



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

ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN GUATEMALA ESTE

Miguel Angel Ajín Monroy

Asesorado por el Ing. José Guillermo Bedoya Barrios

Guatemala, octubre de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA
SUBESTACIÓN GUATEMALA ESTE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

MIGUEL ANGEL AJÍN MONROY

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ GUILLERMO BEDOYA BARRIOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
EXAMINADOR	Ing. Armando Gálvez Castillo
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:

ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN GUATEMALA ESTE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha noviembre de 2009.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Miguel Angel Ajín Monroy', with a large circular flourish at the end.

Miguel Angel Ajín Monroy

Guatemala, 13 de Septiembre de 2,011

Ingeniero
Jorge Luis Pérez Rivera
Coordinador del Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
USAC

Estimado Ingeniero Pérez:

Por medio de la presente, me permito presentar el trabajo de graduación titulado: **ÁNÁLISIS DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN GUATEMALA ESTE**, tema propuesto al estudiante de la carrera de Ingeniería Eléctrica, Miguel Angel Ajín Monroy.

Trabajo de graduación en la cual el estudiante y mi persona nos hacemos responsables de las conclusiones y recomendaciones que en él se presentan.

Sin otro particular aprovecho para saludarle.

Atentamente,


Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
Asesor

ING. ELECTRICISTA
JOSE GUILLERMO BEDOYA BARRIOS
COLEGIADO No. 4846



Ref. EIME 17. 2012
Guatemala, 13 de MARZO 2012.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA
SUBESTACIÓN GUATEMALA ESTE,** del estudiante Miguel
Angel Ajín Monroy, que cumple con los requisitos establecidos para
tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
Coordinador de Potencia

JLPR/sro





FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 19. 2012.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación de la estudiante; Miguel Angel Ajín Monroy titulado: ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN GUATEMALA ESTE, procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Fuente Romero

GUATEMALA, 19 DE ABRIL 2012.





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: **ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN GUATEMALA ESTE**, presentado por el estudiante universitario **Miguel Angel Ajín Monroy**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, octubre de 2012

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme la vida, el entendimiento y gozar de su infinita gracia.
Guatemala	Por ser el país que me vio nacer.
Mis padres	Bernardino Ajín y Juana Monroy, pilar fundamental en mi diario vivir.
Mis hermanos	María del Carmen, Julia, Francisca, María del Rosario, Doroteo, Pantaleón, Juan y Alberto.
Mis sobrinos	Juana Magaly, Ana Isabel, Luis y Oswaldo.
Las familias	Chay Monroy y Ajín Noj. Por estar en sus oraciones.
Mis catedráticos	Por compartir su experiencia y enseñanza.
Mis amigos	Por compartir su entusiasmo y aprecio.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por haberme dado la oportunidad de formarme como profesional.
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica	Por ser parte importante en mi aprendizaje.
Guatemala Este	Subestación eléctrica que me abrió sus puertas y al personal operativo de la misma.
Mi asesor	Ing. Guillermo Bedoya Barrios. Por su apoyo en el desarrollo del tema.
Rodolfo Chay Gómez	Por ser una importante influencia en mi carrera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO.....	XIII
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. CONCEPTOS AFINES A SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.....	1
1.1. Sistemas de tierra.....	1
1.1.1. Tierra física	1
1.1.2. Tierra para protección contra rayos.....	2
1.1.3. Tierra para protección del equipo.....	2
1.1.4. Tierra aislada	3
1.1.5. Tierra de referencia cero	3
1.2. Conexión efectiva a tierra	4
1.2.1. Electrodo de tierra.....	5
1.2.2. Funciones del electrodo de tierra	6
1.2.3. Varilla de tierra.....	6
1.2.4. Tipos de electrodos.....	7
1.2.4.1. Electrodo Copperweld.....	7
1.2.4.2. Electrodo Chem-Rod.....	8
1.2.4.3. Electrodo rehilete	9
1.2.5. Unión de los electrodos de tierra.....	11
1.2.5.1. Tubería metálica como electrodo	12

