al diferente recorrido de la corriente a través del cuerpo.

En instalaciones donde el equipo de alta tensión no está situado en áreas cerradas de operación eléctrica, por ejemplo en el entorno industrial, se debe usar un sistema de puesta a tierra global para prevenir tensiones de contacto resultantes de fallas de alta tensión que exceden el límite de baja tensión dado.

### **2.1.3. Requisitos funcionales**

El sistema de puesta a tierra, sus componentes y conductores equipotenciales deben ser capaces de distribuir y de descargar el defecto de corriente sin exceder los límites térmicos y mecánicos del diseño, basados en el tiempo de funcionamiento de la protección de apoyo.

El sistema de puesta a tierra debe mantener su integridad durante la vida útil esperada de la instalación, tomando en cuenta la corrosión y las limitaciones mecánicas.

El sistema de puesta a tierra debe evitar el daño al equipo debido a la subida excesiva de la tensión, a las diferencias de potencias dentro del sistema de puesta a tierra, y debido a corrientes excesivas fluyendo por caminos auxiliares, que no estén destinados a cargar parte de la falla de corriente.

El sistema de puesta a tierra, combinado con medidas apropiadas, debe mantener las tensiones de paso, contacto y las transferidas dentro del límite de tensión basado en el tiempo de operación normal de los relés de protección y los interruptores.

## **2.2. Diseño de sistemas de tierra**

Parámetros relevantes para el diseño del sistema de puesta a tierra son:

- Valor de corriente de falla
- Duración de la falla
- Características del suelo

### **2.2.1. Dimensionado en relación con la corrosión y la resistencia mecánica**

Los electrodos que se encuentran en contacto directo con el suelo deben ser de materiales capaces de resistir la corrosión (agresión química o biológica, oxidación, formación de un par electrolítico, electrólisis, entre otros). Deben resistir las influencias mecánicas durante su montaje así como durante el funcionamiento normal. Es admisible utilizar armaduras de acero embebidas en los cimientos de hormigón y estructuras de acero o cualquier otro electrodo de tierra natural como parte del sistema de puesta a tierra. Las consideraciones sobre la resistencia mecánica y frente a la corrosión determinan las dimensiones mínimas para los electrodos de tierra que se describen en la tabla 2. Si se utiliza un material diferente, por ejemplo acero inoxidable, este material y sus dimensiones deben cumplir los requisitos de funcionamiento.

Tabla II. Dimensiones mínimas para los electrodos de tierra

Material	Tipo de electrodo	Tamaño mínimo					
		Conductor			Revestimiento/ pantalla		
		Diámetro mm	Sección mm <sup>2</sup>	Espesor mm	Valores simples µm	Valores medios µm	
Acero	Galvanizado en caliente	Varillas <sup>b</sup>		90	3	63	70
		Perfiles (incluidas pletinas)		90	3	63	70
		Tubos	25		2	47	55
		Barras redondas para picas de tierra	16			63	70
		Cable redondo para electrodo de tierra horizontal	10				50
	Con armadura de plomo <sup>a</sup>	Cable redondo para electrodo de tierra horizontal	8			1 000	
	Con armadura de cobre extruido	Barras redondas para picas de tierra	15			2 000	
	Con armadura de cobre electrolítico	Barras redondas para picas de tierra	14,2			90	100
Cobre	Desnudo	Varillas		50	2		
		Cable redondo para electrodo de tierra horizontal		25 <sup>c</sup>			
		Cable trenzado	1,8 <sup>d</sup>	25			
		Tubos	20		2		
	Estañado	Cable trenzado	1,8 <sup>d</sup>	25		1	5
	Galvanizado	Varillas		50	2	20	40
	Con armadura de plomo <sup>a</sup>	Cable trenzado	1,8 <sup>d</sup>	25		1 000	
		Cable redondo		25		1 000	

<sup>a</sup> No es adecuado para empotrar directamente en el hormigón. El uso de plomo no está recomendado por razones ambientales.  
<sup>b</sup> Varillas, enrolladas o cortadas con extremos redondeados.  
<sup>c</sup> En condiciones extremas cuando la experiencia demuestra que el riesgo de corrosión y daño mecánico es extremadamente bajo, puede usarse 16 mm<sup>2</sup>.  
<sup>d</sup> Para cable individual.

Fuente: Norma UNE-EN 50522. *Puesta a Tierra en instalaciones de tensión superior a 1 kV en corriente alterna*. p. 56.

Debido a la resistencia mecánica y a la estabilidad contra la corrosión, las secciones mínimas de los conductores de tierra son:

- Cobre: 16 mm<sup>2</sup>

- Aluminio: 35 mm<sup>2</sup>
- Acero: 50 mm<sup>2</sup>

### **2.2.2. Dimensionamiento en relación con la resistencia térmica**

La corriente de falla a menudo se subdivide en el sistema de electrodos de tierra; y es factible dimensionar cada electrodo para una fracción de la corriente de falla solamente. Las temperaturas finales utilizadas para el diseño, deben elegirse para evitar que la resistencia del material se reduzca y que el material cercano, por ejemplo hormigón o materiales aislantes, resulte dañado. En esta norma no se incluye un calentamiento máximo del suelo que rodea los electrodos de tierra puesto que la experiencia ha demostrado que este calentamiento suele ser insignificante.

### **2.2.3. Cálculo de la corriente asignada en los conductores de tierra y de los electrodos de tierra**

Para las corrientes de falla que son interrumpidas en menos de 5 s, la sección del conductor de tierra o del electrodo de tierra debe calcularse a partir de la siguiente fórmula:

$$A = \frac{I}{K} \sqrt{\frac{t_f}{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_1 + \beta}}}$$

- A = es la sección en milímetros cuadrados.
- I = es la corriente en el conductor en amperios (valor eficaz).
- t<sub>f</sub> = es la duración de la corriente de falla en segundos.

- $K$  = es una constante que depende del material del componente conductor de corriente; la III proporciona valores para los materiales más habituales asumiendo una temperatura inicial de 20 °C.
- $B$  = es el recíproco del coeficiente por temperatura de la resistencia del conductor a 0 °C.
- $\Theta_i$  = es la temperatura inicial en grados centígrados. Si en las tablas nacionales no dan valores, se adoptará 20 °C como la temperatura ambiente a 1 m de profundidad.
- $\Theta_f$  = es la temperatura final en grados centígrados.

Tabla III. **Constante para los valores para los materiales más habituales asumiendo una temperatura inicial de 20 °C**

Material	$\beta$ en °C	$K$ en $A\sqrt{s}/mm^2$
Cobre	234,5	226
Aluminio	228	148
Acero	202	78

Fuente: Norma UNE-EN 50522. *Puesta a tierra en instalaciones de tensión superior a 1 kV en corriente alterna.* p. 58.

### 2.3. Dimensionado en relación con las tensiones de contacto

Para estimar las tensiones admisibles de contacto ( $U_{Tp}$ ) se toman en cuenta factores importantes tales como duración de la falla, corriente permitida en el cuerpo humano sin afectar sus funciones y la impedancia del cuerpo humano, esto permitirá calcular el voltaje de toque que no representa riesgos para los usuarios.

$$U_{Tp} = I_B(t_f) * \frac{1}{HF} * Z_T(U_T) * BF$$

- Voltaje de contacto U<sub>T</sub>
- Voltaje de contacto permitido U<sub>Tp</sub>
- Duración de la falla t<sub>f</sub>
- Corriente permitida en el cuerpo humano I<sub>B</sub>(t<sub>f</sub>)
- Factor de corriente en el cuerpo HF
- Body impedance Z<sub>t</sub>(U<sub>T</sub>)
- Factor del cuerpo humano BF

Método de cálculo

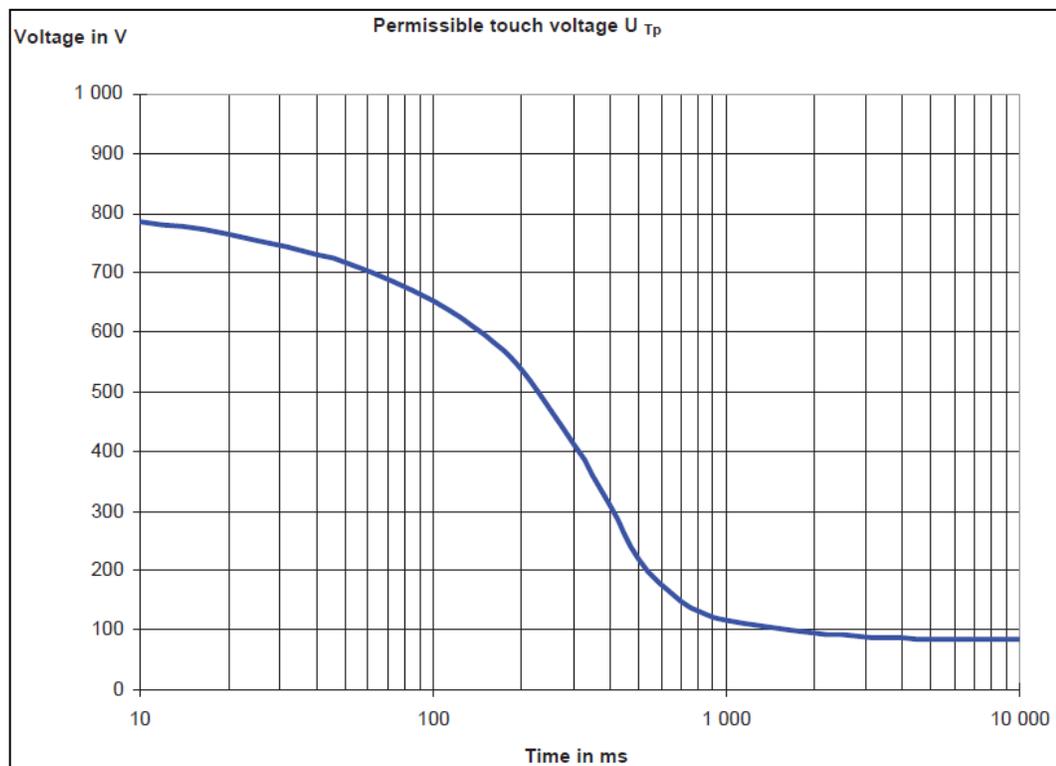
$$\begin{array}{l}
 t_f \\
 \Downarrow \\
 U_{Tp} = f(t_f) \\
 \Downarrow \\
 Z_T = f(U_T) \\
 \Downarrow \\
 I_B = \frac{U_T}{Z_T} \\
 \Downarrow \\
 U_{Tp}(t_f) = U_T(t_f) + (R_{F1} + R_{F2}) \cdot I_B \\
 = U_T(t_f) \cdot \left(1 + \frac{R_F}{Z_T}\right)
 \end{array}$$

El voltaje de contacto U<sub>T</sub> es el voltaje posible entre las partes conductoras.

La figura 6 se basa únicamente en el contacto entre manos desnudas o contactos entre manos y pies. Se permite usar los cálculos dados y tomar en

cuenta resistencias adicionales, por ejemplo calzado, o superficies de materiales de alta resistencia. Cada falla a tierra será desconectada automática o manualmente. Por lo tanto, las tensiones de contacto de muy larga duración o duración indefinida no aparecen como consecuencia de los fallas a tierra.

Figura 6. **Tensión de contacto permitida**



Fuente: Norma UNE-EN 50522. *Puesta a tierra en instalaciones de tensión superior a 1 kV en corriente alterna.* p. 62.

### **2.3.1. Medidas para la cumplimiento de las tensiones de contacto admisibles**

La aplicación de los requisitos básicos dará el diseño inicial del sistema de puesta a tierra. Este diseño debe ser comprobado con respecto a las tensiones de contacto.

La elevación del potencial de tierra y las tensiones de contacto de un sistema de puesta a tierra pueden calcularse a partir de los datos disponibles resistividad del suelo, impedancia a tierra de los sistemas de puesta a tierra existentes. Para el cálculo, pueden considerarse todos los electrodos de tierra y otros sistemas de puesta a tierra que estén conectados fiablemente al sistema de puesta a tierra en cuestión con la suficiente capacidad de paso de corriente admisible. En particular, esto es de aplicación a los cables de guarda conectados, cables enterrados en tierra y cables con efecto de electrodo de tierra. Esto es también de aplicación a los sistemas de puesta a tierra que están conectados conductivamente al correspondiente sistema de puesta a tierra a través de las armaduras o las pantallas de los cables.

### **2.3.2. Proceso de diseño**

El diseño de un sistema de puesta a tierra se puede llevar a cabo de la siguiente manera:

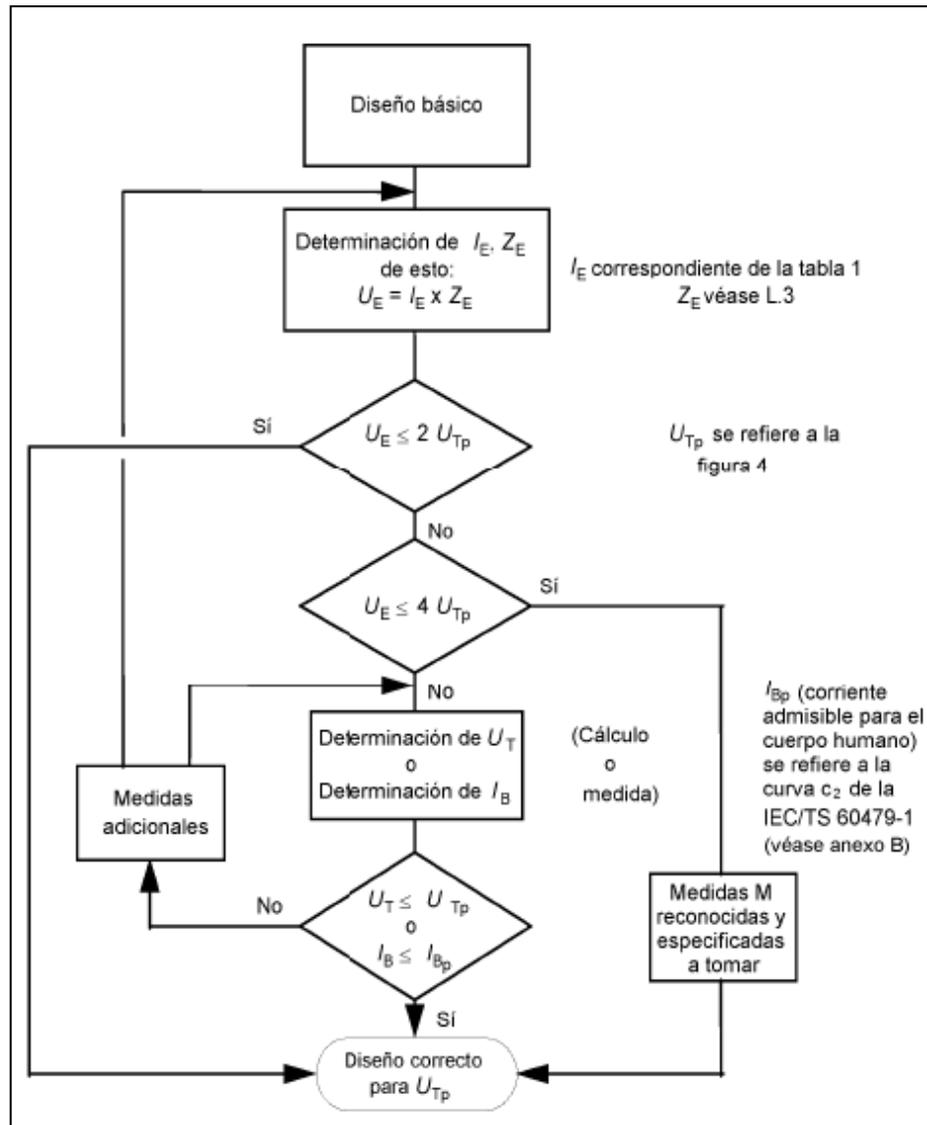
- Recopilación de datos, por ejemplo, corriente de falla a tierra, duración de la falla y distribución.
- Diseño inicial del sistema de puesta a tierra basado en requisitos funcionales.

- Determinar si es parte de un sistema de puesta a tierra global.
- En caso contrario, determinar las características del suelo, por ejemplo, resistividad específica de las capas del suelo.
- Determinar la corriente descargada en el suelo desde el sistema de puesta a tierra, basada en la corriente de falla a tierra.
- Determinar la impedancia total a tierra, basado en la distribución, características del suelo y sistemas de puesta a tierra paralelos.
- Determinar la subida de potencial de tierra.
- Establecer la tensión de contacto admisible.
- Si la subida de potencial de tierra es menor que la tensión de contacto permitida, el diseño está completo.
- En caso contrario, determinar si las tensiones de contacto dentro y en las proximidades del sistema de puesta a tierra están bajo límites tolerables.
- Determinar si las tensiones transferidas representan un peligro fuera o dentro de la instalación eléctrica; en caso afirmativo, proceder a la mitigación en los lugares expuestos.
- Determinar si los equipos de baja tensión están expuestos a una tensión de esfuerzo excesiva; en caso afirmativo, proceder con medidas de mitigación que pueden incluir la separación de los sistemas de puesta a tierra de alta y baja tensión.

- Determinar si la corriente neutra circulante del transformador puede causar diferencias de potencial excesivas entre diferentes partes del sistema de puesta a tierra; en caso afirmativo, proceder con medidas de mitigación.

Una vez cumplidos los criterios antes mencionados, el diseño puede refinarse, en caso necesario, repitiendo los pasos anteriores. El diseño detallado es necesario para asegurar que todas las partes conductoras expuestas están puestas a tierra. Partes conductoras externas se deben poner a tierra si es apropiado.

Figura 7. Diagrama de bloques para el diseño del sistema de puesta a tierra



Fuente: Norma UNE-EN 50522. *Puesta a tierra en instalaciones de tensión superior a 1 kV en corriente alterna.* p. 72.

### 2.3.3. Tensión de contacto y la corriente que pasa por el cuerpo humano

Para el cálculo de los valores admisibles para las tensiones de contacto en las instalaciones de alta tensión se hacen los siguientes supuestos:

- Trayectoria de la corriente de una mano a los pies
- 50 % de probabilidad de impedancia del cuerpo humano
- 5 % de probabilidad de fibrilación ventricular
- Ninguna resistencia adicional

Estas consideraciones conducen a una curva de tensión de contacto con un riesgo aceptable, en caso de fallas a tierra en instalaciones de alta tensión.

Según la norma IEC 60479-1, se utiliza la probabilidad de fibrilación ventricular menos de 5 % y la ruta que va seguir la corriente es de una mano a los dos pies, utilizando esto se obtienen los siguientes datos:

Tabla IV. **Corriente admisible que pasa a través del cuerpo humano**

Duración de la falla (s)	Corriente en el cuerpo (mA)
0,05	900
0,10	750
0,20	600
0,50	200
1,00	80
2,00	60
5,00	51
10,00	50

Fuente: Norma UNE-EN 50522. *Puesta a tierra en instalaciones de tensión superior a 1 kV en corriente alterna.* p. 72.

Para obtener la tensión de contacto admisible correspondiente es necesario determinar la impedancia total del cuerpo humano. Esta impedancia depende de las tensiones de contacto y de la trayectoria de la corriente; los valores para una trayectoria de corriente de mano a mano y de mano a pie se indican en la Especificación Técnica IEC/TS 60479-1, y de ellos se deduce en la tabla V.

Tabla V. **Impedancia total del cuerpo humano ZT relacionada con la tensión de contacto UT para una trayectoria de corriente de mano a mano**

<b>Voltaje de toque (V)</b>	<b>Impedancia del cuerpo humano (<math>\Omega</math>)</b>
25	3 250
50	2 500
75	2 000
100	1 725
125	1 550
150	1 400
175	1 325
200	1 275
225	1 225
400	950
500	850
700	775
1 000	775

Fuente: Norma UNE-EN 50522. *Puesta a Tierra en instalaciones de tensión superior a 1 kV en corriente.* p. 183.

Para una trayectoria de corriente de una mano a los pies debe aplicarse un factor de corrección de 0,75 a la impedancia del cuerpo humano. Mediante la combinación de las dos tablas y considerando este factor de corrección, es posible, mediante un proceso iterativo, calcular una tensión de contacto límite para cada valor de la duración de la falla.

Tabla VI. **Valores calculados de las tensiones de contacto admisibles en función de la duración de la falla**

<b>Duración de la falla <math>t_f</math> (s)</b>	<b>Voltaje aceptable de toque <math>U_{Tp}</math> (V)</b>
0,05	716
0,10	654
0,20	537
0,50	220
1,00	117
2,00	96
5,00	86
10,00	85

Fuente: Norma UNE-EN 50522. *Puesta a tierra en instalaciones de tensión superior a 1 kV en corriente alterna.* p. 170.

#### **2.4. Medidas para evitar tensiones transferidas**

Donde existan sistemas de puesta a tierra de alta y baja tensión en proximidad el uno con el otro, y no formen un sistema de puesta a tierra global, parte de la subida del potencial de tierra EPR del sistema de alta tensión, puede ser aplicado en el sistema de baja tensión. Actualmente, se utilizan dos prácticas:

- Interconexión de los sistemas de puesta a tierra de alta y baja tensión.
- Separación de los sistemas de puesta a tierra de alta y baja tensión.

En cualquiera de los casos, se deben cumplir los requisitos especificados debajo referentes a las tensiones de paso, contacto y a las transferidas, dentro de una subestación y en una instalación de baja tensión alimentada por esa subestación.

## **2.5. Construcción de sistemas de puesta a tierra**

En la elección del tipo de electrodos, así como de su forma de colocación y de su emplazamiento, se tendrán presentes las características generales de la instalación eléctrica del terreno, el riesgo potencial para las personas y los bienes. Se procurará utilizar las capas de tierra más conductoras haciéndose la colocación de electrodos con el mayor cuidado posible en cuanto a la compactación del terreno.

### **2.5.1. Montaje de los electrodos de tierra y de los conductores de tierra**

Un sistema de puesta a tierra generalmente está compuesto de varios electrodos horizontales, verticales o inclinados, enterrados o hundidos en el suelo.

No se recomienda el uso de productos químicos para reducir la resistividad del suelo. Los electrodos de tierra horizontales deberían enterrarse normalmente a una profundidad de entre 0,5 m y 1 m por debajo del nivel del suelo. Esto da la protección mecánica suficiente. Se recomienda que el electrodo de tierra sea situado por debajo de la cota de congelación.

En el caso de las picas verticales, el extremo superior de cada pica estará situado normalmente por debajo del nivel del suelo.

Las picas verticales o inclinadas son particularmente ventajosas cuando la resistividad del suelo decrece con la profundidad. Las estructuras metálicas, puestas a tierra de acuerdo con esta norma, que constituyen una unidad de construcción pueden usarse como conductores de tierra para poner a tierra los

elementos montados directamente sobre estas estructuras. En consecuencia, el conjunto de la estructura debe tener una sección suficientemente conductiva y las conexiones deben ser fiables conductiva y mecánicamente. Deben tomarse precauciones para evitar que una parte de la estructura se desconecte del sistema de puesta a tierra durante un desmontaje provisional. Las grandes estructuras deben conectarse al sistema de puesta a tierra en un número de puntos suficientes.

Donde los trabajos de construcción impliquen sistemas de puesta a tierra ya existentes, se deben tomar medidas de protección para asegurar la seguridad de las personas durante las condiciones de falla.

### **2.5.2. Rayos y sobretensiones transitorias**

Los rayos y las maniobras son fuentes de corrientes de alta y baja frecuencia y tensión. Las subidas de tensión suelen ocurrir cuando se maniobran largas secciones de cable, o llevando a cabo maniobras con condensadores. La atenuación satisfactoria requiere de suficiente densidad del electrodo en los puntos de inyección para hacer frente a corrientes de alta frecuencia, junto con un sistema de puesta a tierra de extensión suficiente para hacer frente a corrientes de baja frecuencia. El sistema de puesta a tierra de alta tensión debe formar parte del sistema de protección contra rayos y pueden resultar necesarios conductores adicionales de puesta a tierra en los puntos de inyección.

Se deben usar compatibilidades electromagnéticas relevantes así como normativa sobre rayos para hacer frente a aspectos específicos relacionados con el rendimiento transitorio del sistema de puesta a tierra y sus componentes.

### **2.5.3. Medidas para la puesta a tierra del equipo de las instalaciones**

Todas las partes conductoras expuestas que forman parte del sistema eléctrico deben ser puestas a tierra; en casos especiales deben crearse zonas aisladas.

Las partes conductoras ajenas deberían ser puestas a tierra si ello es apropiado, por ejemplo, debido al arco, fallos mecánicos al acoplamiento capacitivo o inductivo.

## **2.6. Mediciones**

Las mediciones deben llevarse a cabo después de la construcción, cuando sean necesarias, para verificar la adecuación del diseño. Las mediciones pueden incluir la impedancia del sistema de puesta a tierra, las posibles tensiones de paso y contacto en ubicaciones relevantes y el potencial transferido, en caso de que sea apropiado. Cuando se realicen las mediciones de las tensiones de paso y contacto bajo condiciones de ensayo, por ejemplo el ensayo de inyección de corriente, existen dos opciones. Una consiste en medir las tensiones de paso y contacto posibles usando un voltímetro de alta impedancia, y la otra en medir las tensiones de paso y contacto efectivas, que aparecen a través de una resistencia adecuada que representa el cuerpo humano.

## **2.7. Mantenimiento del sistema de puesta a tierra**

La construcción del sistema de puesta a tierra debe llevarse a cabo de manera que el estado del sistema de puesta a tierra puede ser examinado

periódicamente mediante inspección. Se considerarán medios adecuados como excavaciones en zonas selectivas e inspección visual.

El diseño y la instalación del sistema de puesta a tierra debe permitir llevar a cabo mediciones periódicamente o después de grandes cambios que afecten a requisitos fundamentales, o incluso ensayos de continuidad.

### **3. NORMA IEEE SOBRE SEGURIDAD DE LAS PUESTAS A TIERRA PARA SUBESTACIONES AC ANSI/IEEE STD 80-2000**

La norma ANSI/IEEE STD 80-2000 da los lineamientos e información pertinente para prácticas de aterrizaje seguro en el diseño de subestaciones.

Establece los límites seguros de las diferencias de potencial que pueden existir en una subestación y sistemas eléctricos en condiciones de falla, entre los puntos que pueden entrar en contacto con el cuerpo humano.

Revisa las prácticas de aterrizaje de subestaciones y sistemas eléctricos con referencia especial a la seguridad y desarrollar criterios para el diseño seguro. Da un procedimiento para el diseño de sistemas prácticos de aterrizaje basados en esos criterios.

#### **3.1. Principales consideraciones de diseño**

El diseño seguro de un sistema de aterrizaje tiene por objetivo: Proveer los medios para conducir corrientes eléctricas hacia el planeta Tierra bajo condiciones normales y de fallas, sin exceder el límite de los equipos y cualquier otra operación o que afecten severamente la continuidad del servicio además asegurar que una persona no esté expuesta a los peligros de un golpe eléctrico crítico en las cercanías de una instalación aterrizada.

Una aproximación práctica para el aterrizaje seguro en lo que concierne y que hace posible el control de la interacción de los dos sistemas de aterrizaje, es:

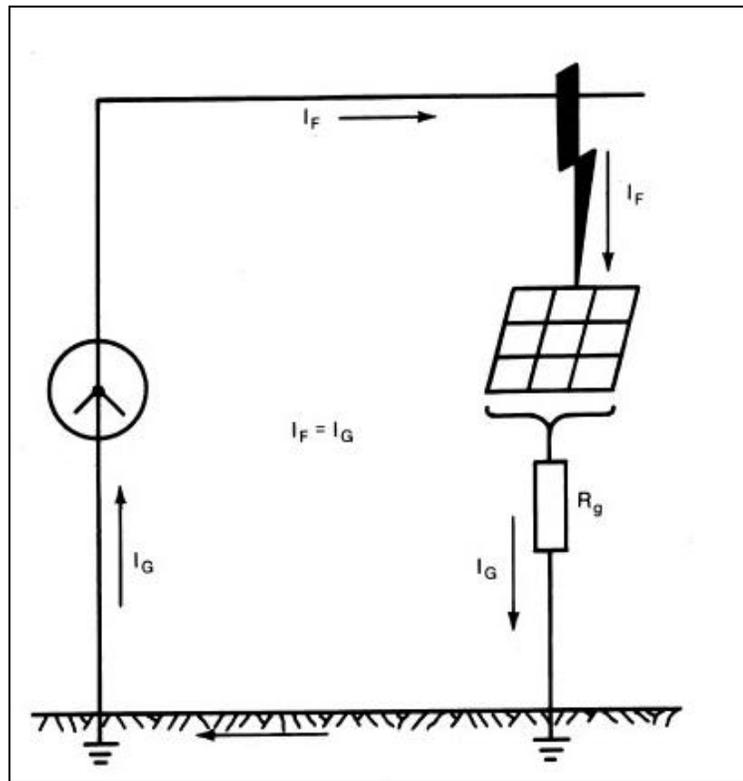
La tierra intencional, que consiste de electrodos de tierra enterrados a una profundidad por debajo de la superficie de la tierra.

La tierra accidental, establecida temporalmente por una persona expuesta a un gradiente de potencial en las cercanías de una instalación aterrizada.

Frecuentemente las personas asumen que cualquier objeto aterrizado se puede tocar con toda seguridad. Una subestación con resistencia baja a tierra no es, en sí misma, una garantía de seguridad. Esto no es simplemente una relación entre la resistencia del sistema de tierra como un todo y el golpe de corriente máxima al que una persona se puede exponer. Una subestación de resistencia a tierra relativamente baja puede ser peligrosa, mientras que otra subestación con resistencia muy alta puede ser segura o se puede hacer segura con un diseño adecuado. Por ejemplo, si una subestación se alimenta desde una línea aérea sin protección o cable neutro, es importante una rejilla de resistencia baja. La mayoría o todas las corrientes de falla a tierra entran al planeta causando frecuentemente un aumento del potencial a tierra local figura 8. Si se usa un conductor protegido, conductor neutro, barras con aislamiento de gas o cable alimentador subterráneo, entre otros. Una parte de la corriente de falla regresa a través de esta trayectoria metálica directamente a la fuente. Desde que esta unión metálica provee una impedancia baja con la trayectoria en paralelo del circuito de retorno, el aumento del potencial a tierra local es finalmente de magnitud baja. En cada caso, el efecto de esa parte de corriente de falla que entra al planeta dentro del área de la subestación debe ser además analizado. Si la geometría, localización de electrodos de tierra, características

del suelo local, y otros factores contribuyen a un gradiente de potencial excesivo en la superficie terrestre, el sistema aterrizado puede ser inadecuado a pesar de su capacidad para transportar la corriente de falla en magnitudes y duraciones permitidas por los relevadores de protección.