1.2.5.2.	Estructura metálica como electrodo de tierra	13
1.2.5.3.	Electrodo incrustado en concreto	13
1.2.6.	El electrodo incrustado de forma vertical	15
1.2.7.	El conductor como parte del sistema de puesta a tierra	16
1.2.7.1.	Resistencia del conductor.....	19
1.2.7.2.	Densidad de electrones libres en un conductor.....	20
1.3.	Ecuaciones para el cálculo de la sección transversal del conductor para una malla de tierra	22
1.4.	Conexiones	23
1.4.1.	Conexiones mecánicas.....	24
1.4.2.	Conexión exotérmica.....	25
1.4.2.1.	Equipo de soldadura exotérmica	27
1.4.2.2.	El proceso de soldadura exotérmica... ..	28
2.	LA INFLUENCIA DE LA ELECTRICIDAD EN EL CUERPO HUMANO ..	31
2.1.	La electropatología.....	31
2.2.	Los efectos de la corriente eléctrica en el ser humano	32
2.3.	Factores que inciden en la gravedad de una descarga eléctrica.....	33
2.3.1.	Intensidad de la corriente	33
2.3.2.	Resistencia eléctrica del cuerpo humano	35
2.3.3.	La duración del contacto.....	35
2.3.4.	La trayectoria de la corriente	36
2.4.	Umbrales que soporta el cuerpo humano.....	36
2.4.1.	Tensiones de seguridad	37
2.4.1.1.	Tensión de contacto	38

	2.4.1.2.	Tensión de malla.....	39
	2.4.1.3.	Tensión de paso	44
	2.4.1.4.	Tensión transferida	45
2.5.		Protección contra descargas electroatmosféricas	46
	2.5.1.	Polarización de la nube y la tierra	48
	2.5.1.1.	Proceso de formación del rayo.....	49
2.6.		Sistema de protección contra descargas electroatmosféricas.....	50
	2.6.1.	Protección contra descargas por hilo de guarda	51
	2.6.1.1.	El efecto de los hilos de guarda al sistema	52
	2.6.1.2.	Método electrogeométrico.....	54
2.7.		Electricidad estática.....	56
	2.7.1.	Accidentes ocasionados por la electricidad estática	57
3.		FUNDAMENTOS DE GEOLOGÍA Y LA COMPOSICIÓN DEL SUELO ..	61
	3.1.	Geología básica.....	61
	3.1.1.	La corteza terrestre y su composición.....	61
	3.1.1.1.	Las rocas y su proceso natural de transformación	62
	3.1.2.	Las rocas y su resistividad	63
	3.1.3.	La grava como capa superficial.....	64
3.2.		Propiedades del suelo y su influencia en la puesta a tierra.....	66
	3.2.1.	Conducción de cargas eléctricas hacia el suelo	68
3.3.		La resistividad eléctrica	69
	3.3.1.	Teoría elemental del electrodo vertical.....	71
	3.3.2.	Ecuaciones para estimar la resistencia de una malla de tierra	76

3.4.	La corrosión	81
3.4.1.	Tipos de corrosión	82
3.4.2.	El proceso de corrosión en los metales	83
3.5.	El suelo como agente corrosivo	84
3.5.1.	Evaluación de la agresividad de los suelos	85
4.	MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD Y LA RESISTENCIA	87
4.1.	Factores a considerar al realizar mediciones del suelo	87
4.1.1.	Instrumento de medición	87
4.2.	Medición de la resistividad del suelo	89
4.2.1.	Métodos de medición de resistividad	89
4.2.1.1.	Método de Wenner o de los cuatro puntos	90
4.2.1.2.	Método de Schlumberger–Palmer	93
4.2.1.3.	Procedimiento de medición en campo	95
4.3.	Medición de la resistividad en las cercanías de la subestación Guatemala Este, como elemento de comparación	96
4.4.	La resistencia de la torre de una línea de transmisión	99
4.5.	Métodos de medición de la resistencia para la malla de tierra	101
4.5.1.	Método de la caída de potencial	102
4.5.2.	Método de la pendiente	103
4.5.3.	Método de la intersección de curvas	104
4.6.	Nociones de corriente de cortocircuito	106
4.6.1.	Fuentes generadoras de corrientes de cortocircuito	107