Figura 8. **Contorno equipotencial de una rejilla a tierra típica con varillas a tierra**



Fuente: BARAHONA ABREGO, Christian José. *Manual para aterrizaje en subestaciones y sistemas eléctricos*. p. 75.

### **3.1.1. Condiciones de riesgo**

Durante las condiciones típicas de falla a tierra, la circulación de corriente hacia el planeta generará gradientes de potencial dentro y en los alrededores de una subestación.

A no ser que se tomen las precauciones apropiadas en el diseño, el gradiente de potencial máximo a lo largo de la superficie terrestre puede ser de magnitud suficiente, durante las condiciones de falla a tierra para poner en peligro a una persona en el área. Además, los voltajes peligrosos se pueden generar entre estructuras aterrizadas o en el chasis de los equipos y la tierra cercana.

Las circunstancias que hacen posibles los accidentes al golpe eléctrico son las siguientes:

- Relativamente, la corriente alta de falla a tierra está en relación con el área del sistema de tierra y su resistencia a la tierra remota.
- La resistividad del suelo y la distribución de corrientes a tierra, es tal que, un alto gradiente de potencial podría ocurrir en puntos de la superficie terrestre.
- La presencia de un individuo en un punto, tiempo y posición tal, que el cuerpo este uniendo dos puntos de alta diferencia de potencial.
- La duración de la falla y el contacto del cuerpo; consecuentemente el flujo de la corriente a través del cuerpo por un tiempo suficiente puede causar daños a una intensidad de corriente dada.

La poca frecuencia de accidentes se debe, en gran parte, a la baja probabilidad de coincidencia de todas las condiciones perjudiciales descritas anteriormente.

### **3.2. Rango de corriente tolerable**

Los efectos de una corriente eléctrica que circula a través de las partes vitales del cuerpo humano dependen de la duración, magnitud y frecuencia de la misma. Al exponerse, la consecuencia más peligrosa, es: la fibrilación Ventricular, que consiste en la restricción inmediata de la circulación sanguínea.

#### **3.2.1. El efecto de la frecuencia**

Los seres humanos son muy vulnerables a los efectos de la corriente eléctrica, en las frecuencias de 50 ó 60 Hz. Las corrientes, cerca de 0,1 amperio pueden ser mortales. Las investigaciones realizadas por (Dalziel and Mansfield; Dalziel, Ogden, and Abbott), indican que el cuerpo humano puede soportar una corriente un poco mayor a 25 Hz y en corriente directa 5 veces más grande. Curiosamente, Dalziel y Mansfield afirman que corrientes más altas pueden soportarse a frecuencias comprendidas entre los 3 000 a 10 000 Hz. Es importante mencionar que en algunos casos el cuerpo humano es capaz de tolerar corrientes muy altas, debido a descargas eléctricas. La Comisión Internacional Electrotécnica, provee curvas de la tolerancia del cuerpo humano a la corriente eléctrica, en función de la frecuencia y las corrientes de descarga capacitiva [IEC 60479-2] Se reportan otros estudios en Dalziel, de los efectos de ambas corrientes tanto directa como impulsos oscilatorios.

### 3.2.2. El efecto de la duración y la magnitud

Hasta que el valor de la corriente se encuentre en el rango de los 60 a 100mA. La fibrilación ventricular, el paro del corazón o la abstención de respiración, podría causar algún daño o la muerte. Una persona capacitada en respiración cardiopulmonar (CPR) debe suministrar CPR hasta que la víctima pueda ser atendida en una instalación médica.

Por consiguiente, esta norma enfatiza la importancia del umbral de fibrilación. Con un sistema de aterrizaje diseñado cuidadosamente, los golpes eléctricos pueden mantenerse por debajo de este valor y así, evitar lesiones a personas o su muerte. Tal como se indica, la corriente de no-fibrilación de magnitud  $I_B$  en un rango comprendido desde 0,03 a 0,3 segundos de duración, se refiere a la energía absorbida por el cuerpo, tal como se especifica en la ecuación siguiente:

$$S_B = (I_B)^2 (t_s)$$

Donde:

- $I_b$ : es el valor rms de la corriente que circula través del cuerpo en amperios.
- $t_s$ : es la duración a la exposición de corriente en segundos.
- $S_B$ : es la constante empírica relacionada al golpe eléctrico, tolerado seguramente por un porcentaje de la población.

Considerando la importancia de la duración de la falla tanto en términos de la ecuación e implícitamente como un factor de exposición-accidental, el eliminar rápidamente las fallas a tierra, es favorable por dos razones:

Al eliminar rápidamente la falla, el riesgo de exponerse a un golpe eléctrico se reduce enormemente, a diferencia de situaciones en las cuales, las corrientes de falla persistan por varios minutos, que pueden llegar a ser horas.

Varias pruebas y experimentos, muestran que si la duración del paso de corriente a través del cuerpo es corto, el riesgo de lesiones severas o muerte se reducen enormemente.

El valor de corriente permitido, puede basarse en el tiempo de limpieza de las unidades de protección primaria o las protecciones de respaldo. Un buen proceso es utilizar el tiempo de limpieza, debido al mal funcionamiento de los relevadores, que coincidirá con todos los factores contraproducentes necesarios para ocasionar un accidente. Al elegir el tiempo de desconexión de los relevadores de respaldo es más conservador, porque estos aseguran un margen superior de seguridad.

De la investigación realizada resultó un incentivo adicional, usar tiempos de interrupción menores a los 0,5 seg. Su investigación proporcionó la evidencia que un corazón humano, llega a ser susceptible cada vez más a una fibrilación ventricular, cuando el tiempo de exposición a la corriente se aproxima al tiempo del ritmo del corazón, pero ese peligro es mucho menor si el tiempo de exposición a la corriente es en el rango de los 0,06 a los 0,3 segundos. En realidad, los altos gradientes a tierra debido a fallas no son frecuentes y los golpes eléctricos debido a los altos gradientes a tierra son menos frecuentes.

Además, ambos casos son comúnmente de muy corta duración. Así, no sería práctico hacer un diseño contra golpes eléctricos que son únicamente dolorosos y no ocasionan lesiones serias; esto corresponde, para corrientes abajo del umbral de fibrilación.

### 3.3. Límite de corriente tolerable por el cuerpo

La duración y la magnitud de la corriente, que circula a través del cuerpo humano a una frecuencia de 50Hz o 60Hz, deben ser menores al valor que causa la fibrilación ventricular del corazón.

#### 3.3.1. Fórmula de la magnitud y duración de la corriente

La cantidad (duración) de corriente que puede soportar la mayoría de personas a 50Hz o 60Hz se fundamenta con los estudios realizados, y se asume que el 99,5 % de todas las personas pueden soportarla con seguridad, sin sufrir una fibrilación ventricular. El paso de una corriente con magnitud y duración, se establece por la siguiente fórmula:

$$I_B = k \div \sqrt{t_s}$$

En donde, se agrega a los términos definidos anteriormente

$$k = \sqrt{S_B}$$

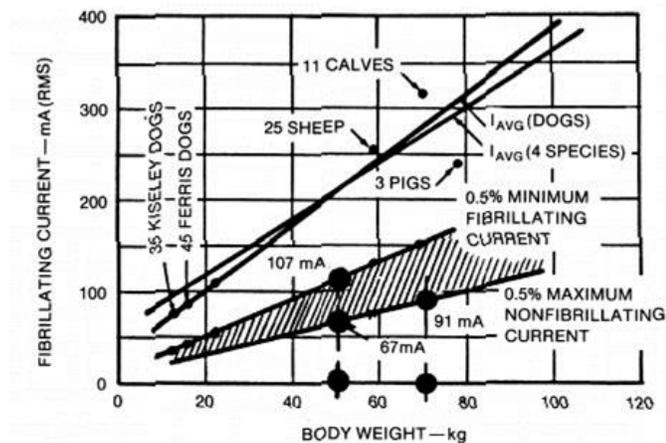
Dalziel descubrió que el 99,5 % de las personas que pesan 110 libras pueden sobrevivir a un golpe eléctrico, lo que da como resultado un valor de  $S_B = 0,01350$ . Así,  $k_{110} = 0,116$  y la fórmula para la corriente tolerable por el cuerpo es:

$$I_B = 0.116 \div \sqrt{t_s} \text{ para un peso corporal de 110 lbs}$$

Da como resultado para un  $t_s = 1$  segundo, 116 mA y para un  $t_s = 0,1$  segundo, 367 mA.

Antiguamente en 1961 las constantes SB y k en las ecuaciones eran 0,0272 y 0,165; se suponía valido para el 99,5 % de todas las personas con un peso promedio de 155 lb. Sin embargo, los estudios posteriores hechos por Dalziel, en que se basa la ecuación (7), llevan a que los valores de  $k = 0,157$  y de  $SB = 0,0246$ , sean los que se deban aplicar a las personas con un peso estimado de 155 lb.

Figura 9. **Corriente de fibrilación vrs el peso corporal para diferentes animales**



Fuente: BARAHONA ABREGO, Christian José. *Manual para aterrizaje en subestaciones y sistemas eléctricos*. p. 78.

Por lo tanto,

$$I_B = 0.157 \div \sqrt{t_s} \quad \text{para un peso corporal de 155 lb.}$$

Al utilizar este manual pueden seleccionar  $k = 0,157$ , siempre que el peso promedio de la población sea al menos 155 lb.

La ecuación indica que se pueden permitir corrientes corporales muchos mayores, en donde se pueda confiar, en que los dispositivos de protección de operación rápida limiten la duración de falla. Se necesita una decisión apropiada para usar el tiempo de apertura, los relevadores primarios de alta velocidad o la protección de respaldo, como la base para el cálculo.

### **3.4. Circuito de tierra accidental**

Para corrientes en c.d y en c.a a frecuencias de 50 Hz o 60 Hz, el cuerpo humano se puede tomar como una resistencia. Típicamente, la trayectoria de corriente se considera desde una mano a los pies o de un pie hacia el otro. La resistencia interna del cuerpo es aproximadamente  $300 \Omega$ , en donde los valores de la resistencia del cuerpo incluyen los rangos de la piel desde  $500 \Omega$  a  $3\ 000 \Omega$ . La resistencia corporal disminuye cuando se daña o se perfora la piel en el punto de contacto con la corriente.

Tal como se mencionó anteriormente en el efecto de la magnitud y duración de la corriente, las extensas pruebas de conductividad Dalziel utilizan agua salada para humedecer las manos y pies, para determinar las corrientes de soldadura seguras con los pies y las manos húmedas. En los hombres, los valores que se obtuvieron utilizando una frecuencia de 60 Hz son los siguientes: La corriente fue de 9,0 mA; los voltajes correspondientes fueron 21,0 V de mano a mano y 10,2 V de manos a pies. Al basarse en este experimento la resistencia de c.a para un contacto de mano a mano es igual a  $21,0/0,009$  o  $2\ 330 \Omega$ , y la resistencia de mano a pies es igual a  $10,2/0,009$  o  $1\ 130 \Omega$ .

Así, para los propósitos de la norma, las siguientes resistencias, en serie con la resistencia corporal, se asumen como:

- La resistencia de contacto de mano y pie es igual a cero
- La resistencia del guante y un zapato es igual a cero

$$R_b = 1\,000\ \Omega$$

### **3.4.1. Trayectorias de corriente a través del cuerpo**

Debemos de tener presente que al seleccionar una resistencia con un valor de  $1\,000\ \Omega$  se relaciona al paso de corriente, como, el paso de corriente entre la mano y el pie o ambos pies, donde la mayor parte de ella pasa a través de los órganos vitales del cuerpo humano, incluyendo el corazón. Generalmente, se reconoce que la circulación de corriente que va de un pie hacia el otro es menos peligrosa. Refiriéndose a las pruebas hechas en Alemania, se menciona que se utilizan corrientes más elevadas de pie a pie que de mano a pie para producir la misma corriente en la región del corazón, se establece que la relación es tan alta como 25:1.

Al basarse en estas conclusiones, los valores de resistencia mayores a  $1\,000\ \Omega$  posiblemente se podrían permitir, donde es concerniente el paso de corriente de un pie hacia el otro. Sin embargo, se deben considerar los siguientes factores:

El voltaje entre los pies es doloroso pero no fatal, esto podría resultar en la caída de una persona, esta puede causar la circulación de corrientes más grandes en el área del pecho. El grado de este daño dependerá completamente

en la duración de la falla y de la posibilidad de otro choque sucesivo, tal vez en el recierre.

Una persona podría estar en una posición propensa, ya sea que esté trabajando o descansando cuando se dé la falla.

Aparentemente los daños provocados por el contacto de pie a pie son menores que los de otro tipo (mano-mano o mano-pies). Sin embargo, han ocurrido muertes por el caso a) y el ignorarlo sería peligroso.

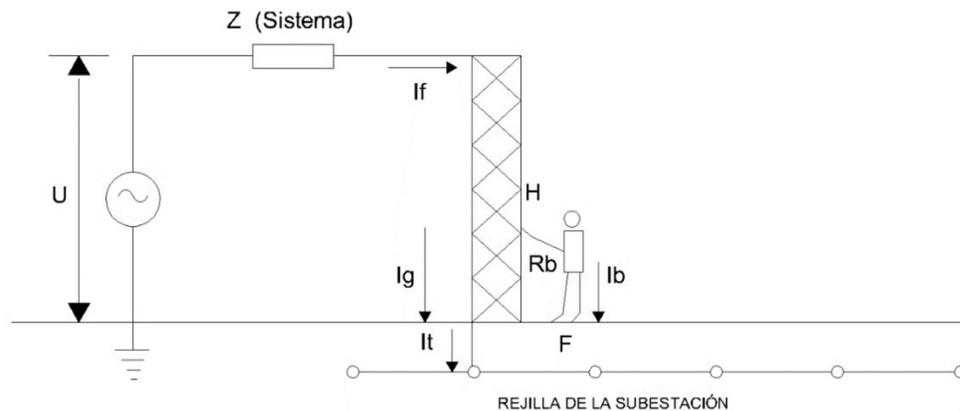
### **3.4.2. Circuitos equivalentes accidentales**

Al utilizar el valor de la corriente tolerable por el cuerpo y las constantes apropiadas del circuito, es muy posible determinar el voltaje tolerable entre cualquiera de los dos puntos de contacto.

Las siguientes constantes se utilizan para el circuito equivalente accidental, las cuales se muestran en la figura 9.

- $I_b$ : es la corriente corporal (el cuerpo es parte del circuito accidental) en amperios.
- $R_A$ : es la resistencia total efectiva del circuito accidental en  $\Omega$  (ohmios).
- $V_A$ : es el voltaje total efectivo del circuito accidental (voltaje de toque o de paso) en Voltios.

Figura 10. **Exposición al voltaje de toque**



Fuente: BARAHONA ABREGO, Christian José. *Manual para aterrizaje en subestaciones y sistemas eléctricos*. p. 81.

La corriente tolerable por el cuerpo humano,  $I_B$ , se define y se utiliza para definir el voltaje tolerable efectivo total del circuito accidental (voltaje de toque o voltaje de paso): el voltaje tolerable total efectivo del circuito accidental, es aquel voltaje que causará la circulación de una corriente corporal,  $I_b$ , igual a la corriente tolerable por el cuerpo humano  $I_B$ .

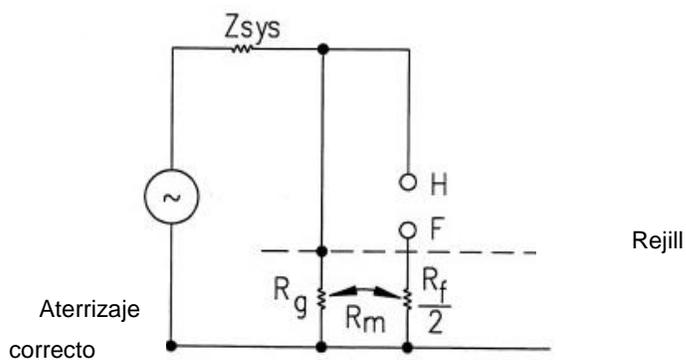
La figura 10 muestra a una persona tocando una estructura metálica aterrizada en el terminal  $H$  y la corriente de falla  $I_f$  que se descarga a tierra por el sistema de aterrizaje de la subestación. Las impedancias del circuito se muestran en la figura 7. El terminal  $H$  es un punto en el sistema que se encuentra al mismo potencial que la rejilla, hacia la cual fluye la corriente de falla y el terminal  $F$  es el área pequeña en la superficie del planeta que está en contacto con ambos pies de una persona. La corriente,  $I_b$ , circula desde el terminal  $H$  a través del cuerpo de la persona hacia el aterrizaje (terminal  $F$ ). El

Teorema de Thevenin permite representar la red de estos dos terminales (H y F) de la figura 7 por medio del circuito que se muestra en la figura 10.

El voltaje Thevenin  $V_{Th}$  es el voltaje entre los terminales H y F, cuando la persona no está presente. La impedancia Thevenin  $Z_{Th}$  es la impedancia del sistema que se ve entre los terminales H y F con las fuentes de voltaje del sistema en corto circuito. La corriente  $I_b$  que circula a través del cuerpo de una persona en contacto con los terminales H y F, se expresa por la siguiente ecuación:

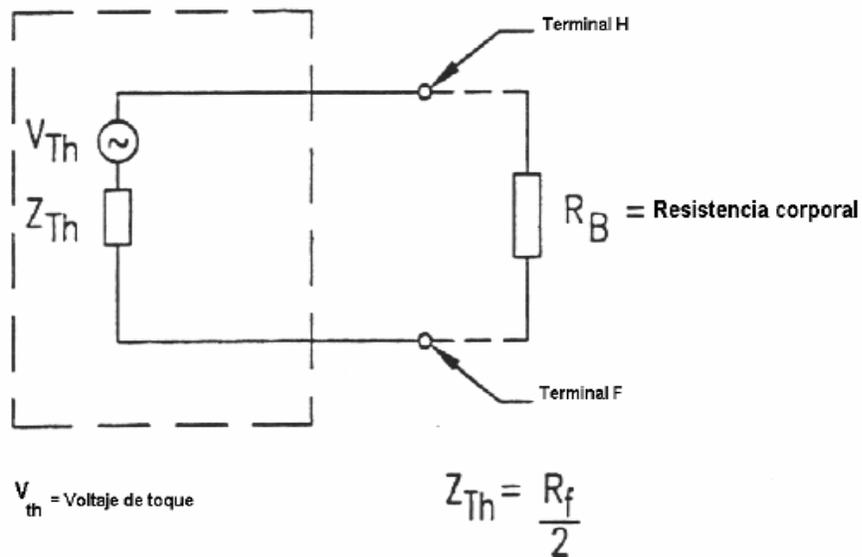
Figura 11. **Circuito de impedancias para el voltaje de toque**

$$I_b = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + R_B}$$



Fuente: BARAHONA ABREGO, Christian José. *Manual para aterrizaje en subestaciones y sistemas eléctricos*. p. 82.

Figura 12. **Circuito del voltaje de toque**



Fuente: BARAHONA ABREGO, Christian José. Manual para aterrizaje en subestaciones y sistemas eléctricos. p. 85.

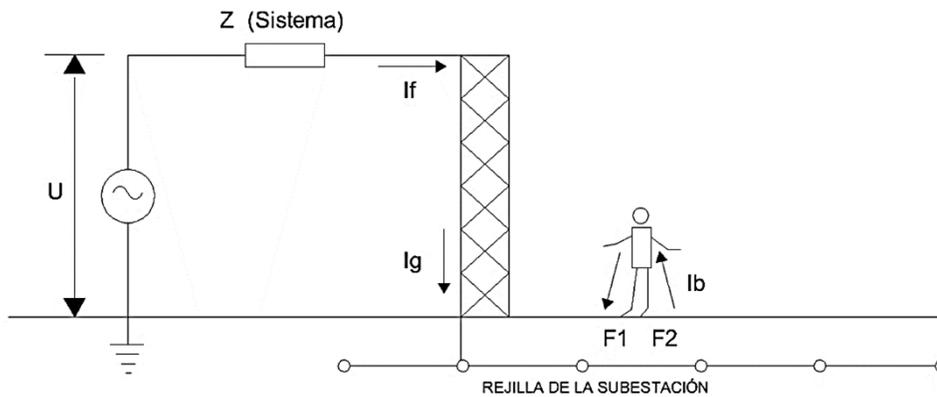
Donde:

- $R_b$ : es la resistencia del cuerpo humano en  $\Omega$  (ohmios).

La figura 11 muestra la corriente de falla  $I_f$  que se descarga a tierra por medio del sistema de aterrizaje de la subestación. La corriente,  $I_b$ , circula desde un pie F2 a través del cuerpo de la persona hasta el otro pie, F1. Los terminales F1 y F2 son las áreas en la superficie del planeta Tierra que están en contacto con ambos pies. El teorema de Thevenin permite representar en la figura 11 la red de estos terminales (F1 y F2). El voltaje Thevenin  $V_{Th}$  es el voltaje entre los terminales F1 y F2 cuando la persona no está presente. La impedancia

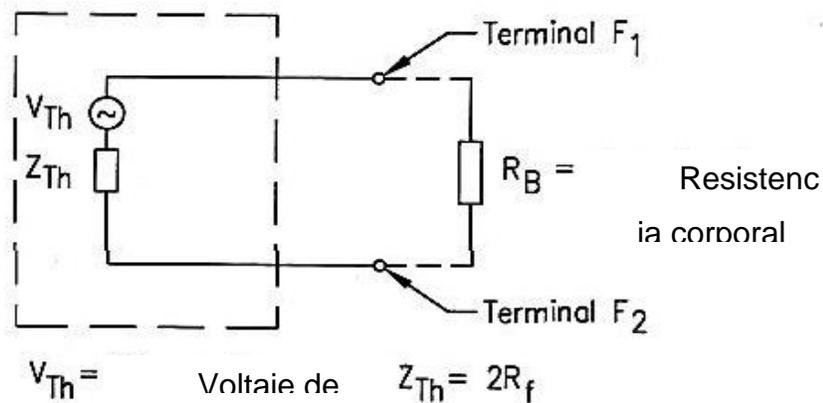
Thevenin  $Z_{Th}$  es la impedancia del sistema como se ve entre los terminales F1 y F2 con las fuentes de voltaje del sistema en corto circuito.

Figura 13. **Exposición al voltaje de paso**



Fuente: BARAHONA ABREGO, Christian José. *Manual para aterrizaje en subestaciones y sistemas eléctricos*. p. 86.

Figura 14. **Circuito del voltaje de paso**



Fuente: BARAHONA ABREGO, Christian José. *Manual para aterrizaje en subestaciones y sistemas eléctricos*. p. 87.

Para el circuito accidental del voltaje de toque:

$$Z_{Th} = \frac{R_f}{2}$$

Y para el circuito accidental del voltaje de paso:

$$Z_{Th} = 2R_f$$

Donde:

- $R_f$  es el valor de la resistencia a tierra de un pie (sin tomar en cuenta el sistema de aterrizaje de la subestación) en  $\Omega$  (ohmios).

Comúnmente, con el propósito de analizar el circuito, el pie humano se representa como un disco metálico conductor y la resistencia de contacto de los zapatos, calcetines, etc. se desprecia. El valor de la resistencia a tierra de un disco metálico conductor de radio  $b$  (m) en la superficie de un suelo homogéneo de resistividad  $\rho$  ( $\Omega \cdot m$ ) se establece por la ecuación de Laurent.

$$R_f = \frac{\rho}{4b}$$

Tradicionalmente, el disco metálico que representa el pie, se toma como una placa circular con un radio de 0,08 m. Con una pequeña aproximación, las ecuaciones para  $Z_{Th}$  se pueden obtener numéricamente y expresarse en términos de la resistividad ( $\rho$ ), tal como se expresa:

Para el circuito accidental de voltaje de toque:

$$Z_{th} = 1.5\rho$$

Para el circuito accidental de voltaje de paso:

$$Z_{th} = 6.0\rho$$

Al utilizar las ecuaciones del voltaje equivalente total permisible (Voltaje de toque tolerable y Voltaje de paso tolerable) es:

$$E_{toque} = I_B (R_B + 1.5\rho)$$

$$E_{paso} = I_B (R_B + 6.0\rho)$$

### 3.4.3. Criterio del voltaje tolerable

La seguridad de una persona depende en prevenir que absorba una cantidad crítica de descarga eléctrica, antes de que la falla se elimine y se suspenda el servicio de energía al sistema. El manejo del voltaje máximo de cualquier circuito accidental no debe exceder los límites que se indican a continuación.

Para el voltaje de paso el límite es:

$$E_{paso} = (R_B + 2R_f) \cdot I_B$$

$$E_{paso\ 50Kg} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad \text{para un peso corporal de 110 lb.}$$

$$E_{paso\ 70Kg} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{para un peso corporal de 155 lb.}$$

Similarmente, el límite del voltaje de toque es:

$$E_{touch} = \left( R_B + \frac{R_f}{2} \right) \cdot I_B$$

para un peso corporal de 110 lb.

$$E_{step70} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{para un peso corporal de 155 lb.}$$

Donde:

- Epaso: es el voltaje de paso en voltios
- Etoque: es el voltaje de toque en voltios
- Cs: es el factor reductor de la capacidad normal
- rs: es la resistividad del material superficial en  $\Omega \cdot m$
- ts: es la duración del golpe de corriente en segundos

Si no se usa la capa superficial protectora, entonces  $C_s = 1$  y  $\rho_s = \rho$ .

### **3.5. Principales consideraciones del diseño**

Un sistema de aterrizaje debe instalarse de manera que limite el efecto del gradiente de potencial a tierra para niveles de voltaje y corriente que no pondrán en peligro la seguridad de las personas o equipos bajo condiciones normales y falla. El sistema debe garantizar el servicio continuo.

Se asume que el sistema de electrodos de tierra tiene la forma de una rejilla de conductores enterrados horizontalmente, complementado por un número de varillas a tierra verticales conectado a la rejilla. Basado en dos estudios, el primero se reporta en un manual de aplicación del IEEE en 1954 y el segundo publicado en 1980 (Dawalibi, Bauchard and Mukhedkar), este concepto representa la práctica que prevalece de la mayoría de ambas utilidades en Estados Unidos y otros países.

Las razones para utilizar el sistema combinado de varillas conductoras verticales y horizontales son las siguientes:

En subestaciones un electrodo sencillo es, por sí mismo, inadecuado en dar un sistema de aterrizaje seguro. En vista de ello, cuando varios electrodos, tal como varillas a tierra se conectan entre ellos y a todo el equipo los neutros, marcos y estructuras son aterrizados, el resultado es substancialmente un arreglo de rejillas de electrodos de tierra, prescindiendo del objetivo original. Si los enlaces conectados por casualidad se entierran en un suelo que tenga buena conductividad, esta única red puede representar un excelente sistema de aterrizaje. En parte por esta razón, algunas utilidades dependen en el uso de una única rejilla.

Si la magnitud de la corriente con trayectoria hacia el interior de la tierra es alta, raramente es posible instalar una rejilla con una resistencia muy baja para asegurar que el incremento del potencial a tierra, no generará gradientes peligrosos en la superficie por el contacto humano. Entonces, el peligro puede eliminarse solamente por el control de los potenciales locales a través del área total.

Un sistema que combina una rejilla horizontal y un número de varillas verticales a tierra penetrando más abajo el suelo tiene las ventajas siguientes:

Mientras que los conductores horizontales (rejilla), son más efectivos en reducir el peligro de un alto voltaje de paso y toque en la superficie de la tierra, con tal que la rejilla esté instalada en una hondura poco profunda (comúnmente 0,3 – 0,5 m (12-18 pulg.) debajo del nivel), las varillas a tierra bastante grandes estabilizarán el funcionamiento de semejante sistema combinado. Para muchas instalaciones esto es muy importante, porque el congelamiento o la sequedad de las capas superiores del suelo podrían variar la resistividad del suelo con las estaciones del año, mientras que la resistividad de las capas inferiores del suelo permanece casi constante.

Las varillas penetrando el suelo de baja resistividad son hasta ahora más efectivas en disipar corrientes de falla siempre que un suelo de dos capas o múltiples capas es encontrado y las capas superiores del suelo tienen una resistividad mucho más alta que las capas inferiores.

Si las varillas se instalan predominantemente a lo largo del perímetro de la rejilla en condiciones alto-bajo o suelos uniforme, las varillas moderarán considerablemente el incremento escarpado del gradiente de la superficie cerca de los acoplamientos periféricos.

### **3.5.1. Aspectos básicos del diseño de la rejilla**

El análisis conceptual de un sistema de rejillas comúnmente inicia con la inspección del propósito de la subestación, mostrando todos los equipos y estructuras principales. Para cimentar las ideas y conceptos básicos, los casos siguientes pueden servir como manual para iniciar un diseño de la típica rejilla a tierra:

Un circuito conductor continuo debe rodear el perímetro para encerrar mucha área como sea práctico. Esta disposición ayuda a evitar una alta concentración de corriente y por consiguiente, ambos gradientes altos en el área de la rejilla y cerca de los terminales del cable de proyección. Encerrando más área reduce también la resistencia de la rejilla a tierra, el área de la rejilla y cerca de los terminales del cable de proyección, encerrando más área reduce también la resistencia de la rejilla a tierra.

Dentro del circuito, los conductores se extienden comúnmente en líneas paralelas y donde sea práctico, a lo largo de las estructuras o fila de equipos para proporcionar conexiones cortas a tierra.