4.6.2.	El transformador como limitador de la corriente de cortocircuito.....	110
4.6.3.	La relación x/R	110
4.6.4.	Factor de decremento	112
4.6.5.	Fundamentos de corriente de cortocircuito para el diseño de una puesta a tierra	112
4.7.	Cálculo de la elevación del potencial a tierra, EPT	113
5.	LA SUBESTACIÓN GUATEMALA ESTE	115
5.1.	La función de una subestación eléctrica	115
5.1.1.	Configuración en doble juego de barras.....	115
5.2.	La subestación eléctrica Guatemala Este	116
5.2.1.	Diagrama unifilar de la subestación Guatemala Este	118
5.2.2.	Dimensiones de la subestación Guatemala Este .	120
5.2.3.	Condiciones climatológicas para el diseño.....	121
5.2.4.	El sistema de puesta a tierra actual	122
5.2.5.	Disposición física de la malla de tierra para el diseño	122
5.3.	Aspectos importantes para el diseño de una puesta a tierra	123
5.3.1.	Cálculo de la puesta a tierra de la subestación Guatemala Este	124
6.	MANTENIMIENTO Y MEJORAMIENTO	139
6.1.	Mantenimiento y mejoramiento de puestas a tierra.....	139
6.2.	Técnicas de mejoramiento de puesta a tierra en torres de líneas de transmisión.....	139
6.2.1.	Instalación de contrapesos	140

6.2.2.	Instalación de anillos alrededor de las torres	141
6.2.3.	Utilización de concretos conductivos	141
6.2.4.	Introducción de electrodos al concreto	142
6.2.5.	Utilización de electrodos químicos.....	142
6.2.6.	Realización de rellenos.....	142
6.3.	Características de un suelo artificial	143
6.3.1.	El intensificador Favigel.....	144
6.3.2.	El intensificador GAP	144
6.3.3.	El intensificador Thor-Gel	145
6.4.	Plan de mantenimiento en sistemas de puesta a tierra	145
6.4.1.	Aplicaciones particulares para el mantenimiento ..	147
6.4.1.1.	Puesta a tierra temporal	147
6.4.1.2.	Puesta a tierra permanente	149
6.5.	Procedimiento general del proceso de soldadura exotérmica	149
CONCLUSIONES		153
RECOMENDACIONES		155
BIBLIOGRAFÍA		157
APÉNDICES		161
ANEXOS		167

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Sistema de puesta a tierra interconectada	4
2.	Varilla de cobre con aleación de acero.....	8
3.	Electrodo Chem-Rod.....	10
4.	Electrodo rehilete	11
5.	Esquema de la unión de los posibles electrodos de tierra	14
6.	Resistividad de un suelo arcilloso en función de la humedad	15
7.	Representación del diámetro de un conductor en kcmils.....	20
8.	Electrones libres en un conductor de cobre.....	21
9.	Conexiones mecánicas para unión de cables	24
10.	Conexión de un cable de tierra a una estructura	25
11.	Molde de grafito para la fusión del polvo aluminotérmico	26
12.	Cargas o cartuchos de polvo metálico de aluminio.....	27
13.	Equipo necesario para una soldadura exotérmica.....	29
14.	Soldadura exotérmica de una red de tierra.....	30
15.	El factor C_s , como una función del factor de reflexión K	42
16.	Tensión de malla.....	43
17.	Tensión de un paso.....	45
18.	Tensión de transferencia.....	46
19.	Polarización de la nube	48
20.	Orografía.....	49
21.	Proceso de formación del rayo.....	51
22.	Zona protegida con hilos de guarda	55