Un típico sistema de rejilla para una subestación puede incluir barras conductoras de cobre 4/0 enterrados 0,3 – 0,5 m (12-18 pulg.) debajo del nivel, separadas de 3 – 7 m (10 – 20 pies), en un patrón de rejilla. En conexiones cruzadas, los conductores empalmados juntamente serían seguros. Las varillas a tierra pueden estar en las esquinas de la rejilla y en los puntos de unión a lo largo del perímetro. Las varillas a tierra pueden instalarse también en equipos principales, especialmente cerca los apartarrayos. En suelos de múltiples capas o alta resistividad, podría ser útil usar varillas más grandes o varillas instaladas en puntos de unión adicionales.

El sistema de rejilla sería extendido sobre toda la subestación y con frecuencia más allá del límite de la verja. Múltiples terminales a tierra o conductores de tamaño grande serían utilizados en lugares donde sucedan altas concentraciones de corriente, tal como la conexión de generadores neutro-tierra, bancos de condensadores o transformadores.

La relación al lado de la malla de rejillas comúnmente es de 1:1 a 1:3, a no ser que un análisis preciso justifique más valores extremos. El cruce frecuente de conexiones tiene un efecto relativamente pequeño al disminuir la resistencia de una rejilla. El papel principal es asegurar un control adecuado de los potenciales de la superficie. El cruce de conexiones es útil también para obtener trayectorias múltiples para la corriente de falla, minimizando la caída de voltaje en la misma rejilla y proveer una medida segura de redundancia en el caso de falla en el conductor.

### **3.5.2. Selección de los conductores y conexiones.**

Al evaluar qué material y qué calibre del conductor o cuál es el límite máximo permisible de temperatura se necesita aplicar en situaciones individuales de diseño, la elección final siempre debe reflejar las consideraciones delineadas desde los requisitos básicos hasta la selección de las conexiones.

Cada elemento del sistema de aterrizaje, incluyendo los conductores de la rejilla, conectores, terminales de conexión y todos los electrodos primarios, se deben diseñar para el supuesto tiempo de duración de la instalación, además el elemento tendrá que:

Poseer suficiente conductividad, así no contribuirá principalmente a la diferencia de los voltajes locales.

Resistir la fusión y el deterioro mecánico bajo las combinaciones más adversas de magnitud y duración de una falla.

Ser mecánicamente confiable y con alto grado de resistencia.

Ser capaz de mantener sus funciones, inclusive cuando esté expuesto a la corrosión o abuso físico.

#### **3.5.2.1. Selección de los materiales para conductores y problemas relacionados a la corrosión**

El cobre es un material comúnmente usado para aterrizaje. Los conductores de cobre, además de una alta conductividad, tienen la ventaja de ser resistentes a la mayor parte de la corrosión subterránea y el cobre es catódico con respecto a la mayoría de los otros metales que son igualmente enterrados en la zona.

El acero con revestimiento de cobre se usa comúnmente en varillas subterráneas y ocasionalmente en rejillas de aterrizaje. El uso del cobre o acero con revestimiento de cobre de menor grado, asegura que la integridad de una red subterránea será conservada por años, siempre que los conductores sean del calibre adecuado y no estén dañados y que las condiciones del suelo no sean corrosivas con el material que se esté usando.

El aluminio se usa con menos frecuencia en rejillas de tierra. Aunque, como primera opción, el uso del aluminio sería una selección común para el equipo de una GIS con gabinetes hechos de aluminio o aleaciones de aluminio. El Aluminio solamente se debe usar después de una completa investigación de todas las circunstancias, a pesar del hecho que, como el acero, este alivia el problema de contribuir a la corrosión de otros objetos enterrados. Sin embargo, el aluminio es anódico para muchos metales, incluyendo el acero y sí es interconectado a uno de estos metales en la presencia de un electrolito, el aluminio se sacrificará así mismo para proteger al otro metal. Si se utiliza el aluminio, se recomiendan utilizar conductores eléctricos con altos niveles de pureza, por ser más confiable que la mayoría de las aleaciones.

El acero se puede utilizar en los conductores de las rejillas de tierra como en las barras. Por supuesto que tal diseño requiere poner mayor atención a la corrosión del acero. El uso del acero galvanizado o el uso de acero resistente a la corrosión, en combinación con protección catódica, es común para sistemas de aterrizaje de acero.

### **3.5.3. Los factores del tamaño de los conductores**

El calibre del conductor que se elige comúnmente es más grande que los que se establecen en la fusión debido a los siguientes factores:

El conductor debe tener la fuerza para soportar cualquier abuso mecánico o corrosivo durante la vida útil para lo que se diseñó la instalación.

El conductor debe tener una conductancia suficiente para prevenir cualquier caída de voltaje peligrosa posible durante una falla, en la vida útil de la instalación.

- La necesidad de limitar la temperatura del conductor.
- Un factor de seguridad se debe aplicar al sistema.

### 3.5.3.1. Corrientes simétricas

El tiempo corto del aumento de temperatura en un conductor de tierra o el calibre del conductor que se requiere en función de la corriente del mismo. Estas ecuaciones evalúan la ampacidad de cualquier conductor para el cual la constante del material se conoce o se pueden determinar por cálculo.

$$A_{\text{kcmil}} = I \cdot k_f \sqrt{t_c}$$

Donde

- $A_{\text{Kcmil}}$ : es el área del conductor en Kcmil.
- $I$ : es el valor rms de la corriente de falla en Kiloamperios.
- $t_c$ : es la duración de la corriente en segundos.
- $K_f$ : es la constante para los materiales de varios valores de  $T_m$  y utilizando la temperatura ambiente ( $T_a$ ) de 40°C.

Si el calibre del conductor está dado en Kcmils se puede convertir a mm<sup>2</sup> x 1,974= Kcmils.

Es aconsejable escoger un conductor de calibre más grande para compensar alguna reducción gradual en la sección transversal del conductor,

durante el diseño de duración de la instalación donde el ambiente del suelo promueve a originar la corrosión.

Tabla VII. **Constantes de los materiales**

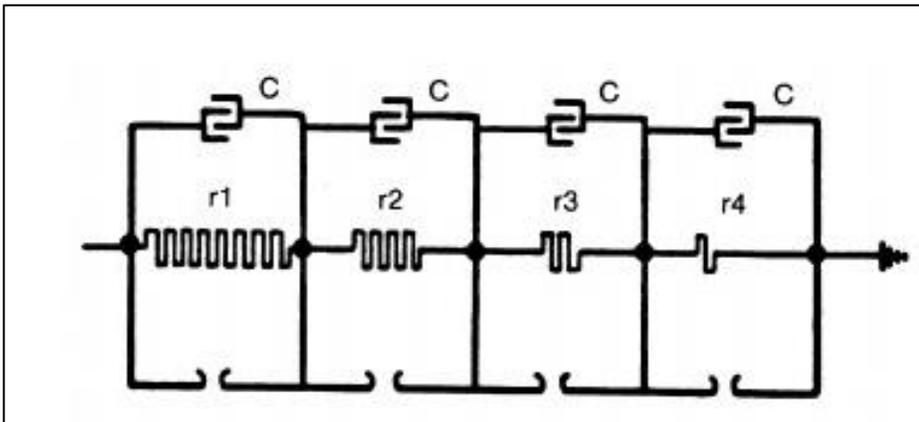
Material	Conductividad (%)	$T_m^a$ (°C)	$K_f$
Cobre destemplado con suave trazado	100.0	1083	7.00
Cobre comercial con duro trazado	97.0	1084	7.06
Cobre comercial con duro trazado	97.0	250	11.78
Alambre de Acero con revestimiento de Cobre	40.0	1084	10.45
Alambre de Acero con revestimiento de Cobre	30.0	1084	12.06
Varilla de Acero con revestimiento de Cobre	20.0	1084	14.64
Aluminio grado EC	61.0	657	12.12
Aleación de Aluminio 5005	53.5	652	12.41
Aleación de Aluminio 6201	52.5	654	12.47
Alambre de Acero con revestimiento de Aluminio	200.3	657	17.2
Acero 1020	10.8	1510	15.95
Varilla de Acero con revestimiento Inoxidable	9.8	1400	14.72
Varilla de Acero con capa de Zinc	8.6	419	28.96
Acero Inoxidable 304	2.4	1400	30.05

Fuente: BARAHONA ABREGO, Christian José. *Manual para aterrizaje en subestaciones y sistemas eléctricos*. p. 91.

### 3.5.4. Características del suelo

El comportamiento de un electrodo de tierra que se entierra en el suelo se puede analizar por medio del circuito que se expone en la figura 15. Tal como se muestra en la figura, la mayoría de los suelos se comportan como un conductor de resistencia,  $r$ , y como un dieléctrico. Excepto para ondas de alta frecuencia y de frente escarpado que penetran el suelo de un material muy resistivo, la corriente de carga es indiferente en comparación con la corriente de fuga y la tierra se puede representar por una resistencia pura.

Figura 15. Modelo de suelo



Fuente: BARAHONA ABREGO, Christian José. *Manual para aterrizaje en subestaciones y sistemas eléctricos*. p. 95.

#### 3.5.4.1. El efecto del gradiente de voltaje

La resistividad del suelo no se afecta por el gradiente de voltaje a menos que posteriormente exceda un valor crítico. El valor cambia un poco con el material del suelo, pero comúnmente este tiene la magnitud de varios kilovoltios

por centímetro. Una vez se exceda, se desarrollarán arcos eléctricos en la superficie del electrodo y avanzarán hacia el interior del planeta Tierra, así como, para incrementar la capacidad efectiva del electrodo hasta que los gradientes se reduzcan a valores que el material del suelo pueda soportar. Esta condición se ilustra por la presencia de aberturas en la figura 15. Debido a que el sistema de aterrizaje de la subestación normalmente está diseñado para cumplir con más criterios que los límites del voltaje de paso y de toque, el gradiente se asume siempre que este abaja del rango crítico.

#### **3.5.4.2. Efecto de la magnitud de corriente**

La resistividad del suelo en las cercanías de los electrodos de tierra se puede afectar por la circulación de corriente desde los electrodos hacia dentro del suelo adyacente. Las características térmicas y el contenido de humedad del suelo determinarán si una corriente de magnitud y duración dada causarán una aridez (sequedad) significativa y así incrementar la resistividad efectiva del suelo.

#### **3.5.4.3. El efecto de la humedad, temperatura y contenido químico**

La conducción eléctrica en los suelos es esencialmente electrolítica. Por esta razón en la mayoría de los suelos aumenta abruptamente siempre que el contenido de humedad sea menor del 15 % del peso del suelo. La cantidad de humedad depende del tamaño del grano, la solidez y la variabilidad de los tamaños del grano.

El efecto de la temperatura en la resistividad del suelo, es casi despreciable para temperaturas por encima del punto de congelamiento. El

agua que contiene el suelo comienza a congelarse a los 0° C y la resistividad aumenta rápidamente. La curva 3 ilustra la variación característica para un suelo de tierra arenosa que contenga 15,2 % de humedad por peso.

#### **3.5.4.4. Estructura del suelo y selección del modelo de suelo**

Es indispensable hacer investigaciones de resistividad en el sitio de una subestación para determinar la composición general del suelo y el grado de homogeneidad. Las pruebas de perforación y otras investigaciones geológicas proveen a menudo información importante de la presencia de diferentes capas y la naturaleza del material del suelo, obteniendo algunas ideas del rango de la resistividad del sitio.

#### **3.5.4.5. Mediciones de resistividad**

Estimaciones que se basan en la clasificación de los suelos proporcionan una aproximación general de la resistividad. Es imprescindible hacer pruebas de resistividad. Estas se deben hacer en diferentes lugares dentro del sitio. Raramente se encuentran suelos con resistividad uniforme y a una profundidad considerable dentro de la zona de una subestación. Normalmente, se encuentran diferentes capas, cada una con diferente resistividad. A menudo suelen ocurrir cambios laterales, pero en comparación con los verticales, los cambios suelen ser aún más graduales. Se pueden hacer pruebas de resistividad en el suelo para determinar si existe alguna variación importante de resistividad con la profundidad. Cuando las variaciones son grandes se deben tomar aún más lecturas, especialmente si las lecturas son tan altas que indican problemas de seguridad.

Si la resistividad varía apreciablemente con la profundidad, a menudo es deseable hacer pruebas a diferentes distancias para obtener un estimado de la resistividad de las capas más profundas. Esto es posible porque a medida se incrementa la distancia de las pruebas, las corrientes de prueba penetran áreas más distantes, en direcciones verticales y horizontales, sin importar cuanto se desvíe la trayectoria de la corriente debido a la variación de las condiciones del suelo.

El método de cuatro electrodos de Wenner, es el método más utilizado en la actualidad, debido a muchas razones. El método de cuatro electrodos obtiene datos de la resistividad del suelo de capas más profundas, sin tener que introducir los electrodos hasta esas capas. No se necesita equipo pesado para ejecutar la prueba de cuatro electrodos. Los resultados no serán afectados grandemente por la resistencia de los electrodos de tierra o de los orificios creados por los electrodos de prueba al ser introducidos al suelo.

#### **3.5.4.6. Interpretación de las medidas de resistividad del suelo**

La interpretación de la resistividad obtenida en el campo es quizá la parte más difícil del programa de medición. El objetivo básico es obtener un modelo del suelo que sea aproximadamente igual al suelo existente. La resistividad del suelo varía lateralmente y con respecto a la profundidad y depende también de los estratos del suelo. Pueden ocurrir variaciones temporales en la resistividad del suelo de acuerdo a las variaciones. Se debe reconocer que el modelo del suelo es solamente una aproximación de las condiciones del suelo en el momento de hacer las mediciones.

Los modelos de resistividad del suelo más comúnmente utilizados son el modelo de suelo uniforme y el modelo de suelo de dos capas. El modelo del suelo de dos capas es a menudo un aproximado de muchas estructuras del suelo, mientras que los modelos de suelo de múltiples capas son utilizados para suelos en condiciones más complejas.

Un modelo de suelo uniforme se utiliza solo cuando existe una variación moderada en la resistividad aparente. Para suelos con condiciones homogéneas, que en la práctica raramente sucede, el modelo de suelo uniforme es razonablemente preciso. Si hay una variación grande en la medición de la resistividad aparente, el modelo de suelo uniforme es poco probable que dé un resultado preciso.

Una representación más exacta de las condiciones presentes en el suelo se obtiene utilizando el modelo de dos capas. El modelo de dos capas consiste en una capa superior de profundidad finita y con una resistividad diferente a una capa inferior de espesor infinito. Existen muchas técnicas para determinar un modelo equivalente de dos capas de resistividad aparente, obtenidas de pruebas de campo. En muchos casos, el modelo de dos capas se puede aproximar por inspección visual de una gráfica de la resistividad aparente contra la profundidad de las medidas de la barra conductora o la resistividad aparente contra las mediciones de espaciamiento del método de cuatro electrodos de Wenner.

#### **3.5.4.7. Suposición de suelo uniforme**

Un modelo de suelo uniforme se puede utilizar en vez del modelo de suelo de múltiples capas, cada vez que las herramientas de cálculo del modelo de dos capas o el modelo de múltiples capas no estén disponibles.

Desafortunadamente, es muy difícil estimar un mayor salto de error en todos los parámetros relevantes del aterrizaje, pero cuando el contraste entre las diferentes resistividades de las capas es moderado, se utiliza un valor promedio de la resistividad del suelo como primera aproximación o para establecer orden en las magnitudes. Un aproximado de la resistividad de un suelo uniforme se puede obtener tomando un promedio aritmético de la medición de la resistividad aparente, como se muestra en la ecuación.

$$\rho_{a(av1)} = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n}$$

Donde:

$$\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}$$

Es el dato de la resistividad aparente obtenida a diferentes distancias, en el método de cuatro electrodos, o a diferentes profundidades en el método de la barra conductora, en  $\Omega, m$ .

- $n$ : es el total de número de mediciones

#### **3.5.4.8. Modelo de suelo de dos capas**

Un modelo de suelo de dos capas se puede representar por una capa superior de profundidad finita sobre una capa inferior de profundidad infinita. El cambio brusco de la resistividad en los límites de cada capa del suelo se puede

describir por medio de un factor de reflexión. El factor de reflexión, K, se define por la ecuación:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2}$$

Donde:

- $\rho_1$ : es la resistividad de la capa superior, en  $\Omega\cdot m$ .
- $\rho_2$ : es la resistividad de la capa inferior, en  $\Omega\cdot m$ .

Mientras la representación más precisa de un sistema de aterrizaje se debe basar en las variaciones reales de la resistividad del suelo que se encuentra en el lugar de la subestación, raramente será económicamente justificable o técnicamente viable enseñar todas las variaciones. Sin embargo, en la mayoría de los casos, la representación de un electrodo de tierra fundamentado en un modelo equivalente de dos capas es suficiente para diseñar un sistema de aterrizaje seguro.

#### **3.5.4.9. Modelo de suelo de dos capas por el método gráfico**

Un suelo modelo de dos capas se puede aproximar por el método gráfico de Sunde y se describe en el párrafo siguiente:

En el método de Sunde, el gráfico de la figura 16 se utiliza para aproximar un suelo modelo de dos capas. Los parámetros  $\rho_1$  y  $\rho_2$  se obtienen por la inspección de las mediciones de resistividad. Solamente  $h$  se obtiene por el método gráfico de Sunde, de la forma siguiente:

Hacer una gráfica de resistividad aparente  $\rho_a$  en el eje Y versus el espaciamiento de los electrodos de prueba en el eje X.

Estimar una densidad  $\rho_1$  y  $\rho_2$  la  $\rho_a$  es lo que corresponde a un espacio pequeño del espaciamiento del electrodo de prueba  $\rho_1$  y  $\rho_2$  corresponde a para un espacio grande. Esto amplía la resistividad aparente del gráfico en ambos extremos para obtener los valores si los datos de campo no son suficientes.

Determinar  $\rho_1 / \rho_2$  y seleccionar una curva en la gráfica de Sunde (figura 21), está casi coincide o interpola y dibuja una nueva curva en la gráfica.

Seleccionar el valor en el eje Y de  $\rho_a / \rho_1$  dentro de la región con desniveles de la curva apropiada de  $\rho_2 / \rho_1$

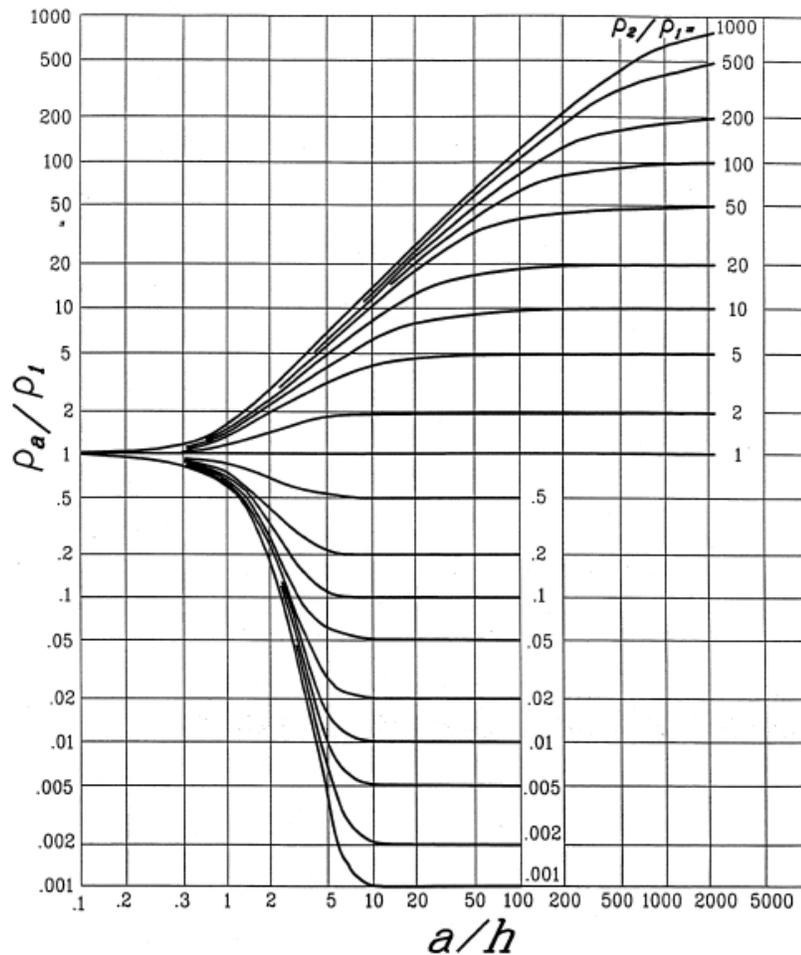
Leer los valores correspondientes de  $a / h$  en el eje X.

Calcular  $\rho_a$  al multiplicar los valores seleccionados,  $\rho_a / \rho_1$  por  $\rho_1$ .

Leer el espacio de sondeo (eje X) correspondiente del gráfico de la resistividad aparente.

Calcular  $h$ , la profundidad del nivel superior, utilizando los espacios de separación en forma apropiada (eje X).

Figura 16. Método gráfico de Sunde



Fuente: BARAHONA ABREGO, Christian José. *Manual para aterrizaje en subestaciones y sistemas eléctricos*. p. 112.

### 3.5.4.10. Evaluación de la resistencia de tierra

Un buen sistema de aterrizaje provee una baja resistencia hacia la Tierra remota para minimizar el incremento de potencial a tierra. Para la mayoría de subestaciones de transmisión y otras más grandes, la resistencia de tierra es

comúnmente de 1  $\Omega$  o menos. En subestaciones de distribución más pequeñas, el rango que comúnmente se acepta es desde 1  $\Omega$  hasta 5  $\Omega$ , dependiendo de las condiciones del lugar.

Estimar la resistencia total hacia la Tierra remota es uno de los primeros pasos para determinar el tamaño y el sistema básico de aterrizaje. La resistencia depende principalmente del área a utilizar por el sistema de aterrizaje, y se conoce comúnmente en la primera etapa del diseño. Como una primera aproximación, se puede estimar un valor mínimo de la resistencia del sistema de aterrizaje de la subestación en un suelo uniforme, por medio de la fórmula de una placa metálica circular a una profundidad cero:

$$R_{\varepsilon} = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}}$$

Donde:

- $R_g$ : es la resistencia a tierra de la subestación en  $\Omega$ .
- $P$ : es la resistividad del suelo en  $\Omega.m$
- $A$ : es el área que utiliza la rejilla de aterrizaje en  $mt^2$ .

A continuación, se puede obtener un límite superior de la resistencia a tierra de la subestación al agregar un segundo término en la fórmula:

Donde:

- LT: es la longitud total de los conductores enterrados en metros.

En el caso de una rejilla con varilla en un suelo uniforme, una combinación de longitud de conductores horizontales y las varillas de tierra proporcionará el valor estimado de LT, porque las varillas de tierra normalmente son más efectivas en una longitud base por unidad.

El segundo término reconoce el hecho de que la resistencia de cualquier sistema de aterrizaje real, que consiste en un número de conductores, es más grande que la resistencia de una placa sólida metálica. La diferencia disminuirá con el incremento de la longitud de los conductores enterrados y se aproximará a cero para LT infinito, cuando se alcance la condición de una placa sólida.

$$R_s = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right]$$

Donde:

- H: es la profundidad de la rejilla en metros.

#### 3.5.4.11. Ecuaciones de Schwarz

Se desarrolló el siguiente juego de ecuaciones para determinar la resistencia total de un sistema de aterrizaje, en un suelo homogéneo que

consiste en electrodos horizontales (rejilla) y verticales (varillas). Las ecuaciones de Schwarz se han ampliado aceptando las ecuaciones de un alambre horizontal recto para representar la resistencia de tierra, R1, de una rejilla que consiste de conductores entrelazados y una esfera embebida en la tierra para representar varillas de tierra, R2. Schwarz también introdujo una ecuación para la resistencia mutua a tierra Rm entre la rejilla y la cama de varilla.

Schwarz utilizó la siguiente ecuación, que introdujo Sunde y Rüdénberg para combinar la resistencia de la rejilla, varillas y la resistencia mutua a tierra, y de esta forma calcular la resistencia total del sistema, Rg.

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

Donde:

- R1: es el valor de la resistencia a tierra de los conductores de rejilla en  $\Omega$ .
- R2: es el valor de la resistencia a tierra de todas las varillas de tierra en  $\Omega$ .
- Rm: es el valor mutuo de la resistencia a tierra entre el grupo de los conductores de rejilla, R1, y el grupo de varillas de tierra, R2, en  $\Omega$ .

Resistencia de tierra de la rejilla:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln\left(\frac{2L_c}{a'}\right) + \frac{k_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right]$$

- $\rho$ : es el valor de la resistividad del suelo en  $\Omega \cdot m$
- $L_c$ : es el valor de la longitud total en metros de todos los conductores de la rejilla de tierra.
- $a'$ : es  $(a \times 2 h)$  para todos los conductores que se entierran a una profunda  $h$  en metros, ó
- $a'$ : es  $a$  para un conductor en la superficie terrestre en metros.
- $2a$ : es el valor del diámetro del conductor en metros.
- $A$ : es el área cubierta por los conductores en  $m^2$ .
- $k_1$ : coeficiente
- $k_2$ : coeficiente

Resistencia a tierra mutua entre la rejilla y las varillas de apoyo.

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln\left(\frac{2L_c}{L_r}\right) + \frac{k_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right]$$

La combinación de la resistencia a tierra de la rejilla y la cama de varilla será de menor valor que la resistencia a tierra de los componentes individuales, pero será de un valor más alto que las de una combinación en paralelo.

### **3.5.5. Determinación de la corriente máxima de rejilla**

En la mayoría de los casos, el valor más grande de la corriente de rejilla resultará en la condición más peligrosa. Para estos casos, se involucran los siguientes pasos para determinar el valor correcto de diseño de la corriente de rejilla máxima  $I_G$ , para utilizarlo en los cálculos de aterrizaje de subestaciones:

Determinar la ubicación y el tipo de falla a tierra que es lo que probablemente produce grandes flujos de corriente entre la rejilla de tierra y en sus alrededores, y por consiguiente los incrementos más grandes de potencia a tierra y grandes gradientes de potencial superficial en el área de la subestación.

Determinar por medio de cálculos, el factor de división de la corriente de falla  $S_f$ , para las fallas que se seleccionaron en el punto anterior, y establecer los valores correspondientes de la corriente simétrica de rejilla.

Por cada falla, basándose en su tiempo de duración,  $t_f$ , se determina el valor del factor de decremento  $D_f$  permitido para los efectos de asimetría de la onda de corriente de falla.

Seleccionar el valor más grande del producto  $(D_f)(I_G)$  y por consiguiente la peor condición de falla.

#### **3.5.5.1. Factor de decremento**

Es un factor de ajuste que se usa conjuntamente con los parámetros de la corriente simétrica de falla a tierra en los cálculos de aterrizaje orientados con seguridad. Determina el equivalente rms de la onda de corriente asimétrica para

una duración de falla dada,  $t_f$ , tomado en cuenta para el efecto del *dc offset* inicial y su atenuación durante la falla.

### **3.5.5.2. Corriente simétrica de rejilla**

Es la parte de la corriente de falla a tierra simétrica y fluye entre la rejilla aterrizada y la tierra circundante, esto se puede expresar como:

$$I_g = (S_f) (I_f)$$

- $I_g$  es el valor rms de la corriente de rejilla simétrica en amperios
- $I_f$  es el valor rms de la corriente de falla a tierra simétrica en amperios
- $S_f$  es el factor de división de la corriente de falla

### **3.5.5.3. Relación X/R**

Es la relación entre la reactancia y la resistencia del sistema. Esto es un indicador de la disminución en el valor de cualquier compensación de DC. Un valor grande de X/R corresponde a una constante de tiempo grande y a una razón o velocidad baja de su disminución.

### **3.5.6. Cálculo de voltajes máximos de malla y de paso**

Se desarrollaron algoritmos para determinar la resistencia de la rejilla y los voltajes de toque y de paso de la malla. Estos algoritmos requieren de una gran capacidad de almacenamiento además de ser difíciles de ejecutar y muy caros, pero las mejoras en la solución de algoritmos y la proliferación de computadoras mucho más poderosas han aliviado la mayoría de estos asuntos. En algunos casos, no es económicamente justificable utilizar estos cálculos de

algoritmos, además el diseñador podría no tener acceso a una computadora con las propiedades requeridas.

### **3.5.7. Voltaje de malla**

Los valores del voltaje de malla se obtienen como un producto del factor geométrico,  $K_m$ ; un factor correctivo,  $K_i$ , este toma en cuenta algunos de los errores que se introdujeron en las suposiciones hechas al derivar  $K_m$ ; la resistividad del suelo  $\rho$ ; y la corriente promedio en por unidad de la longitud efectiva del conductor del sistema de aterrizaje debidamente enterrado  $I_G$

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M}$$

### **3.5.8. Voltaje de paso**

Los valores de voltaje de paso se obtienen como producto del factor geométrico,  $K_s$ ; el factor correctivo,  $K_i$ ; la resistividad del suelo,  $\rho$ ; y la corriente promedio en por unidad de la longitud del conductor del sistema de aterrizaje enterrado  $I_G$ .

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_S}$$

### **3.6. Diseño del sistema de aterrizaje**

Los objetivos fundamentales que se deben lograr en el diseño de cualquier sistema de tierra en una subestación tanto en condiciones normales como de falla son:

Proporcionar medios para disipar corrientes eléctricas a tierra sin exceder los límites de operación de los equipos.

Asegurarse que cualquier persona en las cercanías de las instalaciones aterrizadas no se exponga al peligro de un golpe eléctrico.

Los voltajes de paso son inherentemente menos peligrosos que los voltajes de malla. Sin embargo, si la seguridad dentro del área aterrizada se logra con la ayuda de una capa superficial de alta resistividad (material superficial), y no se extiende fuera de la cerca, donde los voltajes de paso pueden ser peligrosos. En cualquier caso, el voltaje de paso que se calculó se debe comparar con el voltaje de paso permisible después de diseñarse la rejilla satisfaciendo el criterio del voltaje de toque.

Para rejillas de aterrizaje igualmente espaciadas, el voltaje de malla se incrementará a lo largo de las mallas desde el centro hasta la esquina de la rejilla. El rango de este incremento dependerá del tamaño de la rejilla, número y localización de las barras de tierra, el espacio de los conductores paralelos, diámetro y profundidad de los conductores, y la resistividad del contorno del suelo.

A menos que se especifique de otra manera la norma utilizará el término voltaje de malla ( $E_m$ ) para designar el voltaje de toque al centro de la esquina

de la malla. De cualquier manera, el voltaje de malla puede no ser el peor caso de voltaje de toque, si las barras de tierra se encuentran localizadas cerca del perímetro, o si el espaciamiento de la malla cerca de perímetro es pequeño; en estos casos, el voltaje de toque en la esquina de la rejilla puede sobrepasar el voltaje de malla de la esquina.

### **3.6.1. Procedimiento de diseño**

Para proceder al diseño se debe conocer la resistividad del terreno, la corriente máxima de falla y el tiempo de liberación, luego se procederá a efectuar un diseño preliminar del sistema de puesta a tierra. A continuación, se describen los pasos:

Obtener los datos de campo, donde se tomarán las dimensiones de la subestación, tipo de terreno, resistividad y temperatura ambiente.

Seleccionar el tamaño del conductor: teniendo en cuenta los materiales disponibles para realizar el sistema de puesta a tierra, se calcula el diámetro requerido del conductor como una función de la corriente de falla que pasa por el conductor y los requisitos mecánicos.

Calcular la atención de toque y paso tolerables: Tomando en cuenta que la subestación no tendrá acceso al público en general se considera un peso promedio del cuerpo humano de 70 kg. con las ecuaciones de tensión de toque y paso de toque tolerable por el cuerpo humano se obtiene un nivel de voltaje seguro.

Se plantea un diseño preliminar, se selecciona una separación entre conductores para que formen lo aproximado posible a un cuadrado, y se seleccione la cantidad de varillas enterradas.

Se calcula la resistencia de la puesta a tierra. Utilizando las ecuaciones para el cálculo de la resistencia de red tierra donde se obtiene un valor aproximado.

Se calcula la corriente máxima, donde se deben aplicar los factores de: factor de crecimiento y factor de decremento, teniendo en cuenta la corriente de cortocircuito, y en el peor escenario de falla se puede obtener la corriente máxima.

Si el GPR del diseño preliminar está por debajo del voltaje de paso tolerable, no se necesitará un análisis adicional. Solamente será necesario dejar conductores adicionales para dar acceso a las terminales de aterrizaje de los equipos.

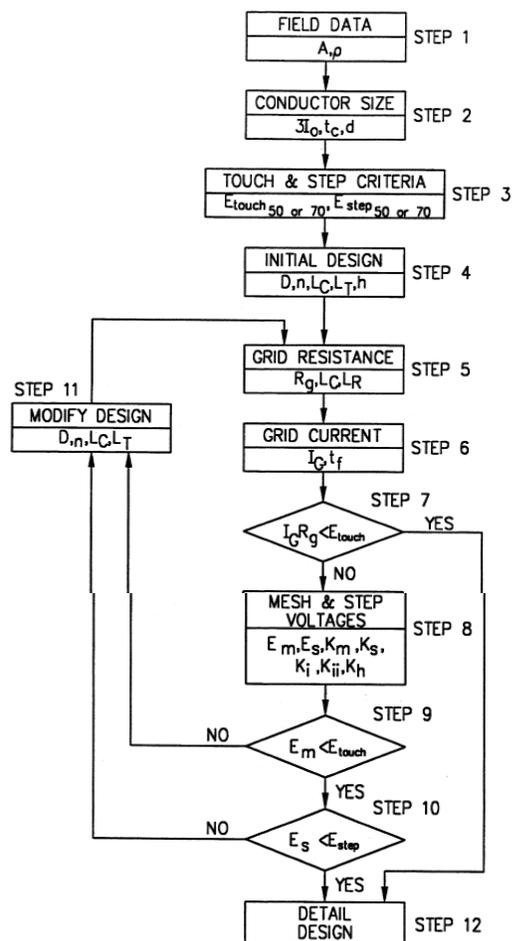
Si el voltaje de paso y el voltaje de toque calculados están por debajo de los voltajes tolerables, el diseño requerirá solamente de ciertos refinamientos requeridos para dar acceso a las terminales de aterrizaje de los equipos.

Si se exceden los límites del voltaje de toque o del voltaje de paso tolerables, se requerirá de una revisión del diseño de la rejilla. Esta revisión debe incluir pequeños espaciamientos entre conductores, electrodos de aterrizaje adicionales, entre otros.

Antes de satisfacer los requerimientos del voltaje de toque y de paso, probablemente se requieran varillas de tierra y rejillas adicionales. Los

conductores de rejilla adicionales probablemente se requieran si el diseño de rejilla no incluye conductores cerca del equipo a ser aterrizado. Las varillas de aterrizaje adicionales se pueden requerir en la base de los discriminadores de transitorios, transformadores de aislamiento, entre otros. El diseño final también se debe revisar para eliminar riesgos debido a potenciales transferidos y los riesgos asociados para casos especiales que corresponden al tema.

Figura 17. Diagrama de bloques del procedimiento de diseño



Fuente: BARAHONA ABREGO, Christian José. Manual para aterrizaje en subestaciones y sistemas eléctricos.



## 4. DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA PARA UNA SUBESTACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA

En este capítulo se presentan dos casos a los cuales se les realizan los cálculos para ratificar si cumplen con los requisitos establecidos en las normas. Con el objetivo de agilizar los cálculos y no perder exactitud se propone la utilización de una hoja electrónica para conformar una plantilla donde se ingresan los datos del diseño preliminar, para luego validar si cumple con los parámetros de seguridad de las normas propuestas.

### 4.1. Parámetros de diseño

Para el cálculo de la red de tierras se deberá contar con parámetros mínimos de ingreso que se describen a continuación conjuntamente con la dimensional que se propone trabajar.

- Corriente de falla a tierra lado de alta tensión kA
- Corriente de falla a tierra lado de baja tensión kA
- Tiempo de liberación de falla segundos
- Factor de crecimiento Factor
- Relación X/R Factor
- Resistencia de puesta a tierra de las torres de AT Rtg  $\Omega$
- Temperatura ambiente  $^{\circ}\text{C}$
- Cantidad de hilos de guarda No.
- Cantidad de torres de transmisión por línea /km No.

- Resistencia de puesta a tierra de las torres  $\Omega$
- Resistencia del hilo de guarda conductor  $\Omega / \text{Km.}$
- Largo de la subestación m
- Ancho de la subestación m
- Resistividad de terreno  $\Omega\text{-metro}$
- Resistividad de la grava  $\Omega\text{-metro}$
- Profundidad de la red m
- Espesor de la capa de grava m
- Espacio entre conductores paralelos m
- Cantidad de varillas enterradas m
- Longitud de varilla m
- Diámetro de las varillas mm

#### **4.2. Norma de puesta a tierra en instalaciones de tensión superior a 1 KV en corriente alterna UNE 50522**

Con la utilización de una hoja de cálculo y en base diagrama de bloques para el diseño del sistema de puesta a tierra presentado en la figura 7 se ingresan fórmulas en base a la norma UNE 50522 que busca verificar si se cumplen los requisitos mínimos de seguridad.

##### **4.2.1. Datos caso 1**

Para este ejemplo se toma en cuenta una subestación reductora, es decir, transforma el nivel de tensión de 69 Kv a 230 Kv en un área de 16 250 m<sup>2</sup> con una alta intensidad de corriente de corto circuito. A continuación, se presentan los datos de ingreso a la hoja de cálculo propuesta.

• Nombre de la subestación	Caso 1
• Relación de transformación	69/34,5V
• Corriente de falla trifásica a tierra	5,3 KA
• Tiempo de liberación de falla segundos	0,33
• Factor de crecimiento	1,5
• Temperatura ambiente	40 °C
• Ancho de la subestación	40 m
• Largo de la subestación	30 m
• Resistividad de terreno	50 Ω-metro
• Resistividad de la grava	2 500Ω-metro
• Profundidad de la red	0,5 m
• Espesor de la capa de grava	0,15 m
• Relación X/R	20
• Resistencia de puesta a tierra de las torres de AT Rtg	10 Ω
• Hilo de guarda	4 hilos
• Resistencia del hilo de guarda conductor	0,472Ω / Km

#### 4.2.1.1. Cálculo del conductor

Se utiliza cobre como el material conductor considerando la resistencia mecánica y su conductividad. Aparecen como parámetro de ingreso la temperatura y la máxima duración de falla.

Tabla VIII. **Cálculo del conector**

<b>Ingreso de datos</b>	
<b>Seleccione Material del conductor</b>	Cobre
Temperatura ambiente (°C)	40
Máxima duracion de falla (S)	0,33
Magnitud de corriente de simétrica RMS (KA)	12,93

<b>Tabla 1 norma IEEE norma BS EN 50522:2010</b>	
Seleccione Material del conductor	Cobre
$\beta$ °C	234,5
K constante dependiente del material	226
Temperatura final °C	1 083

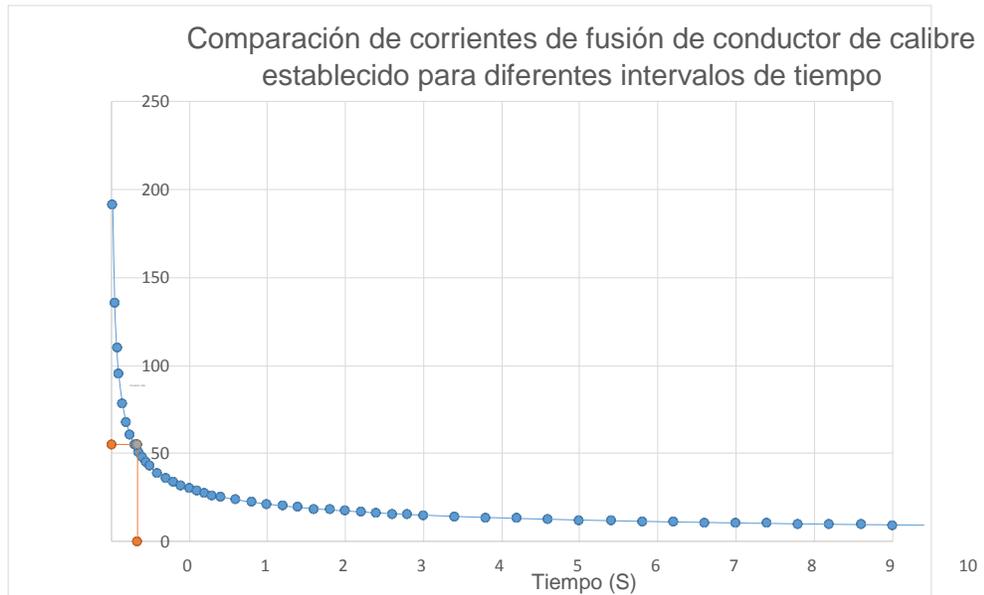
<b>Resultados</b>	
Área (mm <sup>2</sup> )	26,24
Awg	<b>2</b>

<b>Resultados</b>	
Conductor a utilizar	<b>4/0</b>
Máxima corriente soportada a duración de falla	52 721
Área (mm <sup>2</sup> )	107,00
Diámetro en (mm)	11,67
Máxima corriente soportada a duración de falla KA	52,72

Fuente: elaboración propia.

La tabla muestra una recomendación de conductor de cobre 2 AWG, se seleccionará el calibre siguiente 4/0 y se recomienda como calibre mínimo el número 4/0.

Figura 18. **Comparación de corrientes de fusión**



<b>Calibre de conductor a utilizar</b>	<b>4/0</b>
<b>Cobre</b>	

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.1.2. Datos del terreno

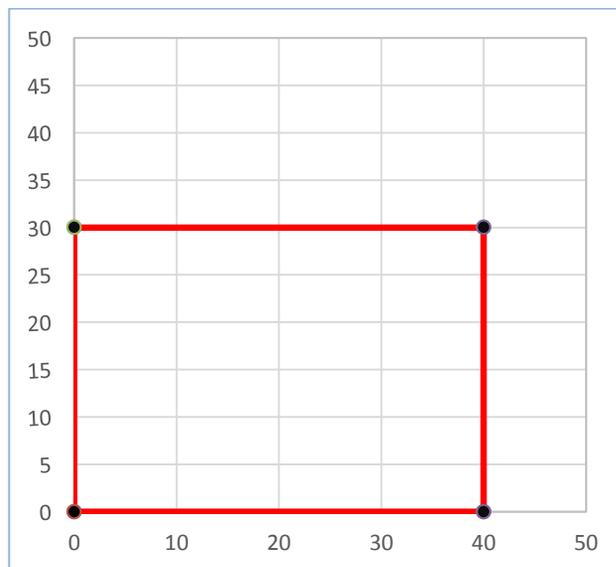
A continuación, se muestra la plantilla para el cálculo del terreno.

Tabla IX. Datos del terreno

Ingreso de datos del terreno		
Ancho de la malla	40	m
Longitud de la malla	30	m
Profundidad de la Malla h	0,50	m
Espesor Capa Superficial hs	0,15	m
Resistividad capa superficial ps	2 500	$\Omega \cdot m$
Modelo de terreno de una capa	<input type="radio"/>	
Modelo de terreno de dos capas	<input type="radio"/>	
Modelo ingrese valor $\rho \Omega \cdot m$	<input checked="" type="radio"/>	50
Datos del terreno		
Ancho de la malla	40	m
Longitud de la malla	30	m
Area de la malla	1200	$m^2$
Profundidad de la Malla h	0,5	m
Resistividad equivalente del terreno $\rho$	50	$\Omega \cdot m$
Resistividad de la capa 1 $\rho_1$	No aplica	$\Omega \cdot m$
Resistividad de la capa 2 $\rho_2$	No aplica	$\Omega \cdot m$
Coefficiente K	No aplica	
Espesor capa superficial	No aplica	m

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Datos del terreno



Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.1.3. Cálculo de corriente de falla y corriente de diseño

A continuación, se muestra la plantilla para el cálculo de la corriente de falla y corriente de diseño:

Tabla X. Datos para cálculo de corriente

##### Ingreso de datos para el cálculo de la corriente de falla

Corriente de falla a tierra lado de Alta tensión	8 000	A
Corriente de falla a tierra lado de baja tensión	8 000	A
Relación X/R del sistema	20	Factor
Cantidad de torres de transmisión por línea /km	4	Torres / km
Resistencia de puesta a tierra de las torres de AT Rtg	10	$\Omega$
Impedancia de los cables de guarda Z1	0,472	$\Omega$ /km
Cantidad de cables de guarda en la línea de AT	2	N cables
Temperatura ambiente (°C)	40	°C

##### Datos para el cálculo de la corriente de falla

Duración de la corriente de falla	0,33	Seg.
Factor de Decremento Df	1,077	Factor
Corriente de Diseño de los Conductores (Lado de Mayor If)	8,62	kA
Impedancia equivalente de los cables de guarda y torres Zeq	0,54	$\Omega$
Factor Divisor de Corriente Sf (depende de Rg)	0,445	%
Factor crecimiento	1,50	Factor
Corriente de Diseño del Espaciamiento IG (Lado AT)	5,75	kA

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.1.4. Cálculo de las tensiones máximas de contacto y de paso

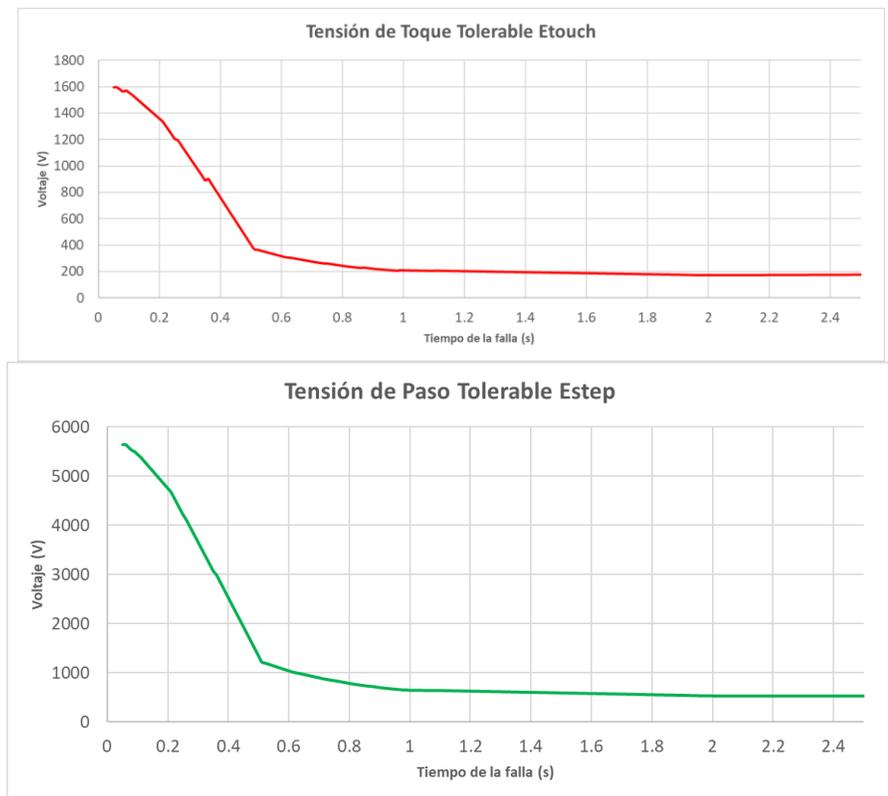
A continuación, se muestra la plantilla para el cálculo de las tensiones tolerables utilizando un criterio de 5 % de la población, por ser más exigente al diseño.

Tabla XI. Tensiones tolerables

Tensión de Toque Tolerable Etouch	402	V
Tensión de Paso Tolerable Estep	1340	V
Factor de Reducción del Terreno Cs	0.77	
Tiempo de la falla para criterio de seguridad (S)	0.50	s
Probabilidad de fibrilación ventricular aumento de hasta 5%	⊙	
Probabilidad de fibrilación ventricular hasta aproximadamente 50%	○	
Probabilidad de fibrilación ventricular por encima de 50%	○	

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. Comparación de corrientes de fusión



Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.1.5. Cálculo de la resistencia de puesta a tierra

A continuación, se muestra la plantilla para el cálculo, de la resistencia de puesta a tierra.

Tabla XII. Diseño preliminar

Ancho de la malla	40	m
Longitud de la malla	30	m
Area de la malla	1200	m <sup>2</sup>
Espacio Entre Conductores Paralelos D	3.0	m
Profundidad de la malla	0.5	m
Longitud de conductores en el perímetro Lp	140	m
N° de Conductores Paralelos al ancho	15	N
N° de Conductores Paralelos al largo	11	N
Longitud Total de conductor de la malla	890	m
Cantidad de varillas enterradas	25	N
Longitud de varilla	2.43	m
Longitud Total de varillas enterradas	60.8	m
Longitud Total del Conductor de la Malla Lc	890.0	m
Longitud Total de conductores y varillas enterradas	950.8	m
Resistividad equivalente del terreno $\rho$	50.0	$\Omega \cdot m$
Resistencia de la puesta a tierra	0.68	$\Omega$

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.1.6. Cálculo de la elevación del potencial a tierra y la tensión de malla máxima en la red

A continuación, se muestra la plantilla para el cálculo de la elevación del potencial a tierra y la tensión de malla máxima en la red.

Tabla XIII. **Cálculo del EPR y tensiones de retícula**

EPR (Earth potencial rise)	3900	v
Tensión de Toque Em	365.246	V
Tensión de Paso Es	522.14	V

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.1.7. **Comparación de la tensión de malla máxima en la puesta a tierra con las tensiones tolerables**

A continuación, se puede observar que el diseño de puesta a tierra es seguro y cumple con los parámetros de seguridad mínimos.

Tabla XIV. **Comparación de la tensión de malla**

Tensión de Toque Em	365.2	V
Tensión de Toque Tolerable Etouch	402.4	V

**El diseño es seguro**

#### 4.2.2. **Datos caso 2**

Para este ejemplo se toma en cuenta una subestación reductora, en un área de 625 m<sup>2</sup> con una intensidad de corriente de corto circuito menor al caso 1 y un tiempo mayor de liberación de falla. A continuación, se presentan los datos de ingreso a la hoja de cálculo propuesta.

Nombre de la subestación	Caso 2
Relación de transformación	4,16/69 kV
Corriente de falla a tierra lado de alta tensión	3 300 A
Corriente de falla a tierra lado de baja tensión	3 300 A
Tiempo de liberación de falla	0,5 segundos
Factor de crecimiento	1,5
Relación X/R	20
Temperatura ambiente	40 °C
Cantidad de hilos de guarda	1
Cantidad de torres de transmisión por línea /km	4
Resistencia de puesta a tierra de las torres	2 $\Omega$
Resistencia del hilo de guarda conductor	0,472 $\Omega$ / Km.
Largo de la subestación	25 m
Ancho de la subestación	25 m
Resistividad de terreno	50 $\Omega$ -metro
Resistividad de la grava	3 000 $\Omega$ -metro
Profundidad de la red	0,9 m
Espesor de la capa de grava	0,1 m
Espacio Entre Conductores Paralelos	2 m
Cantidad de varillas enterradas	50
Longitud de varilla	2,43 m
Diámetro de las varillas	0,01737 m

#### 4.2.2.1. Cálculo del conductor

A continuación, se muestra la plantilla para el cálculo del conductor.

Tabla XV. Selección del conductor

Ingreso de datos	
Seleccione Material del conductor	Cobre
Temperatura ambiente (°C)	40
Máxima duracion de falla (S)	0.5
Magnitud de corriente de simétrica RMS (KA)	5.21

Tabla factores de los materiales	
Seleccione Material del conductor	Cobre
$\beta$ °C	234.5
K constante dependiente del material	226
Temperatura final °C	1083

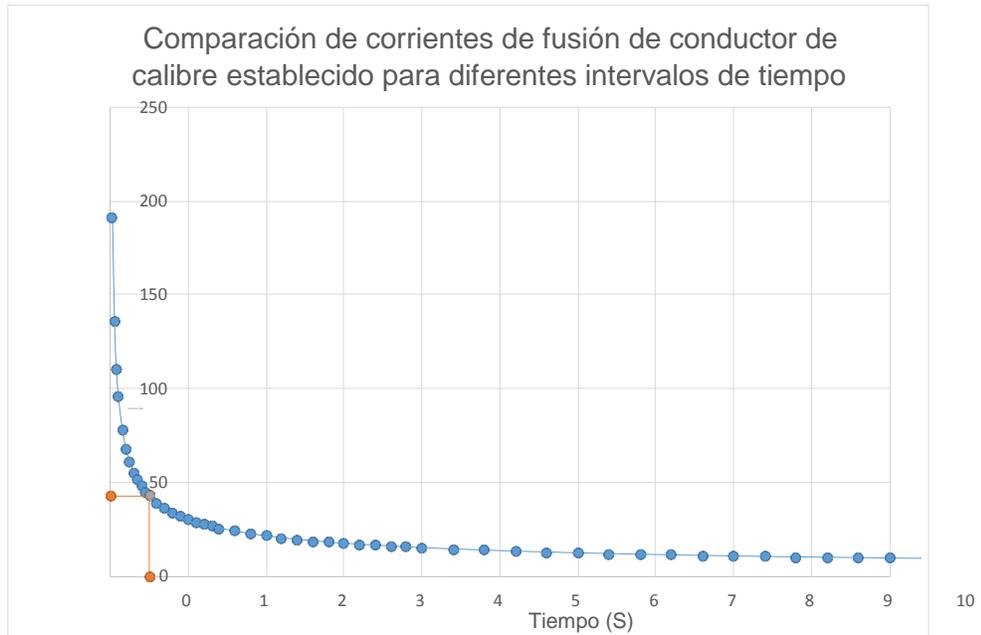
Resultados	
Área (mm <sup>2</sup> )	13.01
Awg	6

Resultados	
Conductor a utilizar	4/0
Máxima corriente soportada a duracion de falla	42831
Área (mm <sup>2</sup> )	107.00
Diámetro en (mm)	11.67
Máxima corriente soportada a duracion de falla K	42.83

Fuente: elaboración propia.

La tabla muestra una recomendación de conductor 6, se seleccionará el calibre 4/0.

Figura 21. **Comparación de corrientes de fusión**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.2.2. Datos del terreno

A continuación, se muestra la plantilla para el cálculo del terreno.

Tabla XVI. Ingreso de datos del terreno

**Ingreso de datos del terreno**

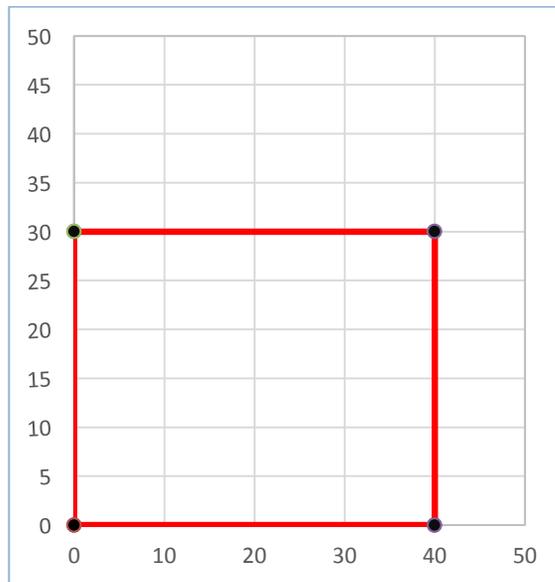
Ancho de la malla	40	m
Longitud de la malla	30	m
Profundidad de la Malla h	0,5	m
Espesor Capa Superficial hs	0,15	m
Resistividad capa superficial ps	2 500	$\Omega \cdot m$
Modelo de terreno de una capa	<input type="radio"/>	
Modelo de terreno de dos capas	<input type="radio"/>	
Modelo ingrese valor $\rho \Omega \cdot m$	<input checked="" type="radio"/>	50

**Datos del terreno**

Ancho de la malla	40	m
Longitud de la malla	30	m
Area de la malla	1 200	$m^2$
Profundidad de la Malla h	0,5	m
Resistividad equivalente del terreno $\rho$	50	$\Omega \cdot m$
Resistividad de la capa 1 $\rho_1$	No aplica	$\Omega \cdot m$
Resistividad de la capa 2 $\rho_2$	No aplica	$\Omega \cdot m$
Coefficiente K	No aplica	
Espesor capa superficial	No aplica	m

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. Ingreso de datos del terreno



Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.2.3. Cálculo de corriente de falla y corriente de diseño

A continuación, se muestra la plantilla para el cálculo de corriente de falla y corriente de diseño:

Tabla XVII. Ingreso de datos para el cálculo de la corriente de falla

#### Ingreso de datos para el cálculo de la corriente de falla

Corriente de falla a tierra lado de Alta tensión	8 000	A
Corriente de falla a tierra lado de baja tensión	8 000	A
Relación X/R del sistema	20	Factor
Cantidad de torres de transmisión por línea /km	4	Torres / km
Resistencia de puesta a tierra de las torres de AT Rtg	10	$\Omega$
Impedancia de los cables de guarda Z1	0,472	$\Omega$ /km
Cantidad de cables de guarda en la línea de AT	2	N cables
Temperatura ambiente (°C)	40	°C

#### Datos para el cálculo de la corriente de falla

Duración de la corriente de falla	0,33	Seg.
Factor de Decremento Df	1,077	Factor
Corriente de Diseño de los Conductores (Lado de Mayor If)	8,62	kA
Impedancia equivalente de los cables de guarda y torres Zeq	0,54	$\Omega$
Factor Divisor de Corriente Sf (depende de Rg)	0,445	%
Factor crecimiento	1,50	Factor
Corriente de Diseño del Espaciamiento IG (Lado AT)	5,75	kA

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.2.4. Cálculo de las tensiones máximas de contacto y de paso.

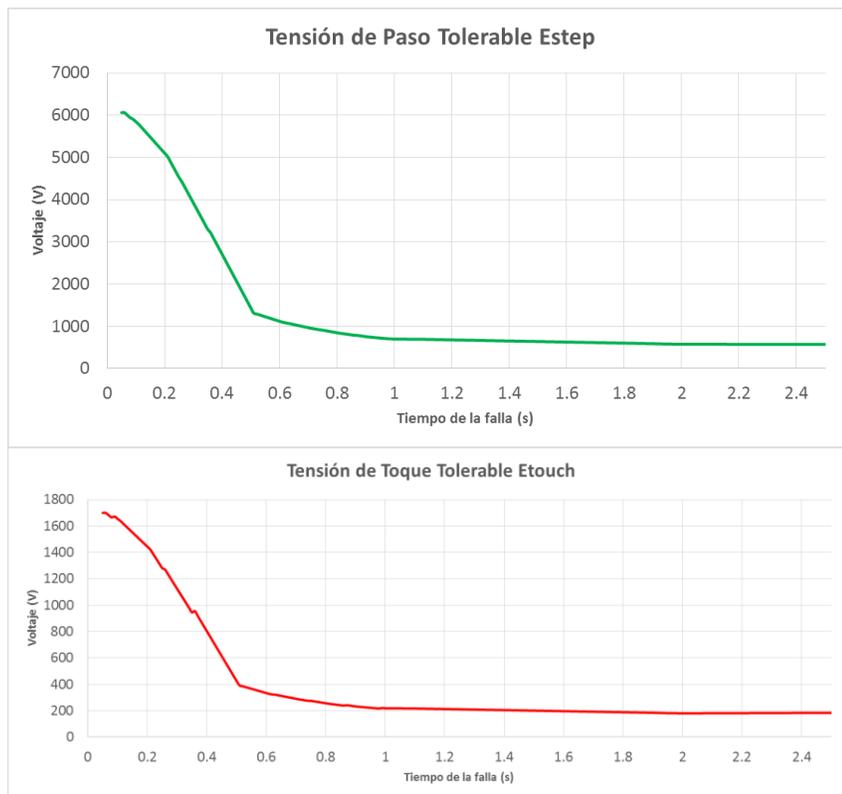
A continuación, se muestra la plantilla para el cálculo de las tensiones tolerables utilizando un criterio del 5 %.