23.	Hilo de guarda en la cima de las torres, lado de 69 kV	55
24.	Generación de cargas electrostáticas	59
25.	Composición química de la corteza terrestre	62
26.	Representación de las distintas capas de un suelo	64
27.	Grava en la subestación Guatemala Este, lado de 230 kV	65
28.	Electrodos semiesféricos en un suelo homogéneo (ideal), utilizado como conductor	69
29.	Ilustración de la resistividad del terreno	70
30.	Análisis de un electrodo vertical como una carga lineal	72
31.	Coeficiente k1 de la fórmula de Schwarz	79
32.	Coeficiente k2 de la fórmula de Schwarz	80
33.	Proceso electroquímico que se da para formar la herrumbre.....	84
34.	Telurómetro marca AEMC, modelo 4610.....	88
35.	Medición por el método de Wenner	92
36.	Medición por el método de Schlumberger-Palmer	94
37.	Una sección del terreno con trazo diagonal	95
38.	Gráfica de la resistividad en la subestación Guatemala Este.....	98
39.	Gráfica de la tendencia, resistividad vs la profundidad	99
40.	Conexión en cada pata y panorámica total de la torre	100
41.	Representación del método de la curva de caída de potencial	103
42.	Representación del método de la pendiente	105
43.	Gráfica de intersección de curvas.....	106
44.	Corriente de cortocircuito.....	108
45.	Corriente asimétrica de cortocircuito.....	111
46.	Oficina de monitoreo de la subestación Guatemala Este.....	117
47.	Transformadores de potencia, subestación Guatemala Este.....	119
48.	Diagrama unifilar de la subestación Guatemala Este.....	120
49.	Vista en planta de la subestación Guatemala Este	121
50.	Muestra de la temperatura máxima ambiente	128

51.	Área en la base de una torre de 230 kV	130
52.	Distribución de la corriente de falla del sistema de puesta a tierra para la subestación Guatemala Este.....	132
53.	Dimensiones de la cuadrícula de la malla de tierra	135
54.	Representación de la malla de tierra	136
55.	Contrapesos en una estructura de línea de transmisión.....	141
56.	Puesta a tierra temporal	148
57.	El proceso de soldadura exotérmica	151

TABLAS

I.	Selección del calibre del conductor	17
II.	Efectos fisiológicos directos de la electricidad.....	34
III.	Peligrosidad de la corriente según el tiempo de contacto.....	36
IV.	Parámetros del rayo.....	47
V.	Sistema integral de protección contra rayos.....	53
VI.	Características mecánicas y eléctricas del cable de guarda.....	54
VII.	Grado de agresividad del suelo por bacterias sulfato reductoras	85
VIII.	Determinación de la agresividad de los suelos.....	86
IX.	Lecturas en cercanías de la subestación Guatemala Este	97
X.	Medición del terreno a diferentes profundidades	98
XI.	Valores de resistencias en torres de transmisión	102
XII.	Valores típicos de factores de decremento.....	113
XIII.	Corriente de cortocircuito, subestación Guatemala Este	114
XIV.	Valores a considerar en el diseño	125
XV.	Constante del cobre comercial	127
XVI.	Comparación de voltajes permisibles o tolerables.....	135
XVII.	Análisis para la malla en la sala de control.....	137
XVIII.	Plan de mantenimiento de un sistema de puesta a tierra	147

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
η	Cantidad de electrones
cm	Centímetro
α	Coefficiente térmico
π	Constante (Pi)
C	Columbio
J	Densidad de corriente
E	Diferencia de potencial
$d\lambda$	Diferencial de distancia
λ	Distancia
F	Faradio
\emptyset	Fase
φ	Flujo eléctrico
$^{\circ}\text{C}$	Grado centígrado
$^{\circ}\text{K}$	Grado kelvin
H	Henrio
Hz	Hertzio
Z	Impedancia
I	Intensidad de corriente
J	<i>Joule</i>
k	Kilo
m	Metro
μ	Micro

mm	Milímetro
Ω	Ohm
%	Por ciento
<i>R</i>	Resistencia eléctrica
ρ	Resistividad eléctrica
S	Siemens
<i>t_c</i>	Tiempo crítico
V	Voltio
W	Vatio