Tabla XVIII. Tensiones tolerables

Tensión de Toque Tolerable Etouch	427	V
Tensión de Paso Tolerable Estep	1437	V
Factor de Reducción del Terreno Cs	0.69	
Tiempo de la falla para criterio de seguridad (S)	0.50	s
Probabilidad de fibrilación ventricular aumento de hasta 5%	●	
Probabilidad de fibrilación ventricular hasta aproximadamente 50%	○	
Probabilidad de fibrilación ventricular por encima de 50%	○	

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Tensión de toque y paso



Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.2.5. Cálculo de la resistencia de puesta a tierra

A continuación, se muestra la plantilla para el cálculo, de la resistencia de puesta a tierra.

Tabla XIX. Diseño preliminar

Ancho de la malla	25	m
Longitud de la malla	25	m
Area de la malla	625	m <sup>2</sup>
Espacio Entre Conductores Paralelos D	2.0	m
Profundidad de la malla	0.9	m
Longitud de conductores en el perímetro Lp	100	m
N° de Conductores Paralelos al ancho	14	N
N° de Conductores Paralelos al largo	14	N
Longitud Total de conductor de la malla	700	m
Cantidad de varillas enterradas	12	N
Longitud de varilla	2.43	m
Longitud Total de varillas enterradas	29.2	m
Longitud Total del Conductor de la Malla Lc	700.0	m
Longitud Total de conductores y varillas enterradas	729.2	m
Resistividad equivalente del terreno $\rho$	50.0	$\Omega \cdot m$
Resistencia de la puesta a tierra	0.90	$\Omega$

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.2.6. Cálculo de la elevación del potencial a tierra y la tensión de malla máxima en la red

A continuación, se muestra la plantilla para el cálculo de la elevación del potencial a tierra y la tensión de malla máxima en la red.

Tabla XX. **Cálculo de EPR y tensiones de retícula**

<b>EPR (Earth potential rise)</b>	1641	v
<b>Tensión de Toque Em</b>	138.537	V
<b>Tensión de Paso Es</b>	204.53	V

Fuente: elaboración propia.

#### **4.2.2.7. Comparación de la tensión de malla máxima en la puesta a tierra con las tensiones tolerables**

A continuación se puede observar que el diseño de puesta a tierra es seguro y cumple con los parámetros de seguridad mínimos.

Tabla XXI. **Comparación**

<b>Tensión de Toque Em</b>	138.5	V
<b>Tensión de Toque Tolerable Etouch</b>	426.6	V

**El diseño es seguro**

Fuente: elaboración propia.

### **4.3. Norma IEEE sobre seguridad de las puestas a tierra para subestaciones AC ANSI/IEEE STD 80-2000**

Con la utilización de una hoja de cálculo y en base diagrama de bloques para el diseño del sistema de puesta a tierra presentado en la figura 17 se ingresan fórmulas en base a la norma AC ANSI/IEEE STD 80-2000 que busca verificar si se cumplen los requisitos mínimos de seguridad.

#### **4.3.1. Datos Caso 1**

A continuación, se presentan los cálculos de una subestación reductora con las mismas características presentadas en el punto 4.2.1 con el propósito de calcular su diseño en base a la norma AC ANSI/IEEE STD 80-2000.

Nombre de la subestación	Caso 1
Relación de transformación	69/34,5V
Corriente de falla trifásica a tierra	5,3 KA
Tiempo de liberación de falla	0,33 segundos
Factor de crecimiento	1,5
Temperatura ambiente	40 °C
Ancho de la subestación	40 m
Largo de la subestación	30 m
Resistividad de terreno	50 $\Omega$ -metro
Resistividad de la grava	2 500 $\Omega$ -metro
Profundidad de la red	0,5 m
Espesor de la capa de grava	0,15 m
Relación x/R	20
Resistencia de puesta a tierra de las torres de AT Rtg	10 $\Omega$
Hilo de guarda	10 hilos

Resistencia del hilo de guarda conductor

0,472  $\Omega$ /Km

#### 4.3.1.1. Cálculo del conductor

A continuación se muestra la plantilla para el cálculo del conductor.

Tabla XXII. Selección del conductor

Ingreso de datos	
Seleccione Material del conductor	Cobre, comercial de duro-trazado
Temperatura ambiente (°C)	20
Máxima duracion de falla (S)	0.33
Magnitud de corriente de simétrica RMS (KA)	34.42

Tabla 1 norma IEEE 80-2000	
Seleccione Material del conductor	Cobre, destemplado de suave -trazado
Conductividad del material (%)	97
Factor $\alpha$ a 20°C (1/°C)	0.00381
Ko en °C	242
Temperatura de fusión a Tm (°C)	1084
$\rho$ 20°C ( $\mu\Omega$ .cm)	1.78
Capacidad Térmica TCAP[J/(cm <sup>3</sup> .°C)]	3.42

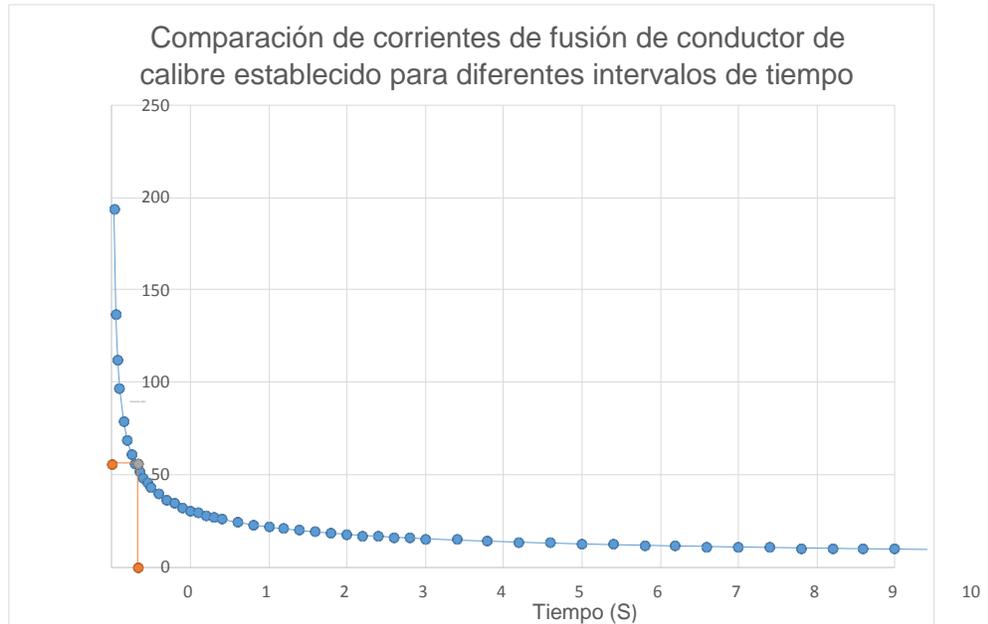
Resultados	
Conductor recomendado	3/0

Seleccione conductor a utilizar	
Conductor a utilizar	4/0
Área (mm <sup>2</sup> )	107.00
Diámetro en (mm)	11.67
Máxima corriente soportada a duracion de falla K	53.26

Fuente: elaboración propia.

La tabla muestra una recomendación de conductor de cobre 3/0 AWG, se seleccionará el calibre siguiente 4/0 y se recomienda como calibre mínimo el número 4/0.

Figura 24. **Tensión de toque y paso**



<b>Calibre de conductor a utilizar</b>	<b>4/0</b>
<b>Cobre, destemplado de suave -trazado</b>	

Fuente: elaboración propia.

#### 4.3.1.2. **Datos del terreno**

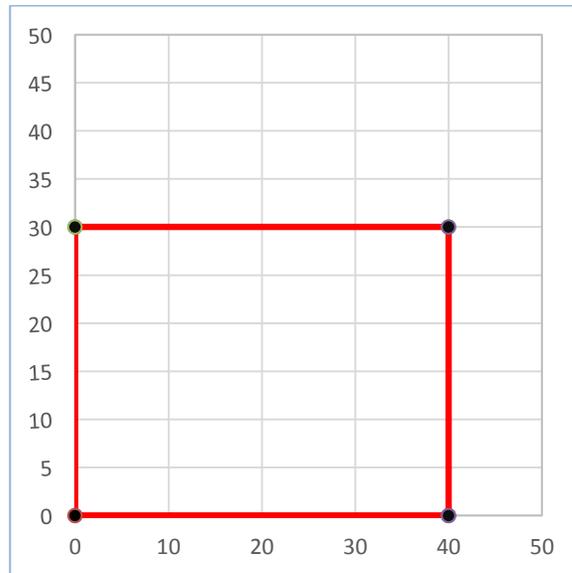
A continuación, se muestra la plantilla para el cálculo del terreno.

Tabla XXIII. Datos del terreno

Ingreso de datos del terreno		
Ancho de la malla	40	m
Longitud de la malla	30	m
Profundidad de la Malla h	0.50	m
Espesor Capa Superficial hs	0.15	m
Resistividad capa superficial ps	2500	$\Omega \cdot m$
Modelo de terreno de una capa	<input type="radio"/>	
Modelo de terreno de dos capas	<input type="radio"/>	
Modelo ingreso valor $\rho \Omega \cdot m$	<input checked="" type="radio"/>	50
Datos del terreno		
Ancho de la malla	40	m
Longitud de la malla	30	m
Area de la malla	1200	$m^2$
Profundidad de la Malla h	0.5	m
Resistividad equivalente del terreno $\rho$	50	$\Omega \cdot m$
Resistividad de la capa 1 $\rho_1$	No aplica	$\Omega \cdot m$
Resistividad de la capa 2 $\rho_2$	No aplica	$\Omega \cdot m$
Coefficiente K	No aplica	
Espesor capa superficial	No aplica	m

Fuente: elaboración propia.

Figura 25. Datos del terreno



Fuente: elaboración propia.

#### 4.3.1.3. Cálculo de corriente de falla y corriente de diseño

A continuación, se muestra la plantilla para el cálculo de la corriente de falla y corriente de diseño:

Tabla XXIV. Ingreso de datos para el cálculo de la corriente de falla

#### Ingreso de datos para el cálculo de la corriente de falla

Corriente de falla a tierra lado de Alta tensión	8 000	A
Corriente de falla a tierra lado de baja tensión	8 000	A
Relación X/R del sistema	20	Factor
Cantidad de torres de transmisión por línea /km	4	Torres / km
Resistencia de puesta a tierra de las torres de AT Rtg	10	$\Omega$
Impedancia de los cables de guarda Z1	0,472	$\Omega$ /km
Cantidad de cables de guarda en la línea de AT	2	N cables
Temperatura ambiente (°C)	40	°C

#### Datos para el cálculo de la corriente de falla

Duración de la corriente de falla	0,33	Seg.
Factor de Decremento Df	1,077	Factor
Corriente de Diseño de los Conductores (Lado de Mayor If)	8,62	KA
Impedancia equivalente de los cables de guarda y torres Zeq	0,54	$\Omega$
Factor Divisor de Corriente Sf (depende de Rg)	0,445	%
Factor crecimiento	1,50	Factor
Corriente de Diseño del Espaciamiento IG (Lado AT)	5,75	kA

Fuente: elaboración propia.

#### 4.3.1.4. Cálculo de las tensiones máximas de contacto y de paso

A continuación, se muestra la plantilla para el cálculo de las tensiones tolerables utilizando un criterio de 70 kg.

Tabla XXV. Tensiones tolerables

Tensión de Toque Tolerable Etouch	788	V
Tensión de Paso Tolerable Estep	2546	V
Factor de Reflexión K	-0.96	
Factor de Reducción del Terreno Cs	0.77	
Criterio 50 Kg	●	
Criterio 70 kg	○	

Fuente: elaboración propia.

#### 4.3.1.5. Cálculo de la resistencia de puesta a tierra

A continuación, se muestra la plantilla para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra.

Tabla XXVI. Diseño preliminar

Ancho de la malla	40	m
Longitud de la malla	30	m
Area de la malla	1200	m <sup>2</sup>
Espacio Entre Conductores Paralelos D	8.0	m
Profundidad de la malla	0.5	m
Longitud de conductores en el perímetro Lp	140	m
N° de Conductores Paralelos al ancho	6	N
N° de Conductores Paralelos al largo	5	N
Longitud Total de conductor de la malla	380	m
Cantidad de varillas enterradas	25	N
Longitud de varilla	2.43	m
Diámetro de las varillas	0.017	mm
Longitud Total de varillas enterradas	60.8	m
Longitud Total del Conductor de la Malla Lc	380	m
Longitud Total de conductores y varillas enterradas	440.8	m
Resistividad equivalente del terreno $\rho$	50.0	$\Omega \cdot m$
Resistencia de la puesta a tierra	0.685	$\Omega$

Fuente: elaboración propia.

#### **4.3.1.6. Cálculo de la elevación del potencial a tierra y la tensión de malla máxima en la red**

A continuación, se muestra la plantilla para el cálculo de la elevación potencial a tierra y la tensión de malla máxima en la red.

Tabla XXVII. **Cálculo del GPR y tensión de retícula**

<b>GPR</b>	3918	v
<b>Tensión de Toque Em</b>	767.428	V
<b>Tensión de Paso Es</b>	482.95	V

Fuente: elaboración propia.

#### **4.3.1.7. Comparación de la tensión de malla máxima en la puesta a tierra con las tensiones tolerables**

A continuación se puede observar que el diseño de puesta a tierra es seguro y cumple con los parámetros mínimos de seguridad.

Tabla XXVIII. **Comparación**

Tensión de Toque Em	767.428	V
Tensión de Toque Tolerable Etouch	787.916	V
Tensión de Paso Es	482.95	V
Tensión de Paso Tolerable Estep	2546	V

**El diseño es seguro**

Fuente: elaboración propia.

#### 4.3.2. Datos Caso 2

Los siguientes datos se ingresan a la hoja de cálculo

Nombre de la subestación	Caso 2
Relación de transformación	4,16/69 kV
Corriente de falla a tierra lado de alta tensión	3 300 A
Corriente de falla a tierra lado de baja tensión	3 300 A
Tiempo de liberación de falla	0,5 segundos
Factor de crecimiento	1,5
Relación X/R	20
Temperatura ambiente	40 °C
Cantidad de hilos de guarda	1
Cantidad de torres de transmisión por línea /km	4
Resistencia d e puesta a tierra de las torres	2 Ω
Resistencia del hilo de guarda conductor	0,472 Ω / Km.
Largo de la subestación	25 m

Ancho de la subestación	25 m
Resistividad de terreno	50 $\Omega$ -metro
Resistividad de la grava	3 000 $\Omega$ -metro
Profundidad de la red	0,9 m
Espesor de la capa de grava	0,1 m
Espacio Entre Conductores Paralelos	2 m
Cantidad de varillas enterradas	50
Longitud de varilla	2,43 m
Diámetro de las varillas	0,01737 m

#### **4.3.2.1. Cálculo del conductor**

A continuación, se muestra la plantilla para el cálculo del conductor.

Tabla XXIX. Selección del conductor

Ingreso de datos	
Seleccione Material del conductor	Cobre, comercial de duro-trazado
Temperatura ambiente (°C)	40
Máxima duracion de falla (S)	0.5
Magnitud de corriente de simétrica RMS (KA)	5.21

Tabla 1 norma IEEE 80-2000	
Seleccione Material del conductor	Cobre, destemplado de suave -trazado
Conductividad del material (%)	97
Factor $\alpha$ a 20°C (1/°C)	0.00381
Ko en °C	242
Temperatura de fusión a Tm (°C)	1084
$\rho$ 20°C ( $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ )	1.78
Capacidad Térmica TCAP[J/(cm <sup>3</sup> ·°C)]	3.42

Resultados	
Conductor recomendado	1

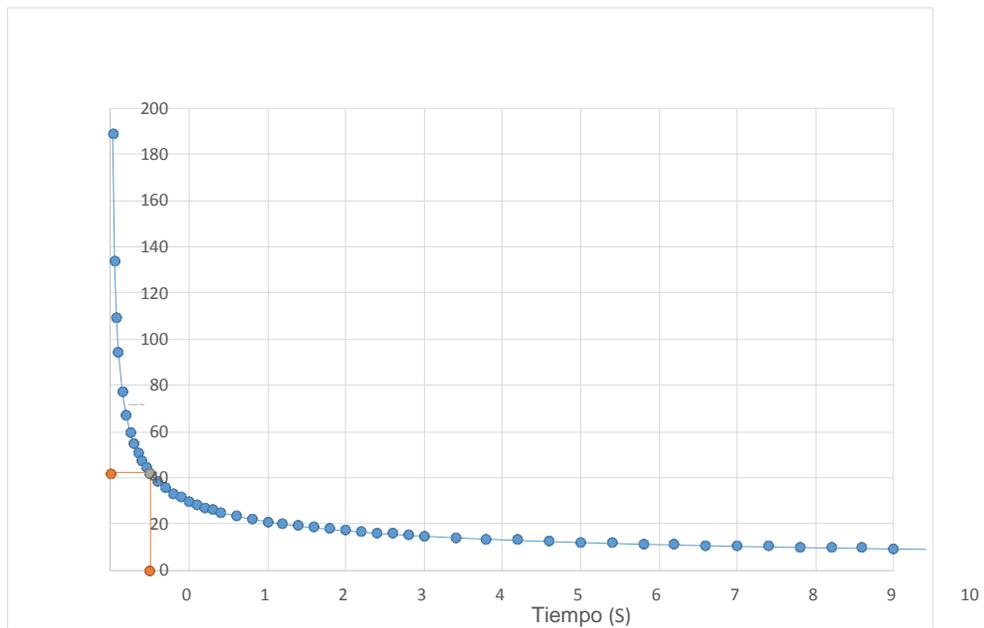
Seleccione conductor a utilizar	
Conductor a utlizar	4/0
Área (mm <sup>2</sup> )	107.00
Diámetro en (mm)	11.67
Máxima corriente soportada a duracion de falla K	42.28

Fuente: elaboración propia.

La tabla muestra una recomendación de conductor 1, se seleccionará el calibre 4/0 porque la norma recomienda como calibre mínimo el número 4/0.

Figura 26. **Comparación de corrientes de fusión de conductor**

Comparación de corrientes de fusión de conductor de calibre establecido para diferentes intervalos de tiempo



<b>Calibre de conductor a utilizar</b>	<b>4/0</b>
<b>Cobre, destemplado de suave -trazado</b>	

Fuente: elaboración propia.

#### 4.3.2.2. Datos del terreno

A continuación, se muestra la plantilla para el cálculo del terreno.

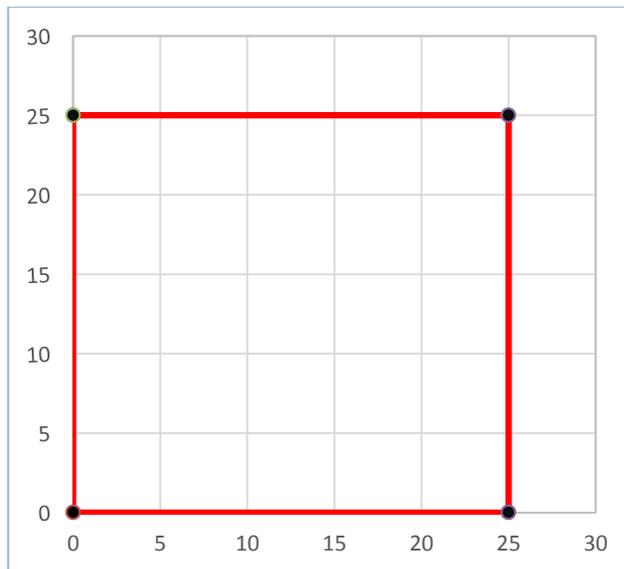
Tabla XXX. Ingreso de datos del terreno

Ancho de la malla	25	m
Longitud de la malla	25	m
Profundidad de la Malla h	0.90	m
Espesor Capa Superficial hs	0.10	m
Resistividad Capa Superficial ps	3000	$\Omega \cdot m$
Modelo de terreno de una capa	<input type="radio"/>	
Modelo de terreno de dos capas	<input type="radio"/>	
Modelo ingreso valor $\rho \Omega \cdot m$	<input checked="" type="radio"/>	50

Ancho de la malla	25	m
Longitud de la malla	25	m
Area de la malla	625	m <sup>2</sup>
Profundidad de la Malla h	0.9	m
Resistividad equivalente del terreno $\rho$	50	$\Omega \cdot m$
Resistividad de la capa 1 $\rho_1$	No aplica	$\Omega \cdot m$
Resistividad de la capa 2 $\rho_2$	No aplica	$\Omega \cdot m$
Coefficiente K	No aplica	
Espesor capa superficial	No aplica	m

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. Ingreso de datos del terreno



Fuente: elaboración propia.

#### 4.3.2.3. Cálculo de corriente de falla y corriente de diseño

A continuación, se muestra la plantilla para el cálculo de la corriente de falla y corriente de diseño:

Tabla XXXI. Ingreso de datos para el cálculo de corriente de falla

Corriente de falla a tierra lado de Alta tensión	10000	A
Corriente de falla a tierra lado de baja tensión	10000	A
Relación X/R del sistema	10	Factor
Cantidad de torres de transmisión por línea /km	4	Torres / km
Resistencia de puesta a tierra de las torres de AT Rtg	12	$\Omega$
Impedancia de los cables de guarda Z1	0.472	$\Omega$ /km
Cantidad de cables de guarda en las líneas de AT	3	N cables
Temperatura ambiente ( $^{\circ}$ C)	45	$^{\circ}$ C

Duración de la corriente de falla	0.3	Seg.
Factor de Decremento Df	1.043	Factor
Corriente de Diseño de los Conductores (Lado de Mayor If)	10.43	KA
Impedancia equivalente de los cables de guarda y torres Zeq	0.40	$\Omega$
Factor Divisor de Corriente Sf (depende de Rg)	0.306	%
Factor crecimiento	1.20	Factor
Corriente de Diseño del Espaciamento IG (Lado AT)	3.83	kA

Fuente: elaboración propia.

#### 4.3.2.4. Cálculo de las tensiones máximas de contacto y de paso

A continuación, se muestra la plantilla para el cálculo de las tensiones tolerables utilizando un criterio de 50 kg.

Tabla XXXII. Tensiones tolerables

Tensión de Toque Tolerable Etouch	677	V
Tensión de Paso Tolerable Estep	2216	V
Factor de Reflexión K	-0.97	
Factor de Reducción del Terreno Cs	0.69	
Criterio 50 Kg	●	
Criterio 70 kg	○	

Fuente: elaboración propia.

#### 4.3.2.5. Cálculo de la resistencia de puesta a tierra

A continuación se muestra la plantilla para el cálculo, de la resistencia de puesta a tierra.

Tabla XXXIII. Diseño preliminar

Ancho de la malla	25	m
Longitud de la malla	25	m
Area de la malla	625	m <sup>2</sup>
Espacio Entre Conductores Paralelos D	6.0	m
Profundidad de la malla	0.9	m
Longitud de conductores en el perímetro Lp	100	m
N° de Conductores Paralelos al ancho	6	N
N° de Conductores Paralelos al largo	6	N
Longitud Total de conductor de la malla	300	m
Cantidad de varillas enterradas	25	N
Longitud de varilla	2.43	m
Diámetro de las varillas	0.017	mm
Longitud Total de varillas enterradas	60.8	m
Longitud Total del Conductor de la Malla Lc	300	m
Longitud Total de conductores y varillas enterradas	360.8	m
Resistividad equivalente del terreno ρ	50.0	Ω*m
Resistencia de la puesta a tierra	0.915	Ω

Fuente: elaboración propia.

#### **4.3.2.6. Cálculo de la elevación del potencial a tierra y la tensión de malla máxima en la red**

A continuación, se muestra la plantilla para el cálculo de la elevación del potencial a tierra y la tensión de malla máxima en la red.

Tabla XXXIV. **Cálculo del GPR y tensiones de retícula**

<b>GPR</b>	1652	v
<b>Tensión de Toque Em</b>	277.803	V
<b>Tensión de Paso Es</b>	153.41	V

Fuente: elaboración propia.

#### **4.3.2.7. Comparación de la tensión de malla máxima en la puesta a tierra con las tensiones tolerables**

A continuación, se observa que el diseño de puesta a tierra es seguro y cumple con los parámetros de seguridad mínimos.

Tabla XXXV. **Comparación**

<b>Tensión de Toque Em</b>	277.803	V
<b>Tensión de Toque Tolerable Etouch</b>	676.984	V
<b>Tensión de Paso Es</b>	153.41	V
<b>Tensión de Paso Tolerable Estep</b>	2216	V

**El diseño es seguro**

Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

1. Con la ayuda de un programa de computadora, se logó comparar las normas CEN EN 50522 y la ANSI/IEEE STD 80-2000, el hecho de utilizar una herramienta capaz de procesar los datos, da una certeza en los cálculos y con esto se logra obtener un resultado fiable.
2. En los casos propuestos se utilizan los criterios más exigentes para el diseño con el fin de tener el diseño más seguro posible en la normativa CEN EN 50522 es el criterio de 5 % y para la norma ANSI / IEEE STD 80-2000 el criterio de 50Kg. Con estos datos se puede concluir que la norma CEN EN 50522 tiene un criterio más estricto y seguro.
3. Para poder cumplir con los criterios de seguridad de las normativas propuestas se tiene que cumplir con un diseño y en la normativa CEN EN 50522 se utiliza un mayor número de metros de cable esto indica que es un diseño más costoso que el de la normativa IEEE STD 80-2000.
4. Para poder verificar que el diseño es seguro es necesario comparar el voltaje producido por la corriente de falla y el voltaje de seguridad tolerable. Comparando ambos resultados se puede observar que la normativa CEN EN 50522 es más exigente.
5. En la normativa ANSI / IEEE STD 80-2000 se utiliza un valor de 1000OHM para la impedancia del cuerpo humano y en normativa CEN EN 50522 la impedancia se toma como porcentaje que la población pueda llegar a tener sin tomar en cuenta el peso de las personas.



## RECOMENDACIONES

1. El cuerpo humano puede sufrir consecuencias muy severas como, por ejemplo: quemaduras, asfixia, y fibrilación ventricular dependiendo de la duración y magnitud de la corriente que lo atraviese, por tal motivo es muy importante tener un diseño seguro de sistema de puesta a tierra, en la comparación de las normas se nota que la normativa EN EN 50522 tiene como base que cada parte del cuerpo humano tiene una impedancia y los daños que pueda ocasionar en una persona son calculados de forma probabilística se utiliza el criterio que la probabilidad de fibrilación ventricular sea menor del 5 % y 50 % se recomienda utilizar el criterio de 5 % y es el que da mayor seguridad.
2. La norma ANSI / IEEE STD 80-2000 establece 2 criterios uno para las personas de 110 libras y otro para las de 155 libras, en ambos se toman de base una corriente que el 99,5 % de las personas pueda recibir sin sufrir una fibrilación ventricular se recomienda utilizar el criterio de 155 libras y se aproxima al promedio de peso de una persona en nuestro país.
3. En la normativa CEN EN 50522 utilizar el siguiente criterio: “Como normal general, al cumplir los requisitos de la tensión de contacto, se satisface también los de la tensión de paso, dado que los límites de la tensión de paso tolerable son mucho más altos que los de la tensión de contacto, debido al diferente recorrido de la corriente a través del cuerpo.” En la norma ANSI / IEEE STD 80-2000 se recomienda la comparación para el voltaje de paso y el voltaje de toque.

4. Realizar un diseño de puesta a tierra lo más eficiente posible porque un sobre dimensionamiento generara un sobre costo y un diseño muy débil puede poner en riesgo la vida de personas o equipos.
5. Se deben tomar las mediciones de la resistividad del terreno en verano porque en esta estación es cuando se tendrán los niveles más altos de resistividad del terreno por la poca humedad que pueda tener el área y esto ayudará a tener un diseño fiable durante todo el año.
6. En Guatemala la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, indica que se debe usar la normativa IEEE 80 para la implementación de sistemas de puesta a tierra de subestaciones eléctricas.

## BIBLIOGRAFÍA

1. CANELA MORALES, Jose Guadalupe. *Diseño e instalacion de sistema de puesta a tierra*. Veracruz . México: Universidad Veracruzana, 2013. 120 p.
2. DE LA VEGA ORTEGA, Miguel. *Problemas de ingeniería de puesta a tierra*. Mexico: Limusa, 2001. 193 p.
3. GASULLA FORNER, Manuel. *Obtención de Imágenes de la distribución de impedancia eléctrica del subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales*. España: Universidad Politécnica de Cataluña, 1999. 160 p.
4. MORALES OSORIO, Nelson. *Manual técnico. Sistema de puesta a tierra*. Chile: Procobre, 1999. 204 p.
5. OROZCO VALLE, Jorge De Jesús. *Diseño de tierra para subestaciones electricas y su aplicacion*. México: Instituto Politécnico Nacional, 2008. 105 p.
6. Rayos SAC. *Manual de puestas a tierra Thor-gel*. [en línea]. <<http://Www.Para-Rayos.Com/Datos/Gel20061.Pdf>>. [Consulta: 7 de septiembre de 2018].

7. RIVADENEIRA VERGARA, Luis Armando. *Análisis de fallas y control de protecciones como prevención de riesgos eléctricos*. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2010. 291 p.
8. RODRÍGUEZ ARAYA, Michael Eduardo. *Propuesta metodológica de aterrizamiento en instalaciones comerciales e industriales*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2013. 239 p.
9. Std 80-2000, IEEE. *Guide for Safety in AC Substation Grounding*. New York, USA: IEEE, 2000. 192 p.
10. \_\_\_\_\_. 81-2012 – IEEE. *Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*. New York, USA: IEEE, 1912. 193 p.
11. \_\_\_\_\_. Std 80-2013, IEEE. *Guide for Safety in AC Substation Grounding*. New York, USA: IEEE, 2013. 239 p.
12. UNE. *En 50522 puesta a tierra en instalaciones de tensión superior a 1 kV en corriente alterna*. España: Normalización Española, 2012. 92 p.

## APÉNDICE

### Apéndice 1. Código fuente

DESCRIPCION	Conductividad del material (%) Ko en °C	Factor de temperatura Temperatura de fusión a Tm (°C)pr	Factor de temperatura 20°C					
Cobre, destemplado de suave -trazado	100	0.00393	234	1083	1.72			
3.42								
Cobre, comercial de duro-trazado	97	0.00381	242	1084	1.78			
3.42								
Alambre de Acero con revestimiento de Cobre	40	0.00378	245	1084				
4.4 3.85								
Alambre de Acero con revestimiento de Cobre	30	0.00378	245	1084				
5.86 3.85								
Varillab de Acero con revestimiento de Cobre	20	0.00378	245	1084				
8.62 3.85								
Aluminio de grado EC	61	0.00403	228	657	2.86	2.56		
Aleación de Aluminio 5005	53.5	0.00353	263	652	3.22	2.6		
Aleación de Aluminio 6201	52.5	0.00347	268	654	3.28	2.6		
Alambre de Acero con revestimiento de Aluminio	20.3	0.0036	258					
657 8.48 3.58								
Acero 1020	10.8	0.0016	605	1510	15.9	3.28		
acero con revestimiento Inoxidable	9.8	0.0016	605	1400	17.5			
4.44								
Varilla de acero con capa de Zinc	8.6	0.0032	293	419	20.1			
3.93								
Acero Inoxidable 304	2.4	0.0013	749	1400	72	4.03		
mm de cable =+BUSCARV(Conductor!D23,CT!S17:T40,2,FALSO)								
=+K22*(RAIZ(((N13*0.0001)/(N15*N9*N12))*LN((N10+N11)/(N10+N14))))								
tiempos								
1	0.025							
=+\$K\$22*(RAIZ(((N\$13*0.0001)/(J25*\$N\$9*\$N\$12))*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))								
2	=+\$J\$25*I26							
=+\$K\$22*(RAIZ(((N\$13*0.0001)/(J26*\$N\$9*\$N\$12))*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))								

Continuación del apéndice 1.

3     =+\$J\$25\*I27  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J27\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

4     =+\$J\$25\*I28  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J28\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

5     =+\$J\$26\*I27  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J29\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

6     =+\$J\$26\*I28  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J30\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

7     =+\$J\$26\*I29  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J31\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

8     =+\$J\$26\*I30  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J32\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

9     =+\$J\$26\*I31  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J33\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

10    =+\$J\$26\*I32  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J34\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

11    =+\$J\$26\*I33  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J35\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

12    =+\$J\$26\*I34  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J36\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

13    =+\$J\$28\*I30  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J37\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

14    =+\$J\$28\*I31  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J38\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

15    =+\$J\$28\*I32  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J39\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

16    =+\$J\$28\*I33  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J40\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

Continuación del apéndice 1.

- 17    =+\$J\$28\*134  
      =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J41\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))
- 18    =+\$J\$28\*135  
      =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J42\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))
- 19    =+\$J\$28\*136  
      =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J43\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))
- 20    =+\$J\$28\*137  
      =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J44\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))
- 21    =+\$J\$28\*138  
      =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J45\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))
- 22    =+\$J\$30\*132  
      =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J46\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))
- 23    =+\$J\$30\*133  
      =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J47\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))
- 24    =+\$J\$30\*134  
      =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J48\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))
- 25    =+\$J\$30\*135  
      =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J49\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))
- 26    =+\$J\$30\*136  
      =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J50\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))
- 27    =+\$J\$30\*137  
      =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J51\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))
- 28    =+\$J\$30\*138  
      =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J52\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))
- 29    =+\$J\$30\*139  
      =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J53\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

Continuación del apéndice 1.

30    =+\$J\$30\*I40  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J54\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

31    =+\$J\$30\*I41  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J55\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

32    =+\$J\$30\*I42  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J56\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

33    =+\$J\$30\*I43  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J57\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

34    =+\$J\$34\*I34  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J58\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

35    =+\$J\$34\*I35  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J59\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

36    =+\$J\$34\*I36  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J60\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

37    =+\$J\$34\*I37  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J61\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

38    =+\$J\$34\*I38  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J62\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

39    =+\$J\$34\*I39  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J63\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

40    =+\$J\$34\*I40  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J64\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

41    =+\$J\$34\*I41  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J65\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

42    =+\$J\$34\*I42  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J66\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

Continuación del apéndice 1.

43    =+\$J\$34\*I43  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J67\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

44    =+\$J\$34\*I44  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J68\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

45    =+\$J\$34\*I45  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J69\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

46    =+\$J\$34\*I46  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J70\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

47    =+\$J\$34\*I47  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J71\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

48    =+\$J\$34\*I48  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J72\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

49    =+\$J\$34\*I49  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J73\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

50    =+\$J\$34\*I50  
       =+\$K\$22\*(RAIZ(((N\$13\*0.0001)/(J74\*N\$9\*N\$12))\*LN((N\$10+N\$11)/(N\$10+N\$14))))

      =(N16/(RAIZ(((N13\*0.0001)/(N15\*N9\*N12))\*LN((N10+N11)/(N10+N14))))

)

DESCRIPCION    =+Tabla4[[#Encabezados],[Cobre, destemplado de suave - trazado]]

Conductividad del material (%)   =+Conductor!D12

Factor  $\alpha$  a 20°C (1/°C)   =+Conductor!D13

Ko en °C       =+Conductor!D14

Temperatura de fusión a Tm (°C)=+Conductor!D15

pr 20°C (μΩ.cm)   =+Conductor!D16

Capacidad Térmica TCAP[J/(cm3.°C)]   =+Conductor!D17

Temperatura ambiente (°C)       =+Conductor!D6

Máxima duracion de falla (S)       =+Conductor!D7

Magnitud de corriente de simétrica RMS (KA) =+Conductor!D8

Continuación del apéndice 1.

```
=+Conductor!C24
  =SI(N16/(RAIZ(((N13*0.0001)/(N15*N9*N12))*LN((N10+N11)/(N10+N14))
))<34,34,N16/(RAIZ(((N13*0.0001)/(N15*N9*N12))*LN((N10+N11)/(N10+N14))))
)
=+Conductor!C25  =+RAIZ(N19/3.1416)*2
```

```
vector x      y
  =+N15      =+BUSCARV(N27,R46:S95,2,VERDADERO)
  =+N27      0
```

```
vector x      y
  =+N27      =+O27
  0          =+O33
```

=+N20\*2.54/10

mm2		
0.52	18	0.82
0.82	16	1.31
1.31	14	2.08
2.08	12	3.31
3.31	10	5.26
5.26	8	8.36
8.36	6	13.3
13.3	4	21.2
21.2	2	33.6
33.6	1	42.4
42.4	1/0	53.5
53.5	2/0	67.4
67.4	3/0	85
85	4/0	107
107	250	127
127	300	152
152	350	177
177	400	203
203	450	228
228	500	253
253	600	304
304	750	380
380	800	405
405		

Continuación del apéndice 1.

==+J25 ==+K25  
==+J26 ==+K26  
==+J27 ==+K27  
==+J28 ==+K28  
==+J29 ==+K29  
==+J30 ==+K30  
==+J31 ==+K31  
==+J32 ==+K32  
==+J33 ==+K33  
==+J34 ==+K34  
==+J35 ==+K35  
==+J36 ==+K36  
==+J37 ==+K37  
==+J38 ==+K38  
==+J39 ==+K39  
==+J40 ==+K40  
==+J41 ==+K41  
==+J42 ==+K42  
==+J43 ==+K43  
==+J44 ==+K44  
==+J45 ==+K45  
==+J46 ==+K46  
==+J47 ==+K47  
==+J48 ==+K48  
==+J49 ==+K49  
==+J50 ==+K50  
==+J51 ==+K51  
==+J52 ==+K52  
==+J53 ==+K53  
==+J54 ==+K54  
==+J55 ==+K55  
==+J56 ==+K56  
==+J57 ==+K57  
==+J58 ==+K58  
==+J59 ==+K59  
==+J60 ==+K60  
==+J61 ==+K61  
==+J62 ==+K62  
==+J63 ==+K63  
==+J64 ==+K64

Continuación del apéndice 1.

=+J65 =+K65  
=+J66 =+K66  
=+J67 =+K67  
=+J68 =+K68  
=+J69 =+K69  
=+J70 =+K70  
=+J71 =+K71  
=+J72 =+K72  
=+J73 =+K73  
=+J74 =+K74

Ingreso de datos

Seleccione Material del conductor      Cobre, comercial de duro-trazado  
=+CT!M14    =+SPT!D38  
=+CT!M15    0.33  
=+CT!M16    =+SPT!D42\*SPT!D45

Tabla 1 norma IEEE 80-2000

Seleccione Material del conductor      Cobre, destemplado de suave -  
trazado

Conductividad del material (%)    =BUSCARV(D5,materiales,2,FALSO)  
Factor  $\alpha$  a 20°C (1/°C)    =BUSCARV(D5,materiales,3,FALSO)  
Ko en °C    =BUSCARV(D5,materiales,4,FALSO)  
Temperatura de fusión a Tm (°C) =BUSCARV(D5,materiales,5,FALSO)  
pr 20°C ( $\mu\Omega$ .cm)    =BUSCARV(D5,materiales,6,FALSO)  
Capacidad      Térmica      TCAP[J/(cm<sup>3</sup>.°C)]  
=BUSCARV(D5,materiales,7,FALSO)

Resultados

Conductor      recomendado  
=+BUSCARV(CT!N19,CT!R18:S41,2,VERDADERO)

Seleccione conductor a utilizar

Conductor a utilizar 4/0  
Área (mm<sup>2</sup>) =+CT!K22  
Diámetro en (mm) =+RAIZ(D24/3.1416)\*2  
Máxima corriente soportada a duración de falla KA    =+CT!J23

Comparación de corrientes de fusión de conductor de calibre establecido  
para diferentes intervalos de tiempo

Continuación del apéndice 1.

Calibre de conductor a utilizar =+D23  
=+Tabla4[[#Encabezados],[Cobre, destemplado de suave -trazado]]

#### INGRESO DE DATOS DEL TERRENO

Ancho de la malla 40 m  
Longitud de la malla 30 m  
Profundidad de la Malla h 0.5 m  
Espesor Capa Superficial hs 0.15 m  
Resistividad Capa Superficial  $\rho_s$  2500  $\Omega \cdot m$   
Modelo de terreno de una capa  
Modelo de terreno de dos capas  
Modelo ingreso valor  $\rho$   $\Omega \cdot m$  50

#### DATOS DEL TERRENO

=+C9 =+D9 =+E9  
=+C10 =+D10 =+E10  
Área de la malla =+D10\*D9 m<sup>2</sup>  
=+C11 =+D11 =+E11  
Resistividad equivalente del terreno  $\rho$  =+SI('spt datos!'H1=1,'1  
capa!'E9,SI(SPT!'H1=2,'2 capas!'F13,SPT!'E16))  $\Omega \cdot m$   
Resistividad de la capa 1  $\rho_1$  =+SI('spt datos!'H1=2,'2 capas!'I13,"No  
aplica")  $\Omega \cdot m$   
Resistividad de la capa 2  $\rho_2$  =+SI('spt datos!'H1=2,'2 capas!'I14,"No  
aplica")  $\Omega \cdot m$   
Coeficiente K =+SI('spt datos!'H1=2,'2 capas!'I15,"No aplica")  
Espesor capa superficial =+SI('spt datos!'H1=2,'2 capas!'I16,"No aplica")  
m

#### INGRESO DE DATOS PARA EL CALCULO DE LA CORRIENTE DE FALLA

Corriente de falla a tierra lado de Alta tensión 8000 A  
Corriente de falla a tierra lado de baja tensión 8000 A  
Relación X/R del sistema 20 Factor  
Cantidad de torres de transmisión por línea /km 4 Torres / km  
Resistencia de puesta a tierra de las torres de AT Rtg 10  $\Omega$   
Impedancia de los cables de guarda Z1 0.472  $\Omega/km$   
Cantidad de cables de guarda en la línea de AT 2 N cables  
=+Conductor!C6 40 °C

#### DATOS PARA EL CALCULO DE LA CORRIENTE DE FALLA

Duración de la corriente de falla =+Conductor!D7 Seg.

Continuación del apéndice 1.

Factor de Decremento Df =RAIZ(1+D33/(2\*3.1416\*60)/D40\*(1-EXP(-  
 2\*D40/(D33/(2\*3.1416\*60)))) Factor  
 Corriente de Diseño de los Conductores (Lado de Mayor If)  
 =SI(D31>D32,D31\*D41,D32\*D41)/1000 KA  
 Impedancia equivalente de los cables de guarda y torres Zeq  
 =+RAIZ(D36\*D35/D34)/D37 Ω  
 Factor Divisor de Corriente Sf (depende de Rg)  
 =+D43/(D43+Tensiones!D33) %  
 Factor crecimiento 1.5 Factor  
 Corriente de Diseño del Espaciamiento IG (Lado AT)  
 =+D44\*D41\*SI(D31>D32,D31,D32)\*D45/1000 kA

=+SI(B1=1,0.116,0.157) =+CT!#jREF!

Tensiones tolerables  
 Tensión de Toque Tolerable Etouch  
 =((1000+(1.5\*D12\*SPT!D13))\*A1)/(RAIZ(SPT!D40)) V  
 Tensión de Paso Tolerable Estep  
 =(1000+6\*D12\*SPT!D13)\*A1/(RAIZ(SPT!D40)) V  
 Factor de Reflexión K =+(SPT!D22-SPT!D13)/(SPT!D22+SPT!D13)  
 Factor de Reducción del Terreno Cs =1-0.09\*((1-  
 (SPT!D22/SPT!D13))/(2\*SPT!D12+0.09))  
 Criterio 50 Kg  
 Criterio 70 kg  
 Diseño preliminar  
 =+SPT!C9 =+SPT!D9 =+SPT!E9  
 =+SPT!C10 =+SPT!D10 =+SPT!E10  
 Área de la malla =+D18\*D17 m^2  
 Espacio Entre Conductores Paralelos D8 m  
 Profundidad de la malla =+SPT!\$D\$21 m  
 Longitud de conductores en el perímetro Lp =+D17\*2+D18\*2 m  
 N° de Conductores Paralelos al ancho =+REDONDEAR.MAS(((D17/D20)+1),0)  
 N  
 N° de Conductores Paralelos al largo =+REDONDEAR.MAS((D18/D20+1),0)  
 N  
 Longitud Total de conductor de la malla =+D23\*D18+D24\*D17 m  
 Cantidad de varillas enterradas 25 N  
 Longitud de varilla 2.43 m  
 Diámetro de las varillas =0.01737 mm  
 Longitud Total de varillas enterradas =+D27\*D26 m  
 Longitud Total del Conductor de la Malla Lc =+D23\*D18+D24\*D17 m

Continuación del apéndice 1.

Longitud Total de conductores y varillas enterradas =+D30+D29 m  
=+SPT!C22 =+SPT!D22 =+SPT!E22  
Resistencia de la puesta a tierra =+Rmalla!E3=+SPT!E43

Calculo del GPR

GPR =+D33\*SPT!D46\*1000 v

Calculo de tensiones de retícula

Tensión de Toque Em =+Ten!E17 V

Tensión de Paso Es =+Ten!E37 V

Comparación

=+C41 =+D41 =+E41

=+Tensiones!C9 =+D9 =+E9

=+C42 =+D42 =+E42

=+C10 =+D10 =+E10

=SI(Y(D48<D49,D51<D52),"El diseño es seguro", "El diseño requiere hacer correcciones")

=+Tensiones!C17 =+Tensiones!D17 =+Tensiones!E17

Rg =+((\_R1\*\_R2-\_R12^2)/(\_R1+\_R2-2\*\_R12)) =+Tensiones!C18

=+Tensiones!D18 =+Tensiones!E18 Lado mayor =+SI(K2<K3,K3,K2)

R1 =+(p/(3.14159\*LC))\*(LN(2\*LC/K22)+(\_k1\*LC/RAIZ(K4))-  
\_k2)=+Tensiones!C19 =+Tensiones!D19 =+Tensiones!E19 lado menor  
=+SI(K2>K3,K3,K2)

R2 =+(p/(2\*3.14169\*K11\*Lr))\*(LN(4\*Lr/(K13/2))-  
1+((2\*\_k1\*Lr/RAIZ(K4)\*(RAIZ(K11-1)^2))))=+Tensiones!C20

=+Tensiones!D20 =+Tensiones!E20

R12 =+(p/(3.14159\*LC))\*(LN(2\*LC/Lr)+\_k1\*LC/RAIZ(K4)-  
\_k2+1)=+Tensiones!C21 =+Tensiones!D21 =+Tensiones!E21

=+Tensiones!C22 =+Tensiones!D22 =+Tensiones!E22 relacion  
=+SI(P3/P4<4,P3/P4,4)

=+Tensiones!C23 =+Tensiones!D23

=+Tensiones!E23=+SI(P3/P4<4,P3/P4,4)

=+Tensiones!C24 =+Tensiones!D24 =+Tensiones!E24

=+Tensiones!C25 =+Tensiones!D25 =+Tensiones!E25

=+Tensiones!C26 =SI(Tensiones!D26<1,1,Tensiones!D26)

=+Tensiones!E26

=+Tensiones!C27 =+Tensiones!D27 =+Tensiones!E27 LR

=+Tensiones!C28 =+(Tensiones!D28/1000) =+Tensiones!E28 \_2b

=+Tensiones!C29 =+Tensiones!D29 =+Tensiones!E29

Continuación del apéndice 1.

=+Tensiones!C30 =+Tensiones!D30 =+Tensiones!E30 lc  
 =+Tensiones!C31 =+Tensiones!D31 =+Tensiones!E31  
 =+Tensiones!C32 =+Tensiones!D32 =+Tensiones!E32  
 =+Tensiones!C33 =+E4 =+Tensiones!E33  
 =+Conductor!C25 =+Conductor!D25  
 diametro conductor de malla m =+K19/1000

a =+RAIZ(K20\*2\*K6)  
 k1 =+-0.05\*P7+1.2  
 k2 =0.1\*P7+4.68tipo de modelado  
 =+B10=+A2\*1.1 =+SI(B2>B3,B2,B3)  
 =+B11=+A3\*1.1  
 área de gráfico

vector terreno =+C2 =+C2  
 0 0 0 =+B9  
 0 =+SPT!D10 =+SPT!D9 =+SPT!D10  
 =+SPT!D9  
 =+SPT!D10

0 0 =+SPT!D9 =+SPT!D10  
 =+SPT!D9 0 =+SPT!D9 0  
 =+Tensiones!B17 =+Tensiones!C17 =+Tensiones!D17 =+Tensiones!E17  
 =+Tensiones!B18 =+Tensiones!C18 =+Tensiones!D18 =+Tensiones!E18  
 =+Tensiones!B19 =+Tensiones!C19 =+Tensiones!D19 =+Tensiones!E19  
 =+Tensiones!B20 =+Tensiones!C20 =+Tensiones!D20 =+Tensiones!E20  
 =+Tensiones!B21 =+Tensiones!C21 =+Tensiones!D21 =+Tensiones!E21  
 =+Tensiones!B22 =+Tensiones!C22 =+Tensiones!D22 =+Tensiones!E22  
 =+Tensiones!B23 =+Tensiones!C23 =+Tensiones!D23 =+Tensiones!E23  
 =+Tensiones!B24 =+Tensiones!C24 =+Tensiones!D24 =+Tensiones!E24  
 =+Tensiones!B25 =+Tensiones!C25 =+Tensiones!D25 =+Tensiones!E25  
 =+Tensiones!B26 =+Tensiones!C26 =+Tensiones!D26 =+Tensiones!E26  
 =+Tensiones!B27 =+Tensiones!C27 =+Tensiones!D27 =+Tensiones!E27  
 =+Tensiones!B29 =+Tensiones!C29 =+Tensiones!D29 =+Tensiones!E29  
 =(E18\*E19\*E20\*E21)/(E22+(96\*(1.55+1.22\*(I27/RAIZ(C1^2+C2^2))))))  
 =+Tensiones!B30 =+Tensiones!C30 =+Tensiones!D30 =+Tensiones!E30  
 =(F18\*F19\*F20\*F21)/(F22+(96\*(1.55+1.22\*(I27/RAIZ(C1^2+C2^2))))))  
 =+Tensiones!B31 =+Tensiones!C31 =+Tensiones!D31 =+Tensiones!E31  
 =+Tensiones!B32 =+Tensiones!C32 =+Tensiones!D32 =+Tensiones!E32

Continuación del apéndice 1.

Tensión de Toque Em V Em  
 $=E18 * E19 * E20 * E21 / (E22 + I25 * I27 * (1.55 + 1.22 * I27 / \text{RAIZ}(\text{Tensiones!D17}^2 + \text{Tensiones!D18}^2)))$   
 Resistividad del Suelo r W.m b =+SPT!D22 400  
 Factor de Espaciamiento Para Tensión de Toque Km- km =E25  
 0.746 Factor Correctivo por Geometría de la Malla Ki - ki  
 =E34 2.343  
 Máxima Corriente de la Malla IG A IG =+SPT!D46\*1000 1472  
 Longitud Total del Conductor de la Malla Lc m L =+C13  
 1790

Factor de Espaciamiento Para Tensión de Toque  
 Factor de Espaciamiento Para Tensión de Toque Km- km  
 $=1 / (2 * 3.1416) * (\text{LN}(E26^2 / (16 * E27 * E29)) + (E26 + 2 * E27)^2 / (8 * E26 * E29) - E27 / (4 * E29)) + E30 / E31 * \text{LN}(8 / (3.1416 * (2 * E28 - 1)))$  Número de Jabalinas nR  
 - =+C10  
 Espacio Entre Conductores Paralelos Dm D =+Tensiones!D20  
 Profundidad de la Malla h m h =+Tensiones!D21 Longitud de las  
 Jabalinas Lr m =+C11  
 N° Efectivo de Conductores Paralelos de la Cuadrícula n - n  
 $=\text{SI}(C1 = C2, 2 * C14 / (2 * C1 + 2 * C2), C13 / (\text{RAIZ}(2 * C1 + 2 * C2) * C3^{0.25}))$   
 Diámetro del Conductor de la Malla d m d  
 =+Conductor!D25/1000  
 Factor Correctivo del Efecto de las Jabalinas Kii - kii =1  
 Factor Correctivo por Profundidad de los Conductores Kh - kh  
 =RAIZ(1+E27)

Factor Correctivo por Geometría de la Malla  
 Factor Correctivo por Geometría de la Malla Ki - ki  
 =0.644+0.148\*E28

Calculo de Tensión de Paso  
 Tensión de Paso Es V Es  
 $=E38 * E39 * E40 * E41 / (0.75 * C13 + 0.85 * C12)$   
 Resistividad del Suelo r W.m b =E18  
 Factor de Espaciamiento Para Tensión de Paso Ks - ks =E45  
 Factor Correctivo por Geometría de la Malla Ki - ki =E34  
 Máxima Corriente de la Malla IG A IG =E21  
 Longitud Total del Conductor de la Malla Ls m L  
 =0.75\*E22+0.85\*I25\*I27

Continuación del apéndice 1.

Factor de Espaciamiento Para Tensión de Paso  
Factor de Espaciamiento Para Tensión de Paso  $K_s$  -  $k_s$   
 $=1/3.1416*(1/(2*E47)+1/(E46+E47)+1/E46*(1-0.5^{(E48-2)}))$   
Espacio Entre Conductores Paralelos  $D_m$   $D$  =E26  
Profundidad de la Malla  $h_m$   $h$  =E27  
N° Efectivo de Conductores Paralelos de la Cuadrícula  $n$  -  $n$   
=E28

Ingreso de datos  
Seleccione Material del conductor Cobre  
=+xConductor!L14 =+SPT!D38  
=+xConductor!L15 0.33  
=+xConductor!L16 =+SPT!D42\*SPT!D45

Tabla 1 norma IEEE norma BS EN 50522:2010  
Seleccione Material del conductor  
=BUSCARV(D5,materiales,1,FALSO)  
 $\beta$  °C =BUSCARV(D5,materiales,2,FALSO)  
K constante dependiente del material  
=BUSCARV(D5,materiales,3,FALSO)  
Temperatura final °C =BUSCARV(D5,materiales,5,FALSO)

Resultados  
Área (mm<sup>2</sup>) =+xConductor!M19  
Awg =+BUSCARV(D17,xConductor!C25:D48,2,VERDADERO)

Resultados  
Conductor a utilizar 4/0  
Máxima corriente soportada a duración de falla =+xConductor!J23  
Área (mm<sup>2</sup>) =+xConductor!K22  
Diámetro en (mm) =+RAIZ(D23/3.1416)\*2  
Máxima corriente soportada a duración de falla KA  
=+xConductor!J23/1000

Comparación de corrientes de fusión de conductor de calibre establecido para diferentes intervalos de tiempo

Calibre de conductor a utilizar =+D21

Continuación del apéndice 1.

=+D11

=BUSCARV(D7,materiales,1,FALSO)

DESCRIPCION	B en °C	K	Columna1	final temp	Columna3
Columna4					
Cobre	234.5	2261083			
Aluminio	228	148657			
Hierro 202	781400				
DESCRIPCION					
=+materiales[[#Encabezados],[B en °C]]					=+Conductor!D12
=+materiales[[#Encabezados],[K]]					=+Conductor!D13
=+materiales[[#Encabezados],[final temp]]					=+Conductor!D14
Temperatura ambiente (°C)					=+Conductor!D6
Máxima duracion de falla (S)					=+Conductor!D7
Magnitud de corriente de simétrica RMS (KA)					=+Conductor!D8*1000

=(M16/M12)\*(RAIZ(M15/(LN((M11+M13)/(M11+M14))))))

Área de cable

0.52	18	0.82
0.82	16	1.31
1.31	14	2.08
2.08	12	3.31
3.31	10	5.26
5.26	8	8.36
8.36	6	13.3
13.3	4	21.2
21.2	2	33.6
33.6	1	42.4
42.4	1/0	53.5
53.5	2/0	67.4
67.4	3/0	85
85	4/0	107
107	250	127
127	300	152
152	350	177
177	400	203

Continuación del apéndice 1.

203	450	228	
228	500	253	
253	600	304	
304	750	380	
380	800	405	0
405			

==+J25 ==+K25  
==+J26 ==+K26  
==+J27 ==+K27  
==+J28 ==+K28  
==+J29 ==+K29  
==+J30 ==+K30  
==+J31 ==+K31  
==+J32 ==+K32  
==+J33 ==+K33  
==+J34 ==+K34  
==+J35 ==+K35  
==+J36 ==+K36  
==+J37 ==+K37  
==+J38 ==+K38  
==+J39 ==+K39  
==+J40 ==+K40  
==+J41 ==+K41  
==+J42 ==+K42  
==+J43 ==+K43  
==+J44 ==+K44  
==+J45 ==+K45  
==+J46 ==+K46  
==+J47 ==+K47  
==+J48 ==+K48  
==+J49 ==+K49  
==+J50 ==+K50  
==+J51 ==+K51  
==+J52 ==+K52  
==+J53 ==+K53  
==+J54 ==+K54  
==+J55 ==+K55  
==+J56 ==+K56  
==+J57 ==+K57

Continuación del apéndice 1.

```

=+J58 =+K58
=+J59 =+K59
=+J60 =+K60
=+J61 =+K61
=+J62 =+K62
=+J63 =+K63
=+J64 =+K64
=+J65 =+K65
=+J66 =+K66
=+J67 =+K67
=+J68 =+K68
=+J69 =+K69
=+J70 =+K70
=+J71 =+K71
=+J72 =+K72
=($K$22*$M$12)*(1/(RAIZ($M$15/(LN(($M$11+$M$13)/($M$11+$M$14))))))
tiempos
    1      0.025
      =($K$22*$M$12)*(1/(RAIZ(J25/(LN(($M$11+$M$13)/($M$11+$M$14))))))
/1000
    2      =+$J$25*I26
      =($K$22*$M$12)*(1/(RAIZ(J26/(LN(($M$11+$M$13)/($M$11+$M$14))))))
/1000 vector x      y
    3      =+$J$25*I27
      =($K$22*$M$12)*(1/(RAIZ(J27/(LN(($M$11+$M$13)/($M$11+$M$14))))))
/1000=+M15 =+BUSCARV(M27,C53:D102,2,VERDADERO)
    4      =+$J$25*I28
      =($K$22*$M$12)*(1/(RAIZ(J28/(LN(($M$11+$M$13)/($M$11+$M$14))))))
/1000=+M27 0
    5      =+$J$26*I27
      =($K$22*$M$12)*(1/(RAIZ(J29/(LN(($M$11+$M$13)/($M$11+$M$14))))))
/1000
    6      =+$J$26*I28
      =($K$22*$M$12)*(1/(RAIZ(J30/(LN(($M$11+$M$13)/($M$11+$M$14))))))
/1000
    7      =+$J$26*I29
      =($K$22*$M$12)*(1/(RAIZ(J31/(LN(($M$11+$M$13)/($M$11+$M$14))))))
/1000
    8      =+$J$26*I30
      =($K$22*$M$12)*(1/(RAIZ(J32/(LN(($M$11+$M$13)/($M$11+$M$14))))))
/1000 vector x      y

```

Continuación del apéndice 1.

$$\begin{aligned}
 & 9 \quad =+\$J\$26*I31 \\
 & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J33/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\
 /1000 & =+M27 \quad =+N27 \\
 & 10 \quad =+\$J\$26*I32 \\
 & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J34/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\
 /10000 & \quad =+N33 \\
 & 11 \quad =+\$J\$26*I33 \\
 & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J35/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\
 /1000 & \\
 & 12 \quad =+\$J\$26*I34 \\
 & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J36/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\
 /1000 & \\
 & 13 \quad =+\$J\$28*I30 \\
 & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J37/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\
 /1000 & \\
 & 14 \quad =+\$J\$28*I31 \\
 & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J38/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\
 /1000 & \\
 & 15 \quad =+\$J\$28*I32 \\
 & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J39/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\
 /1000 & \\
 & 16 \quad =+\$J\$28*I33 \\
 & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J40/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\
 /1000 & \\
 & 17 \quad =+\$J\$28*I34 \\
 & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J41/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\
 /1000 & \\
 & 18 \quad =+\$J\$28*I35 \\
 & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J42/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\
 /1000 & \\
 & 19 \quad =+\$J\$28*I36 \\
 & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J43/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\
 /1000 & \\
 & 20 \quad =+\$J\$28*I37 \\
 & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J44/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\
 /1000 & \\
 & 21 \quad =+\$J\$28*I38 \\
 & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J45/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\
 /1000 &
 \end{aligned}$$

Continuación del apéndice 1.

$$\begin{aligned} & 22 \quad =+\$J\$30*I32 \\ & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J46/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\ & /1000 \\ & 23 \quad =+\$J\$30*I33 \\ & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J47/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\ & /1000 \\ & 24 \quad =+\$J\$30*I34 \\ & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J48/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\ & /1000 \\ & 25 \quad =+\$J\$30*I35 \\ & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J49/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\ & /1000 \\ & 26 \quad =+\$J\$30*I36 \\ & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J50/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\ & /1000 \\ & 27 \quad =+\$J\$30*I37 \\ & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J51/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\ & /1000 \\ & 28 \quad =+\$J\$30*I38 \\ & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J52/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\ & /1000 \\ & 29 \quad =+\$J\$30*I39 \\ & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J53/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\ & /1000 \\ & 30 \quad =+\$J\$30*I40 \\ & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J54/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\ & /1000 \\ & 31 \quad =+\$J\$30*I41 \\ & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J55/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\ & /1000 \\ & 32 \quad =+\$J\$30*I42 \\ & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J56/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\ & /1000 \\ & 33 \quad =+\$J\$30*I43 \\ & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J57/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\ & /1000 \\ & 34 \quad =+\$J\$34*I34 \\ & =(\$K\$22*\$M\$12)*(1/(RAIZ(J58/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14)))))) \\ & /1000 \end{aligned}$$

Continuación del apéndice 1.

35    =+\$J\$34\*I35  
=(\$K\$22\*\$M\$12)\*(1/(RAIZ(J59/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14))))))  
/1000

36    =+\$J\$34\*I36  
=(\$K\$22\*\$M\$12)\*(1/(RAIZ(J60/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14))))))  
/1000

37    =+\$J\$34\*I37  
=(\$K\$22\*\$M\$12)\*(1/(RAIZ(J61/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14))))))  
/1000

38    =+\$J\$34\*I38  
=(\$K\$22\*\$M\$12)\*(1/(RAIZ(J62/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14))))))  
/1000

39    =+\$J\$34\*I39  
=(\$K\$22\*\$M\$12)\*(1/(RAIZ(J63/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14))))))  
/1000

40    =+\$J\$34\*I40  
=(\$K\$22\*\$M\$12)\*(1/(RAIZ(J64/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14))))))  
/1000

41    =+\$J\$34\*I41  
=(\$K\$22\*\$M\$12)\*(1/(RAIZ(J65/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14))))))  
/1000

42    =+\$J\$34\*I42  
=(\$K\$22\*\$M\$12)\*(1/(RAIZ(J66/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14))))))  
/1000

43    =+\$J\$34\*I43  
=(\$K\$22\*\$M\$12)\*(1/(RAIZ(J67/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14))))))  
/1000

44    =+\$J\$34\*I44  
=(\$K\$22\*\$M\$12)\*(1/(RAIZ(J68/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14))))))  
/1000

45    =+\$J\$34\*I45  
=(\$K\$22\*\$M\$12)\*(1/(RAIZ(J69/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14))))))  
/1000

46    =+\$J\$34\*I46  
=(\$K\$22\*\$M\$12)\*(1/(RAIZ(J70/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14))))))  
/1000

47    =+\$J\$34\*I47  
=(\$K\$22\*\$M\$12)\*(1/(RAIZ(J71/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14))))))  
/1000

Continuación del apéndice 1.

48    =+\$J\$34\*I48  
=(\$K\$22\*\$M\$12)\*(1/(RAIZ(J72/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14))))))  
/1000  
49    =+\$J\$34\*I49  
=(\$K\$22\*\$M\$12)\*(1/(RAIZ(J73/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14))))))  
/1000  
50    =+\$J\$34\*I50  
=(\$K\$22\*\$M\$12)\*(1/(RAIZ(J74/(LN((\$M\$11+\$M\$13)/(\$M\$11+\$M\$14))))))  
/1000

tipo de modelado3

=+B10=+A2\*1.1=+SI(B2>B3,B2,B3)

=+B11=+A3\*1.1

área de gráfico

vector terreno=+D2 =+D2

0    00    =+B9

0    =+SPT!D10=+SPT!D9    =+SPT!D10

=+SPT!D9

=+SPT!D10

0    0=+SPT!D9 =+SPT!D10

=+SPT!D9    0=+SPT!D9    0

INGRESO DE DATOS DEL TERRENO

Ancho de la malla    40    m

Longitud de la malla    30    m

Profundidad de la Malla h    0.5    m

Espesor Capa Superficial hs    0.15    m

Resistividad Capa Superficial ps    2500    Ω\*m

Modelo de terreno de una capa

Modelo de terreno de dos capas

Modelo ingreso valor    ρ    Ω\*m50

DATOS DEL TERRENO

=+C9 =+D9 =+E9

=+C10    =+D10    =+E10

Área de la malla    =+D10\*D9    m<sup>2</sup>

=+C11    =+D11    =+E11

Resistividad equivalente del terreno ρ    =+SI('spt

capa!'E9,SI(SPT!H1=2,'2 capas!'F13,SPT!E16))    Ω\*m

datos!'H1=1,'1

Continuación del apéndice 1.

Resistividad de la capa 1  $\rho_1$  =+SI('spt datos!'H1=2,'2 capas'!I13,"No aplica")  $\Omega \cdot m$   
 Resistividad de la capa 2  $\rho_2$  =+SI('spt datos!'H1=2,'2 capas'!I14,"No aplica")  $\Omega \cdot m$   
 Coeficiente K =+SI('spt datos!'H1=2,'2 capas'!I15,"No aplica")  
 Espesor capa superficial =+SI('spt datos!'H1=2,'2 capas'!I16,"No aplica") m

#### INGRESO DE DATOS PARA EL CALCULO DE LA CORRIENTE DE FALLA

Corriente de falla a tierra lado de Alta tensión 8000 A  
 Corriente de falla a tierra lado de baja tensión 8000 A  
 Relación X/R del sistema 20 Factor  
 Cantidad de torres de transmisión por línea /km 4 Torres / km  
 Resistencia de puesta a tierra de las torres de AT Rtg 10  $\Omega$   
 Impedancia de los cables de guarda Z1 0.472  $\Omega/km$   
 Cantidad de cables de guarda en la línea de AT 2 N cables  
 =+Conductor!C6 40  $^{\circ}C$

#### DATOS PARA EL CALCULO DE LA CORRIENTE DE FALLA

Duración de la corriente de falla =+Conductor!D7 Seg.  
 Factor de Decremento Df =RAIZ(1+D33/(2\*3.1416\*60)/D40\*(1-EXP(-2\*D40/(D33/(2\*3.1416\*60)))) Factor  
 Corriente de Diseño de los Conductores (Lado de Mayor If) =SI(D31>D32,D31\*D41,D32\*D41)/1000 KA  
 Impedancia equivalente de los cables de guarda y torres Zeq =+RAIZ(D36\*D35/D34)/D37  $\Omega$   
 Factor Divisor de Corriente Sf (depende de Rg) =+D43/(D43+Tensiones!G32) %  
 Factor crecimiento 1.5 Factor  
 Corriente de Diseño del Espaciamiento IG (Lado AT) =+D44\*D41\*D31\*D45/1000 kA

#### Tensiones tolerables

Tensión de Toque Tolerable Etouch =+xTSeguridad!T8 V  
 Tensión de Paso Tolerable Estep =+xTSeguridad!T9 V  
 Factor de Reducción del Terreno Cs =1-0.09\*((1-(SPT!D22/(SPT!D13+xTSeguridad!D2)))/(2\*SPT!D12+0.09))  
 Tiempo de la falla para criterio de seguridad (S) 0.5 s  
 Probabilidad de fibrilación ventricular aumento de hasta 5%  
 Probabilidad de fibrilación ventricular hasta aproximadamente 50%  
 Probabilidad de fibrilación ventricular por encima de 50%

Continuación del apéndice 1.

Diseño preliminar

$=+SPT!C9$   $=+SPT!D9$   $=+SPT!E9$

$=+SPT!C10$   $=+SPT!D10$   $=+SPT!E10$

Área de la malla  $=+G18*G17$  m<sup>2</sup>

Espacio Entre Conductores Paralelos D3 m

Profundidad de la malla  $=+SPT!\$D\$21$  m

Longitud de conductores en el perímetro Lp  $=+G17*2+G18*2$  m

N° de Conductores Paralelos al ancho

$=+REDONDEAR.MAS(((G17/G20)+1),0)$  N

N° de Conductores Paralelos al largo  $=+REDONDEAR.MAS((G18/G20+1),0)$   
N

Longitud Total de conductor de la malla  $=+G23*G18+G24*G17$  m

Cantidad de varillas enterradas 25 N

Longitud de varilla 2.43 m

Longitud Total de varillas enterradas  $=+G27*G26$  m

Longitud Total del Conductor de la Malla Lc  $=+G23*G18+G24*G17$  m

Longitud Total de conductores y varillas enterradas  $=+G29+G28$  m

$=+SPT!C22$   $=+SPT!D22$   $=+SPT!E22$

Resistencia de la puesta a tierra

$=G31*((1/G30+1/RAIZ(20*G19)*(1+1/(1+G21*RAIZ(20/G19))))))$

$=+SPT!E43$

Calculo del EPR

EPR (Earth potencial rise)  $=+G32*SPT!D46*1000$  v

Calculo de tensiones de retícula

Tensión de Toque Em  $=+xTtolerable!E17$  V

Tensión de Paso Es  $=+xTtolerable!E37$  V

Comparación

$=+F40$   $=+G40$   $=+H40$

$=+Tensiones!F7$   $=+G7$   $=+H7$

$=SI(Y(G47<G48), "El diseño es seguro", "El diseño requiere hacer correcciones")$

Resistencia de las botas0

Resistencia de capa super  $=+SPT!D13$   $=+(D3)*D4*1.5$   $=+(D3)*D4*6$

Factor cs  $=+Tensiones!G10$

Continuación del apéndice 1.

Tiempo voltaje  
 =+Conductor!D7 =+BUSCARV(B8,voltaje,2,1)

Tiempo	Voltaje	impedancia	corriente	Rmano	mano2
	Rpaso	Columna1			
0	716	=+BUSCARV(C13,impedancia,2,1)			
		=+BUSCARV(B12,corriente,\$R\$3,VERDADERO)		=+D12*0.68+\$M\$2	
		=+[@Rmano]*[@corriente]		=+D12*0.68+\$N\$2	
		=+[@Rpaso]*[@corriente]			
0.05	703.6	=+BUSCARV(C14,impedancia,2,1)			
		=+BUSCARV(B13,corriente,\$R\$3,VERDADERO)		=+D13*0.68+\$M\$2	
		=+[@Rmano]*[@corriente]		=+D13*0.68+\$N\$2	
		=+[@Rpaso]*[@corriente]			
0.06	691.2	=+BUSCARV(C15,impedancia,2,1)			
		=+BUSCARV(B14,corriente,\$R\$3,VERDADERO)		=+D14*0.68+\$M\$2	
		=+[@Rmano]*[@corriente]		=+D14*0.68+\$N\$2	
		=+[@Rpaso]*[@corriente]			
0.07	678.8	=+BUSCARV(C16,impedancia,2,1)			
		=+BUSCARV(B15,corriente,\$R\$3,VERDADERO)		=+D15*0.68+\$M\$2	
		=+[@Rmano]*[@corriente]		=+D15*0.68+\$N\$2	
		=+[@Rpaso]*[@corriente]			
0.08	666.4	=+BUSCARV(C17,impedancia,2,1)			
		=+BUSCARV(B16,corriente,\$R\$3,VERDADERO)		=+D16*0.68+\$M\$2	
		=+[@Rmano]*[@corriente]		=+D16*0.68+\$N\$2	
		=+[@Rpaso]*[@corriente]			
0.09	654	=+BUSCARV(C18,impedancia,2,1)			
		=+BUSCARV(B17,corriente,\$R\$3,VERDADERO)		=+D17*0.68+\$M\$2	
		=+[@Rmano]*[@corriente]		=+D17*0.68+\$N\$2	
		=+[@Rpaso]*[@corriente]			
0.1	642.3	=+BUSCARV(C19,impedancia,2,1)			
		=+BUSCARV(B18,corriente,\$R\$3,VERDADERO)		=+D18*0.68+\$M\$2	
		=+[@Rmano]*[@corriente]		=+D18*0.68+\$N\$2	
		=+[@Rpaso]*[@corriente]			
0.11	630.6	=+BUSCARV(C20,impedancia,2,1)			
		=+BUSCARV(B19,corriente,\$R\$3,VERDADERO)		=+D19*0.68+\$M\$2	
		=+[@Rmano]*[@corriente]		=+D19*0.68+\$N\$2	
		=+[@Rpaso]*[@corriente]			
0.12	618.9	=+BUSCARV(C21,impedancia,2,1)			
		=+BUSCARV(B20,corriente,\$R\$3,VERDADERO)		=+D20*0.68+\$M\$2	
		=+[@Rmano]*[@corriente]		=+D20*0.68+\$N\$2	
		=+[@Rpaso]*[@corriente]			

Continuación del apéndice 1.

- 0.13 607.2 =+BUSCARV(C22,impedancia,2,1)  
 =+BUSCARV(B21,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D21\*0.68+\$M\$2  
 =+[@Rmano]\*[@corriente] =+D21\*0.68+\$N\$2  
 =+[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.14 595.5 =+BUSCARV(C23,impedancia,2,1)  
 =+BUSCARV(B22,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D22\*0.68+\$M\$2  
 =+[@Rmano]\*[@corriente] =+D22\*0.68+\$N\$2  
 =+[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.15 583.8 =+BUSCARV(C24,impedancia,2,1)  
 =+BUSCARV(B23,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D23\*0.68+\$M\$2  
 =+[@Rmano]\*[@corriente] =+D23\*0.68+\$N\$2  
 =+[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.16 572.1 =+BUSCARV(C25,impedancia,2,1)  
 =+BUSCARV(B24,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D24\*0.68+\$M\$2  
 =+[@Rmano]\*[@corriente] =+D24\*0.68+\$N\$2  
 =+[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.17 560.4 =+BUSCARV(C26,impedancia,2,1)  
 =+BUSCARV(B25,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D25\*0.68+\$M\$2  
 =+[@Rmano]\*[@corriente] =+D25\*0.68+\$N\$2  
 =+[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.18 548.7 =+BUSCARV(C27,impedancia,2,1)  
 =+BUSCARV(B26,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D26\*0.68+\$M\$2  
 =+[@Rmano]\*[@corriente] =+D26\*0.68+\$N\$2  
 =+[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.19 537 =+BUSCARV(C28,impedancia,2,1)  
 =+BUSCARV(B27,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D27\*0.68+\$M\$2  
 =+[@Rmano]\*[@corriente] =+D27\*0.68+\$N\$2  
 =+[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.2 526.43333333333333 =+BUSCARV(C29,impedancia,2,1)  
 =+BUSCARV(B28,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D28\*0.68+\$M\$2  
 =+[@Rmano]\*[@corriente] =+D28\*0.68+\$N\$2  
 =+[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.21 515.86666666666667 =+BUSCARV(C30,impedancia,2,1)  
 =+BUSCARV(B29,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D29\*0.68+\$M\$2  
 =+[@Rmano]\*[@corriente] =+D29\*0.68+\$N\$2  
 =+[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.22 505.3 =+BUSCARV(C31,impedancia,2,1)  
 =+BUSCARV(B30,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D30\*0.68+\$M\$2  
 =+[@Rmano]\*[@corriente] =+D30\*0.68+\$N\$2  
 =+[@Rpaso]\*[@corriente]



Continuación del apéndice 1.

- 0.33 389.066666666667 =+BUSCARV(C42,impedancia,2,1)  
=+BUSCARV(B41,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D41\*0.68+\$M\$2  
=+[@Rmano]\*[@corriente] =+D41\*0.68+\$N\$2  
=+[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.34 378.5 =+BUSCARV(C43,impedancia,2,1)  
=+BUSCARV(B42,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D42\*0.68+\$M\$2  
=+[@Rmano]\*[@corriente] =+D42\*0.68+\$N\$2  
=+[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.35 367.933333333333 =+BUSCARV(C44,impedancia,2,1)  
=+BUSCARV(B43,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D43\*0.68+\$M\$2  
=+[@Rmano]\*[@corriente] =+D43\*0.68+\$N\$2  
=+[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.36 357.366666666667 =+BUSCARV(C45,impedancia,2,1)  
=+BUSCARV(B44,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D44\*0.68+\$M\$2  
=+[@Rmano]\*[@corriente] =+D44\*0.68+\$N\$2  
=+[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.37 346.8 =+BUSCARV(C46,impedancia,2,1)  
=+BUSCARV(B45,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D45\*0.68+\$M\$2  
=+[@Rmano]\*[@corriente] =+D45\*0.68+\$N\$2  
=+[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.38 336.233333333333 =+BUSCARV(C47,impedancia,2,1)  
=+BUSCARV(B46,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D46\*0.68+\$M\$2  
=+[@Rmano]\*[@corriente] =+D46\*0.68+\$N\$2  
=+[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.39 325.666666666667 =+BUSCARV(C48,impedancia,2,1)  
=+BUSCARV(B47,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D47\*0.68+\$M\$2  
=+[@Rmano]\*[@corriente] =+D47\*0.68+\$N\$2  
=+[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.4 315.1 =+BUSCARV(C49,impedancia,2,1)  
=+BUSCARV(B48,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D48\*0.68+\$M\$2  
=+[@Rmano]\*[@corriente] =+D48\*0.68+\$N\$2  
=+[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.41 304.533333333333 =+BUSCARV(C50,impedancia,2,1)  
=+BUSCARV(B49,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D49\*0.68+\$M\$2  
=+[@Rmano]\*[@corriente] =+D49\*0.68+\$N\$2  
=+[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.42 293.966666666667 =+BUSCARV(C51,impedancia,2,1)  
=+BUSCARV(B50,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D50\*0.68+\$M\$2  
=+[@Rmano]\*[@corriente] =+D50\*0.68+\$N\$2  
=+[@Rpaso]\*[@corriente]

Continuación del apéndice 1.

- 0.43 283.4 +=BUSCARV(C52,impedancia,2,1)  
 +=BUSCARV(B51,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=D51\*0.68+\$M\$2  
 +=[@Rmano]\*[@corriente] +=D51\*0.68+\$N\$2  
 +=[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.44 272.83333333333333 +=BUSCARV(C53,impedancia,2,1)  
 +=BUSCARV(B52,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=D52\*0.68+\$M\$2  
 +=[@Rmano]\*[@corriente] +=D52\*0.68+\$N\$2  
 +=[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.45 262.26666666666667 +=BUSCARV(C54,impedancia,2,1)  
 +=BUSCARV(B53,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=D53\*0.68+\$M\$2  
 +=[@Rmano]\*[@corriente] +=D53\*0.68+\$N\$2  
 +=[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.46 251.7 +=BUSCARV(C55,impedancia,2,1)  
 +=BUSCARV(B54,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=D54\*0.68+\$M\$2  
 +=[@Rmano]\*[@corriente] +=D54\*0.68+\$N\$2  
 +=[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.47 241.13333333333333 +=BUSCARV(C56,impedancia,2,1)  
 +=BUSCARV(B55,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=D55\*0.68+\$M\$2  
 +=[@Rmano]\*[@corriente] +=D55\*0.68+\$N\$2  
 +=[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.48 230.56666666666667 +=BUSCARV(C57,impedancia,2,1)  
 +=BUSCARV(B56,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=D56\*0.68+\$M\$2  
 +=[@Rmano]\*[@corriente] +=D56\*0.68+\$N\$2  
 +=[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.49 220 +=BUSCARV(C58,impedancia,2,1)  
 +=BUSCARV(B57,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=D57\*0.68+\$M\$2  
 +=[@Rmano]\*[@corriente] +=D57\*0.68+\$N\$2  
 +=[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.5 217.94 +=BUSCARV(C59,impedancia,2,1)  
 +=BUSCARV(B58,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=D58\*0.68+\$M\$2  
 +=[@Rmano]\*[@corriente] +=D58\*0.68+\$N\$2  
 +=[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.51 215.88 +=BUSCARV(C60,impedancia,2,1)  
 +=BUSCARV(B59,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=D59\*0.68+\$M\$2  
 +=[@Rmano]\*[@corriente] +=D59\*0.68+\$N\$2  
 +=[@Rpaso]\*[@corriente]
- 0.52 213.82 +=BUSCARV(C61,impedancia,2,1)  
 +=BUSCARV(B60,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=D60\*0.68+\$M\$2  
 +=[@Rmano]\*[@corriente] +=D60\*0.68+\$N\$2  
 +=[@Rpaso]\*[@corriente]

Continuación del apéndice 1.

0.53	211.76	$\begin{aligned} &=+\text{BUSCARV}(\text{C62},\text{impedancia},2,1) \\ &=+\text{BUSCARV}(\text{B61},\text{corriente},\text{\$R\$3},\text{VERDADERO}) \\ &=+[\text{@Rmano}][\text{@corriente}] \\ &=+[\text{@Rpaso}][\text{@corriente}] \end{aligned}$	$\begin{aligned} &=+\text{D61} \cdot 0.68 + \text{\$M\$2} \\ &=+\text{D61} \cdot 0.68 + \text{\$N\$2} \end{aligned}$
0.54	209.7	$\begin{aligned} &=+\text{BUSCARV}(\text{C63},\text{impedancia},2,1) \\ &=+\text{BUSCARV}(\text{B62},\text{corriente},\text{\$R\$3},\text{VERDADERO}) \\ &=+[\text{@Rmano}][\text{@corriente}] \\ &=+[\text{@Rpaso}][\text{@corriente}] \end{aligned}$	$\begin{aligned} &=+\text{D62} \cdot 0.68 + \text{\$M\$2} \\ &=+\text{D62} \cdot 0.68 + \text{\$N\$2} \end{aligned}$
0.55	207.64	$\begin{aligned} &=+\text{BUSCARV}(\text{C64},\text{impedancia},2,1) \\ &=+\text{BUSCARV}(\text{B63},\text{corriente},\text{\$R\$3},\text{VERDADERO}) \\ &=+[\text{@Rmano}][\text{@corriente}] \\ &=+[\text{@Rpaso}][\text{@corriente}] \end{aligned}$	$\begin{aligned} &=+\text{D63} \cdot 0.68 + \text{\$M\$2} \\ &=+\text{D63} \cdot 0.68 + \text{\$N\$2} \end{aligned}$
0.56	205.58	$\begin{aligned} &=+\text{BUSCARV}(\text{C65},\text{impedancia},2,1) \\ &=+\text{BUSCARV}(\text{B64},\text{corriente},\text{\$R\$3},\text{VERDADERO}) \\ &=+[\text{@Rmano}][\text{@corriente}] \\ &=+[\text{@Rpaso}][\text{@corriente}] \end{aligned}$	$\begin{aligned} &=+\text{D64} \cdot 0.68 + \text{\$M\$2} \\ &=+\text{D64} \cdot 0.68 + \text{\$N\$2} \end{aligned}$
0.57	203.52	$\begin{aligned} &=+\text{BUSCARV}(\text{C66},\text{impedancia},2,1) \\ &=+\text{BUSCARV}(\text{B65},\text{corriente},\text{\$R\$3},\text{VERDADERO}) \\ &=+[\text{@Rmano}][\text{@corriente}] \\ &=+[\text{@Rpaso}][\text{@corriente}] \end{aligned}$	$\begin{aligned} &=+\text{D65} \cdot 0.68 + \text{\$M\$2} \\ &=+\text{D65} \cdot 0.68 + \text{\$N\$2} \end{aligned}$
0.58	201.46	$\begin{aligned} &=+\text{BUSCARV}(\text{C67},\text{impedancia},2,1) \\ &=+\text{BUSCARV}(\text{B66},\text{corriente},\text{\$R\$3},\text{VERDADERO}) \\ &=+[\text{@Rmano}][\text{@corriente}] \\ &=+[\text{@Rpaso}][\text{@corriente}] \end{aligned}$	$\begin{aligned} &=+\text{D66} \cdot 0.68 + \text{\$M\$2} \\ &=+\text{D66} \cdot 0.68 + \text{\$N\$2} \end{aligned}$
0.59	199.4	$\begin{aligned} &=+\text{BUSCARV}(\text{C68},\text{impedancia},2,1) \\ &=+\text{BUSCARV}(\text{B67},\text{corriente},\text{\$R\$3},\text{VERDADERO}) \\ &=+[\text{@Rmano}][\text{@corriente}] \\ &=+[\text{@Rpaso}][\text{@corriente}] \end{aligned}$	$\begin{aligned} &=+\text{D67} \cdot 0.68 + \text{\$M\$2} \\ &=+\text{D67} \cdot 0.68 + \text{\$N\$2} \end{aligned}$
0.6	197.34	$\begin{aligned} &=+\text{BUSCARV}(\text{C69},\text{impedancia},2,1) \\ &=+\text{BUSCARV}(\text{B68},\text{corriente},\text{\$R\$3},\text{VERDADERO}) \\ &=+[\text{@Rmano}][\text{@corriente}] \\ &=+[\text{@Rpaso}][\text{@corriente}] \end{aligned}$	$\begin{aligned} &=+\text{D68} \cdot 0.68 + \text{\$M\$2} \\ &=+\text{D68} \cdot 0.68 + \text{\$N\$2} \end{aligned}$
0.61	195.28	$\begin{aligned} &=+\text{BUSCARV}(\text{C70},\text{impedancia},2,1) \\ &=+\text{BUSCARV}(\text{B69},\text{corriente},\text{\$R\$3},\text{VERDADERO}) \\ &=+[\text{@Rmano}][\text{@corriente}] \\ &=+[\text{@Rpaso}][\text{@corriente}] \end{aligned}$	$\begin{aligned} &=+\text{D69} \cdot 0.68 + \text{\$M\$2} \\ &=+\text{D69} \cdot 0.68 + \text{\$N\$2} \end{aligned}$
0.62	193.22	$\begin{aligned} &=+\text{BUSCARV}(\text{C71},\text{impedancia},2,1) \\ &=+\text{BUSCARV}(\text{B70},\text{corriente},\text{\$R\$3},\text{VERDADERO}) \\ &=+[\text{@Rmano}][\text{@corriente}] \\ &=+[\text{@Rpaso}][\text{@corriente}] \end{aligned}$	$\begin{aligned} &=+\text{D70} \cdot 0.68 + \text{\$M\$2} \\ &=+\text{D70} \cdot 0.68 + \text{\$N\$2} \end{aligned}$

Continuación del apéndice 1.

0.63	191.16	+=BUSCARV(C72,impedancia,2,1) +=BUSCARV(B71,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=[@Rmano]*[@corriente] +=[@Rpaso]*[@corriente]	=+D71*0.68+\$M\$2 +=D71*0.68+\$N\$2
0.64	189.1	+=BUSCARV(C73,impedancia,2,1) +=BUSCARV(B72,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=[@Rmano]*[@corriente] +=[@Rpaso]*[@corriente]	=+D72*0.68+\$M\$2 +=D72*0.68+\$N\$2
0.65	187.04	+=BUSCARV(C74,impedancia,2,1) +=BUSCARV(B73,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=[@Rmano]*[@corriente] +=[@Rpaso]*[@corriente]	=+D73*0.68+\$M\$2 +=D73*0.68+\$N\$2
0.66	184.98	+=BUSCARV(C75,impedancia,2,1) +=BUSCARV(B74,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=[@Rmano]*[@corriente] +=[@Rpaso]*[@corriente]	=+D74*0.68+\$M\$2 +=D74*0.68+\$N\$2
0.67	182.92	+=BUSCARV(C76,impedancia,2,1) +=BUSCARV(B75,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=[@Rmano]*[@corriente] +=[@Rpaso]*[@corriente]	=+D75*0.68+\$M\$2 +=D75*0.68+\$N\$2
0.68	180.86	+=BUSCARV(C77,impedancia,2,1) +=BUSCARV(B76,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=[@Rmano]*[@corriente] +=[@Rpaso]*[@corriente]	=+D76*0.68+\$M\$2 +=D76*0.68+\$N\$2
0.69	178.8	+=BUSCARV(C78,impedancia,2,1) +=BUSCARV(B77,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=[@Rmano]*[@corriente] +=[@Rpaso]*[@corriente]	=+D77*0.68+\$M\$2 +=D77*0.68+\$N\$2
0.7	176.74	+=BUSCARV(C79,impedancia,2,1) +=BUSCARV(B78,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=[@Rmano]*[@corriente] +=[@Rpaso]*[@corriente]	=+D78*0.68+\$M\$2 +=D78*0.68+\$N\$2
0.71	174.68	+=BUSCARV(C80,impedancia,2,1) +=BUSCARV(B79,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=[@Rmano]*[@corriente] +=[@Rpaso]*[@corriente]	=+D79*0.68+\$M\$2 +=D79*0.68+\$N\$2
0.72	172.62	+=BUSCARV(C81,impedancia,2,1) +=BUSCARV(B80,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=[@Rmano]*[@corriente] +=[@Rpaso]*[@corriente]	=+D80*0.68+\$M\$2 +=D80*0.68+\$N\$2

Continuación del apéndice 1.

0.73	170.56	=+BUSCARV(C82,impedancia,2,1) =+BUSCARV(B81,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+[@Rmano]*[@corriente] =+[@Rpaso]*[@corriente]	=+D81*0.68+\$M\$2 =+D81*0.68+\$N\$2
0.74	168.5	=+BUSCARV(C83,impedancia,2,1) =+BUSCARV(B82,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+[@Rmano]*[@corriente] =+[@Rpaso]*[@corriente]	=+D82*0.68+\$M\$2 =+D82*0.68+\$N\$2
0.75	166.44	=+BUSCARV(C84,impedancia,2,1) =+BUSCARV(B83,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+[@Rmano]*[@corriente] =+[@Rpaso]*[@corriente]	=+D83*0.68+\$M\$2 =+D83*0.68+\$N\$2
0.76	164.38	=+BUSCARV(C85,impedancia,2,1) =+BUSCARV(B84,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+[@Rmano]*[@corriente] =+[@Rpaso]*[@corriente]	=+D84*0.68+\$M\$2 =+D84*0.68+\$N\$2
0.77	162.32	=+BUSCARV(C86,impedancia,2,1) =+BUSCARV(B85,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+[@Rmano]*[@corriente] =+[@Rpaso]*[@corriente]	=+D85*0.68+\$M\$2 =+D85*0.68+\$N\$2
0.78	160.26	=+BUSCARV(C87,impedancia,2,1) =+BUSCARV(B86,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+[@Rmano]*[@corriente] =+[@Rpaso]*[@corriente]	=+D86*0.68+\$M\$2 =+D86*0.68+\$N\$2
0.79	158.2	=+BUSCARV(C88,impedancia,2,1) =+BUSCARV(B87,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+[@Rmano]*[@corriente] =+[@Rpaso]*[@corriente]	=+D87*0.68+\$M\$2 =+D87*0.68+\$N\$2
0.8	156.14	=+BUSCARV(C89,impedancia,2,1) =+BUSCARV(B88,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+[@Rmano]*[@corriente] =+[@Rpaso]*[@corriente]	=+D88*0.68+\$M\$2 =+D88*0.68+\$N\$2
0.81	154.08	=+BUSCARV(C90,impedancia,2,1) =+BUSCARV(B89,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+[@Rmano]*[@corriente] =+[@Rpaso]*[@corriente]	=+D89*0.68+\$M\$2 =+D89*0.68+\$N\$2
0.82	152.02	=+BUSCARV(C91,impedancia,2,1) =+BUSCARV(B90,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+[@Rmano]*[@corriente] =+[@Rpaso]*[@corriente]	=+D90*0.68+\$M\$2 =+D90*0.68+\$N\$2

Continuación del apéndice 1.

0.83	149.96	=+BUSCARV(C92,impedancia,2,1) +=BUSCARV(B91,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=[@Rmano]*[@corriente] +=[@Rpaso]*[@corriente]	=+D91*0.68+\$M\$2 +=D91*0.68+\$N\$2
0.84	147.9	=+BUSCARV(C93,impedancia,2,1) +=BUSCARV(B92,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=[@Rmano]*[@corriente] +=[@Rpaso]*[@corriente]	=+D92*0.68+\$M\$2 +=D92*0.68+\$N\$2
0.85	145.84	=+BUSCARV(C94,impedancia,2,1) +=BUSCARV(B93,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=[@Rmano]*[@corriente] +=[@Rpaso]*[@corriente]	=+D93*0.68+\$M\$2 +=D93*0.68+\$N\$2
0.86	143.78	=+BUSCARV(C95,impedancia,2,1) +=BUSCARV(B94,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=[@Rmano]*[@corriente] +=[@Rpaso]*[@corriente]	=+D94*0.68+\$M\$2 +=D94*0.68+\$N\$2
0.87	141.72	=+BUSCARV(C96,impedancia,2,1) +=BUSCARV(B95,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=[@Rmano]*[@corriente] +=[@Rpaso]*[@corriente]	=+D95*0.68+\$M\$2 +=D95*0.68+\$N\$2
0.88	139.66	=+BUSCARV(C97,impedancia,2,1) +=BUSCARV(B96,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=[@Rmano]*[@corriente] +=[@Rpaso]*[@corriente]	=+D96*0.68+\$M\$2 +=D96*0.68+\$N\$2
0.89	137.6	=+BUSCARV(C98,impedancia,2,1) +=BUSCARV(B97,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=[@Rmano]*[@corriente] +=[@Rpaso]*[@corriente]	=+D97*0.68+\$M\$2 +=D97*0.68+\$N\$2
0.9	135.54	=+BUSCARV(C99,impedancia,2,1) +=BUSCARV(B98,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=[@Rmano]*[@corriente] +=[@Rpaso]*[@corriente]	=+D98*0.68+\$M\$2 +=D98*0.68+\$N\$2
0.91	133.48	=+BUSCARV(C100,impedancia,2,1) +=BUSCARV(B99,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=[@Rmano]*[@corriente] +=[@Rpaso]*[@corriente]	=+D99*0.68+\$M\$2 +=D99*0.68+\$N\$2
0.92	131.42	=+BUSCARV(C101,impedancia,2,1) +=BUSCARV(B100,corriente,\$R\$3,VERDADERO) +=[@Rmano]*[@corriente] +=[@Rpaso]*[@corriente]	=+D100*0.68+\$M\$2 +=D100*0.68+\$N\$2

Continuación del apéndice 1.

=+BUSCARV(B101,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D101\*0.68+\$M\$2  
 =+[@Rmano]\*[@corriente] =+D101\*0.68+\$N\$2  
 =+[@Rpaso]\*[@corriente]  
 0.94 127.3 =+BUSCARV(C103,impedancia,2,1)  
 =+BUSCARV(B102,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D102\*0.68+\$M\$2  
 =+[@Rmano]\*[@corriente] =+D102\*0.68+\$N\$2  
 =+[@Rpaso]\*[@corriente]  
 0.95 125.24 =+BUSCARV(C104,impedancia,2,1)  
 =+BUSCARV(B103,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D103\*0.68+\$M\$2  
 =+[@Rmano]\*[@corriente] =+D103\*0.68+\$N\$2  
 =+[@Rpaso]\*[@corriente]  
 0.96 123.18 =+BUSCARV(C105,impedancia,2,1)  
 =+BUSCARV(B104,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D104\*0.68+\$M\$2  
 =+[@Rmano]\*[@corriente] =+D104\*0.68+\$N\$2  
 =+[@Rpaso]\*[@corriente]  
 0.97 121.12 =+BUSCARV(C106,impedancia,2,1)  
 =+BUSCARV(B105,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D105\*0.68+\$M\$2  
 =+[@Rmano]\*[@corriente] =+D105\*0.68+\$N\$2  
 =+[@Rpaso]\*[@corriente]  
 0.98 119.06 =+BUSCARV(C107,impedancia,2,1)  
 =+BUSCARV(B106,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D106\*0.68+\$M\$2  
 =+[@Rmano]\*[@corriente] =+D106\*0.68+\$N\$2  
 =+[@Rpaso]\*[@corriente]  
 0.99 117 =+BUSCARV(C108,impedancia,2,1)  
 =+BUSCARV(B107,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D107\*0.68+\$M\$2  
 =+[@Rmano]\*[@corriente] =+D107\*0.68+\$N\$2  
 =+[@Rpaso]\*[@corriente]  
 1 114.9 =+BUSCARV(C109,impedancia,2,1)  
 =+BUSCARV(B108,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D108\*0.68+\$M\$2  
 =+[@Rmano]\*[@corriente] =+D108\*0.68+\$N\$2  
 =+[@Rpaso]\*[@corriente]  
 1.1 112.8 =+BUSCARV(C110,impedancia,2,1)  
 =+BUSCARV(B109,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D109\*0.68+\$M\$2  
 =+[@Rmano]\*[@corriente] =+D109\*0.68+\$N\$2  
 =+[@Rpaso]\*[@corriente]  
 1.2 110.7 =+BUSCARV(C111,impedancia,2,1)  
 =+BUSCARV(B110,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D110\*0.68+\$M\$2  
 =+[@Rmano]\*[@corriente] =+D110\*0.68+\$N\$2  
 =+[@Rpaso]\*[@corriente]  
 1.3 108.6 =+BUSCARV(C112,impedancia,2,1)  
 =+BUSCARV(B111,corriente,\$R\$3,VERDADERO) =+D111\*0.68+\$M\$2

Continuación del apéndice 1.

```

    +=[@Rmano]*[@corriente]      +=D111*0.68+$N$2
    +=[@Rpaso]*[@corriente]
1.4  106.5 +=BUSCARV(C113,impedancia,2,1)
    +=BUSCARV(B112,corriente,$R$3,VERDADERO) +=D112*0.68+$M$2
    +=[@Rmano]*[@corriente]      +=D112*0.68+$N$2
    +=[@Rpaso]*[@corriente]
1.5  104.4 +=BUSCARV(C114,impedancia,2,1)
    +=BUSCARV(B113,corriente,$R$3,VERDADERO) +=D113*0.68+$M$2
    +=[@Rmano]*[@corriente]      +=D113*0.68+$N$2
    +=[@Rpaso]*[@corriente]
1.6  102.3 +=BUSCARV(C115,impedancia,2,1)
    +=BUSCARV(B114,corriente,$R$3,VERDADERO) +=D114*0.68+$M$2
    +=[@Rmano]*[@corriente]      +=D114*0.68+$N$2
    +=[@Rpaso]*[@corriente]
1.7  100.2 +=BUSCARV(C116,impedancia,2,1)
    +=BUSCARV(B115,corriente,$R$3,VERDADERO) +=D115*0.68+$M$2
    +=[@Rmano]*[@corriente]      +=D115*0.68+$N$2
    +=[@Rpaso]*[@corriente]
1.8  98.1000000000001 +=BUSCARV(C117,impedancia,2,1)
    +=BUSCARV(B116,corriente,$R$3,VERDADERO) +=D116*0.68+$M$2
    +=[@Rmano]*[@corriente]      +=D116*0.68+$N$2
    +=[@Rpaso]*[@corriente]
1.9  96      +=BUSCARV(C118,impedancia,2,1)
    +=BUSCARV(B117,corriente,$R$3,VERDADERO) +=D117*0.68+$M$2
    +=[@Rmano]*[@corriente]      +=D117*0.68+$N$2
    +=[@Rpaso]*[@corriente]
2    94.3333333333333 +=BUSCARV(C119,impedancia,2,1)
    +=BUSCARV(B118,corriente,$R$3,VERDADERO) +=D118*0.68+$M$2
    +=[@Rmano]*[@corriente]      +=D118*0.68+$N$2
    +=[@Rpaso]*[@corriente]
2.5  92.6666666666667 +=BUSCARV(C120,impedancia,2,1)
    +=BUSCARV(B119,corriente,$R$3,VERDADERO) +=D119*0.68+$M$2
    +=[@Rmano]*[@corriente]      +=D119*0.68+$N$2
    +=[@Rpaso]*[@corriente]
3    91      +=BUSCARV(C121,impedancia,2,1)
    +=BUSCARV(B120,corriente,$R$3,VERDADERO) +=D120*0.68+$M$2
    +=[@Rmano]*[@corriente]      +=D120*0.68+$N$2
    +=[@Rpaso]*[@corriente]
3.5  89.3333333333333 +=BUSCARV(C122,impedancia,2,1)
    +=BUSCARV(B121,corriente,$R$3,VERDADERO) +=D121*0.68+$M$2

```

Continuación del apéndice 1.

$$\begin{aligned} &=+[@Rmano]*[@corriente] && =+D121*0.68+\$N\$2 \\ &=+[@Rpaso]*[@corriente] \\ 4 & 87.66666666666666 =+BUSCARV(C123,impedancia,2,1) \\ &=+BUSCARV(B122,corriente,\$R\$3,VERDADERO) && =+D122*0.68+\$M\$2 \\ &=+[@Rmano]*[@corriente] && =+D122*0.68+\$N\$2 \\ &=+[@Rpaso]*[@corriente] \\ 4.5 & 86 =+BUSCARV(C124,impedancia,2,1) \\ &=+BUSCARV(B123,corriente,\$R\$3,VERDADERO) && =+D123*0.68+\$M\$2 \\ &=+[@Rmano]*[@corriente] && =+D123*0.68+\$N\$2 \\ &=+[@Rpaso]*[@corriente] \\ 5 & 85.9 =+BUSCARV(C125,impedancia,2,1) \\ &=+BUSCARV(B124,corriente,\$R\$3,VERDADERO) && =+D124*0.68+\$M\$2 \\ &=+[@Rmano]*[@corriente] && =+D124*0.68+\$N\$2 \\ &=+[@Rpaso]*[@corriente] \\ 5.5 & 85.8 =+BUSCARV(C126,impedancia,2,1) \\ &=+BUSCARV(B125,corriente,\$R\$3,VERDADERO) && =+D125*0.68+\$M\$2 \\ &=+[@Rmano]*[@corriente] && =+D125*0.68+\$N\$2 \\ &=+[@Rpaso]*[@corriente] \\ 6 & 85.7 =+BUSCARV(C127,impedancia,2,1) \\ &=+BUSCARV(B126,corriente,\$R\$3,VERDADERO) && =+D126*0.68+\$M\$2 \\ &=+[@Rmano]*[@corriente] && =+D126*0.68+\$N\$2 \\ &=+[@Rpaso]*[@corriente] \\ 6.5 & 85.6 =+BUSCARV(C128,impedancia,2,1) \\ &=+BUSCARV(B127,corriente,\$R\$3,VERDADERO) && =+D127*0.68+\$M\$2 \\ &=+[@Rmano]*[@corriente] && =+D127*0.68+\$N\$2 \\ &=+[@Rpaso]*[@corriente] \\ 7 & 85.5 =+BUSCARV(C129,impedancia,2,1) \\ &=+BUSCARV(B128,corriente,\$R\$3,VERDADERO) && =+D128*0.68+\$M\$2 \\ &=+[@Rmano]*[@corriente] && =+D128*0.68+\$N\$2 \\ &=+[@Rpaso]*[@corriente] \\ 7.5 & 85.4 =+BUSCARV(C130,impedancia,2,1) \\ &=+BUSCARV(B129,corriente,\$R\$3,VERDADERO) && =+D129*0.68+\$M\$2 \\ &=+[@Rmano]*[@corriente] && =+D129*0.68+\$N\$2 \\ &=+[@Rpaso]*[@corriente] \\ 8 & 85.3 =+BUSCARV(C131,impedancia,2,1) \\ &=+BUSCARV(B130,corriente,\$R\$3,VERDADERO) && =+D130*0.68+\$M\$2 \\ &=+[@Rmano]*[@corriente] && =+D130*0.68+\$N\$2 \\ &=+[@Rpaso]*[@corriente] \\ 8.5 & 85.2 =+BUSCARV(C132,impedancia,2,1) \\ &=+BUSCARV(B131,corriente,\$R\$3,VERDADERO) && =+D131*0.68+\$M\$2 \end{aligned}$$

Continuación del apéndice 1.

```

    =+[@Rmano]*[@corriente]      =+D131*0.68+$N$2
    =+[@Rpaso]*[@corriente]
9    85.1000000000001 =+BUSCARV(C133,impedancia,2,1)
    =+BUSCARV(B132,corriente,$R$3,VERDADERO) =+D132*0.68+$M$2
    =+[@Rmano]*[@corriente]      =+D132*0.68+$N$2
    =+[@Rpaso]*[@corriente]
9.5  85    =+BUSCARV(C134,impedancia,2,1)
    =+BUSCARV(B133,corriente,$R$3,VERDADERO) =+D133*0.68+$M$2
    =+[@Rmano]*[@corriente]      =+D133*0.68+$N$2
    =+[@Rpaso]*[@corriente]
    mano paso
resistencia sin cuerpo =+E3+D2 =+F3+D2 1
Resistencia todo =+M2+M8 =+N2+M8curva=+Q2+1
    tiempo =+Tensiones!G11
    Impedancia lb =+BUSCARV(P6,corriente,R3,VERDADERO) mA
    =+BUSCARV(P6,voltaje,3,VERDADERO)*0.68
Columna1  c1  c2  c3
Voltaje  Impedancia 0 =+Q13*1 =+R13*1 =+S13*1
0  3250 0.05 0.465 0.9 1.52
25 =M13-+($B$6-$B$11)/5 0.06 0.4604 0.87 1.47
=+L14+5 =M14-+($B$6-$B$11)/5 0.07 0.4558 0.84 1.42
=+L15+5 =M15-+($B$6-$B$11)/5 0.08 0.4512 0.81 1.37
=+L16+5 =M16-+($B$6-$B$11)/5 0.09 0.4466 0.78 1.32
=+L17+5 2500 0.1 0.442 0.75 1.27
=+L18+5 =M18-+($B$11-$B$16)/5 0.11 0.4362 0.735 1.237
=+L19+5 =M19-+($B$11-$B$16)/5 0.12 0.4304 0.72 1.204
=+L20+5 =M20-+($B$11-$B$16)/5 0.13 0.4246 0.705 1.171
=+L21+5 =M21-+($B$11-$B$16)/5 0.14 0.4188 0.69 1.138
=+L22+5 2000 0.15 0.413 0.675 1.105
=+L23+5 =M23-+($B$16-$B$21)/5 0.16 0.4072 0.66 1.072
=+L24+5 =M24-+($B$16-$B$21)/5 0.17 0.4014 0.645 1.039
=+L25+5 =M25-+($B$16-$B$21)/5 0.18 0.3956 0.63 1.006
=+L26+5 =M26-+($B$16-$B$21)/5 0.19 0.3898 0.615
    0.973000000000001
=+L27+5 1725 0.2 0.384 0.6 0.94
=+L28+5 =M28-+($B$21-$B$26)/5 0.21 0.3744733333333333
    0.586666666666667 0.923
=+L29+5 =M29-+($B$21-$B$26)/5 0.22 0.364946666666667
    0.573333333333333 0.906
=+L30+5 =M30-+($B$21-$B$26)/5 0.23 0.35542 0.56 0.889

```

Continuación del apéndice 1.

=+L31+5	=M31-+(\$B\$21-\$B\$26)/5	0.24	0.3458933333333333		
	0.546666666666667	0.872			
=+L32+5	1550	0.25	0.336366666666667	0.5333333333333333	
	0.855				
=+L33+5	=M33-+(\$B\$26-\$B\$31)/5	0.26	0.32684	0.52	0.838
=+L34+5	=M34-+(\$B\$26-\$B\$31)/5	0.27	0.3173133333333333		
	0.506666666666667	0.821			
=+L35+5	=M35-+(\$B\$26-\$B\$31)/5	0.28	0.307786666666667		
	0.4933333333333334	0.804			
=+L36+5	=M36-+(\$B\$26-\$B\$31)/5	0.29	0.29826	0.48	0.787
=+L37+5	1400	0.3	0.2887333333333333	0.466666666666667	
	0.77				
=+L38+5	=M38-+(\$B\$31-\$B\$36)/5	0.31	0.2792066666666666		
	0.4533333333333334	0.753			
=+L39+5	=M39-+(\$B\$31-\$B\$36)/5	0.32	0.26968	0.44	0.736
=+L40+5	=M40-+(\$B\$31-\$B\$36)/5	0.33	0.2601533333333333		
	0.4266666666666667	0.719			
=+L41+5	=M41-+(\$B\$31-\$B\$36)/5	0.34	0.2506266666666666		
	0.4133333333333334	0.702			
=+L42+5	1325	0.35	0.2411	0.4	0.685
=+L43+5	=M43-+(\$B\$36-\$B\$41)/5	0.36	0.2315733333333333		
	0.3866666666666667	0.668			
=+L44+5	=M44-+(\$B\$36-\$B\$41)/5	0.37	0.2220466666666666		
	0.3733333333333334	0.651			
=+L45+5	=M45-+(\$B\$36-\$B\$41)/5	0.38	0.21252	0.36	0.634
=+L46+5	=M46-+(\$B\$36-\$B\$41)/5	0.39	0.2029933333333333		
	0.3466666666666667	0.617			
=+L47+5	1275	0.4	0.1934666666666667	0.3333333333333334	
	0.6				
=+L48+5	=M48-+(\$B\$41-\$B\$46)/5	0.41	0.18394		
	0.3200000000000001	0.583			
=+L49+5	=M49-+(\$B\$41-\$B\$46)/5	0.42	0.1744133333333333		
	0.3066666666666667	0.566			
=+L50+5	=M50-+(\$B\$41-\$B\$46)/5	0.43	0.1648866666666667		
	0.2933333333333334	0.549			
=+L51+5	=M51-+(\$B\$41-\$B\$46)/5	0.44	0.15536		
	0.2800000000000001	0.532			
=+L52+5	1225	0.45	0.1458333333333333	0.2666666666666667	
	0.515				
=+L53+5	=M53-+(\$B\$46-\$B\$53)/7	0.46	0.1363066666666667		
	0.2533333333333334	0.498			

Continuación del apéndice 1.

==+L54+25	=M54-+(\$B\$46-\$B\$53)/7	0.47	0.12678		
	0.240000000000001	0.481			
==+L55+25	=M55-+(\$B\$46-\$B\$53)/7	0.48	0.117253333333333		
	0.226666666666667	0.464			
==+L56+25	=M56-+(\$B\$46-\$B\$53)/7	0.49	0.107726666666667		
	0.213333333333334	0.447			
==+L57+25	=M57-+(\$B\$46-\$B\$53)/7	0.5	0.0982	0.2	0.43
==+L58+25	=M58-+(\$B\$46-\$B\$53)/7	0.51	0.09658	0.1955	0.4216
==+L59+25	950	0.52	0.09496	0.191	0.4132
==+L60+25	=M60-+(\$B\$53-\$B\$57)/4	0.53	0.09334	0.1865	0.4048
==+L61+25	=M61-+(\$B\$53-\$B\$57)/4	0.54	0.09172	0.182	0.3964
==+L62+25	=M62-+(\$B\$53-\$B\$57)/4	0.55	0.0901	0.1775	0.388
==+L63+25	850	0.56	0.08848	0.173	0.3796
==+L64+25	=M64-+(\$B\$57-\$B\$65)/8	0.57	0.08686	0.1685	0.3712
==+L65+25	=M65-+(\$B\$57-\$B\$65)/8	0.58	0.08524	0.164	0.3628
==+L66+25	=M66-+(\$B\$57-\$B\$65)/8	0.59	0.08362	0.1595	0.3544
==+L67+25	=M67-+(\$B\$57-\$B\$65)/8	0.6	0.082	0.155	0.346
==+L68+25	=M68-+(\$B\$57-\$B\$65)/8	0.61	0.0809	0.15199	0.3376
==+L69+25	=M69-+(\$B\$57-\$B\$65)/8	0.62	0.0798	0.14898	0.3292
==+L70+25	=M70-+(\$B\$57-\$B\$65)/8	0.63	0.0787	0.14597	0.3208
==+L71+25	775	0.64	0.0776	0.14296	0.3124
==+L72+25	==+M72	0.65	0.0765	0.13995	0.304
==+L73+100	==+M73	0.66	0.0754	0.13694	0.2956
==+L74+100	==+M74	0.67	0.0743	0.13393	0.2872
==+L75+100	775	0.68	0.0732	0.13092	0.2788
0.69	0.0721	0.12791	0.2704		
0.7	0.071	0.1249	0.262		
0.71	0.0701	0.1228	0.255		
0.72	0.0692	0.1207	0.248		
0.73	0.0683	0.1186	0.241		
0.74	0.0674	0.1165	0.234		
0.75	0.0665	0.1144	0.227		
0.76	0.0656	0.1123	0.22		
0.77	0.0647	0.1102	0.213		
0.78	0.0638	0.1081	0.206		
0.79	0.0629	0.106	0.199		
0.8	0.062	0.1039	0.192		
0.81	0.0613	0.10231	0.1891		
0.82	0.0606	0.10072	0.1862		
0.83	0.0599	0.09913	0.1833		
0.84	0.0592	0.09754	0.1804		

Continuación del apéndice 1.

0.85	0.0585	0.09595	0.1775	
0.86	0.0578	0.09436	0.1746	
0.87	0.0571	0.09277	0.1717	
0.88	0.0564	0.09118	0.1688	
0.89	0.0557	0.08958999999999999		0.1659
0.9	0.055	0.088	0.163	
0.91	0.05454	0.0872	0.1602	
0.92	0.05408	0.0864	0.1574	
0.93	0.05362	0.0856	0.1546	
0.94	0.05316	0.0848	0.1518	
0.95	0.0527	0.084	0.149	
0.96	0.05224	0.0832	0.1462	
0.97	0.05178	0.0824	0.1434	
0.98	0.05132	0.0816	0.1406	
0.99	0.05086	0.0808	0.1378	
1	0.0504	0.08	0.135	
1.1	0.04946	0.078	0.1305	
1.2	0.04852	0.076	0.126	
1.3	0.04758	0.074	0.1215	
1.4	0.04664	0.072	0.117	
1.5	0.0457	0.07	0.1125	
1.6	0.04476	0.068	0.108	
1.7	0.04382	0.066	0.1035	
1.8	0.04288	0.064	0.099	
1.9	0.04194	0.062	0.0945	
2	0.041	0.06	0.09	
2.5	0.04066666666666667		0.0585	0.0895
3	0.04033333333333333		0.057	0.089
3.5	0.04	0.0555	0.0885	
4	0.03966666666666667		0.054	0.088
4.5	0.03933333333333333		0.0525	0.0875
5	0.039	0.051	0.087	
5.5	0.039	0.0509	0.0869	
6	0.039	0.0508	0.0868	
6.5	0.039	0.0507	0.0867	
7	0.039	0.0506	0.0866	
7.5	0.039	0.0505	0.0865	
8	0.039	0.0504	0.0864	
8.5	0.039	0.0503	0.0863	
9	0.039	0.0502	0.0862	
9.5	0.039	0.0501	0.0861	

Continuación del apéndice 1.

10 0.039 0.05 0.086  
 =+Tensiones!#jREF! =+Tensiones!F17 =+Tensiones!G17  
 =+Tensiones!H17  
 =+Tensiones!#jREF! =+Tensiones!F18 =+Tensiones!G18  
 =+Tensiones!H18  
 =+Tensiones!#jREF! =+Tensiones!F19 =+Tensiones!G19  
 =+Tensiones!H19  
 =+Tensiones!#jREF! =+Tensiones!F20 =+Tensiones!G20  
 =+Tensiones!H20  
 =+Tensiones!#jREF! =+Tensiones!F21 =+Tensiones!G21  
 =+Tensiones!H21  
 =+Tensiones!#jREF! =+Tensiones!F22 =+Tensiones!G22  
 =+Tensiones!H22  
 =+Tensiones!#jREF! =+Tensiones!F23 =+Tensiones!G23  
 =+Tensiones!H23  
 =+Tensiones!#jREF! =+Tensiones!F24 =+Tensiones!G24  
 =+Tensiones!H24  
 =+Tensiones!#jREF! =+Tensiones!F25 =+Tensiones!G25  
 =+Tensiones!H25  
 =+Tensiones!#jREF! =+Tensiones!F26 =+Tensiones!G26  
 =+Tensiones!H26  
 =+Tensiones!#jREF! =+Tensiones!F27 =+Tensiones!G27  
 =+Tensiones!H27  
 =+Tensiones!#jREF! =+Tensiones!F28 =+Tensiones!G28  
 =+Tensiones!H28  
 =(E18\*E19\*E20\*E21)/(E22+(96\*(1.55+1.22\*(I27/RAIZ(C1^2+C2^2))))))  
 =+Tensiones!#jREF! =+Tensiones!F29 =+Tensiones!G29  
 =+Tensiones!H29  
 =(F18\*F19\*F20\*F21)/(F22+(96\*(1.55+1.22\*(I27/RAIZ(C1^2+C2^2))))))  
 =+Tensiones!#jREF! =+Tensiones!F30 =+Tensiones!G30  
 =+Tensiones!H30  
 =+Tensiones!#jREF! =+Tensiones!F31 =+Tensiones!G31  
 =+Tensiones!H31

Tensión de Toque  $E_m$  V  $E_m$   
 =E18\*E19\*E20\*E21/(E22+I25\*I27\*(1.55+1.22\*I27/RAIZ(Tensiones!G17^2  
 +Tensiones!G18^2)))  
 Resistividad del Suelo r W.m b =+SPT!D22 400  
 Factor de Espaciamiento Para Tensión de Toque Km- km =E25  
 0.746

Continuación del apéndice 1.

Factor Correctivo por Geometría de la Malla Ki - ki =E34  
 2.343

Máxima Corriente de la Malla IG A IG =+SPT!D46\*1000 1472

Longitud Total del Conductor de la Malla Lc m L =+C13  
 1790

Factor de Espaciamiento Para Tensión de Toque

Factor de Espaciamiento Para Tensión de Toque Km- km  
 $=1/(2*3.1416)*(LN(E26^2/(16*E27*E29)+(E26+2*E27)^2/(8*E26*E29)-E27/(4*E29))+E30/E31*LN(8/(3.1416*(2*E28-1))))$

Número de Jabalinas nR - =+C10

Espacio Entre Conductores Paralelos Dm D =+Tensiones!G20

Profundidad de la Malla h m h =+Tensiones!G21

Longitud de las Jabalinas Lr m =+C11

Nº Efectivo de Conductores Paralelos de la Cuadrícula n - n  
 $=SI(C1=C2,2*C14/(2*C1+2*C2),C13/(RAIZ(2*C1+2*C2)*C3^0.25))$

Diámetro del Conductor de la Malla d m d  
 $=+SI(+Conductor!D24/1000<0.00679,0.00679,+Conductor!D24/1000)$   
 $=+xConductor!N20 =+F29*2$

Factor Correctivo del Efecto de las Jabalinas Kii - kii  
 =10.00679489788723037

Factor Correctivo por Profundidad de los Conductores Kh - kh  
 $=RAIZ(1+E27)$

Factor Correctivo por Geometría de la Malla

Factor Correctivo por Geometría de la Malla Ki - ki  
 $=0.644+0.148*E28$

Calculo de Tensión de Paso

Tensión de Paso Es V Es  
 $=E38*E39*E40*E41/(0.75*C13+0.85*C12)$

Resistividad del Suelo r W.m b =E18

Factor de Espaciamiento Para Tensión de Paso Ks - ks =E45

Factor Correctivo por Geometría de la Malla Ki - ki =E34

Máxima Corriente de la Malla IG A IG =E21

Longitud Total del Conductor de la Malla Ls m L  
 $=0.75*E22+0.85*I25*I27$

Factor de Espaciamiento Para Tensión de Paso

Fuente: elaboración propia.