GLOSARIO

Alta tensión	Nivel de tensión superior a sesenta mil (60 000) voltios.
ANSI	Instituto Nacional de Estándares Americanos.
ASTM	Estándares Americanos de Modelos y Pruebas.
Atenuación	Es la pérdida de la potencia de una señal. La atenuación se incrementa con la frecuencia, la temperatura y el tiempo.
Aterrizamiento	Conector a tierra de sistemas, circuitos o aparatos con el propósito de establecer un circuito de retorno por el suelo y para mantener su potencial al potencial del suelo.
AWG	Estándar Americano de Cables y Alambres.
Baja tensión	Nivel de tensión igual o inferior a mil (1,000) voltios.
Capas concéntricas	Capas que parten o inician del mismo centro.

CFE	La Comisión Federal de Electricidad es una empresa paraestatal, encargada de controlar, generar, transmitir y comercializar energía eléctrica en todo el territorio de México.
Conector	Dispositivo que une dos o más conductores con el objeto de suministrar una trayectoria eléctrica continua.
Conexión equipotencial	Conexión eléctrica entre dos o más puntos, de tal forma, que ante el paso de una corriente quedan esencialmente al mismo potencial.
Corriente a tierra	Corriente que fluye hacia o fuera de la tierra o sus equivalentes que sirven como tierra.
Corrientes espurias	También llamadas parásitas y se pueden presentar por diversas causas por ejemplo en transformadores desbalanceados, cercas eléctricas, cables rotos, aislamiento inadecuado, etc.
Electrodo artificial	Cuerpo metálico de fabricación especial que puede contener componentes químicos.
Electrólisis	Proceso de descomposición en disolución a través de la corriente eléctrica.

Factor K	Relación entre las pérdidas de un transformador debidas a una corriente no sinusoidal y las pérdidas debidas a una corriente sinusoidal de la misma magnitud.
Homogéneo	El término se utiliza para caracterizar la misma naturaleza geológica y geofísica en el volumen de tierra ilimitado por todos lados.
INSIVUMEH	Instituto de Sismología Vulcanología Metrología e Hidrología.
LAPEM	Laboratorio de Pruebas de Equipos y Materiales.
Límite líquido	Es el contenido de agua tal, que para un material dado, fija la división entre el estado casi líquido plástico de un suelo.
Límite plástico	El límite plástico de un suelo es el menor contenido de humedad, determinado de acuerdo con el método bajo el cual el suelo permanece plástico.
Media tensión	Nivel de tensión superior a mil (1,000) voltios, y menor o igual a sesenta mil (60 000) voltios.
CEN	Código que establece las reglas de observancia mínima para la instalación segura de conductores y equipos (Código Eléctrico Nacional).

Nivel isoceráunico	Se le llama al grado de actividad de las tormentas eléctricas en una región geográfica determinada.
Pararrayos	Dispositivo protector diseñado principalmente para la conexión entre un conductor de una red eléctrica y tierra, a fin de limitar la magnitud de las sobretensiones transitorias en el equipo.
Pátina	Capa de carbonato que cubre al cobre en forma de sustancia verde y la aísla de las condiciones ambientales.
pH	Es una escala numérica que mide el grado de acidez o alcalinidad de una sustancia. Esta escala se mueve entre 0 y 14. El agua tiene un pH de 7, por lo que se dice que es neutra. Suelo ácido, tiene un pH menor de 7, suelo neutro, tiene un pH igual a 7, suelo alcalino, pH mayor de 7.
Potencial redox	Es el potencial de reducción y es como se le conoce a una celda galvánica que produce por la reacción de una celda que no está en equilibrio. Cuando una batería (que es una celda galvánica) se agota, los productos químicos del interior han llegado al equilibrio, y desde ese momento la batería no almacena carga.

Punto neutro	Nodo o punto común de un sistema trifásico o el punto medio para un sistema monofásico. Puede o no estar conectado a tierra.
PVC	Policloruro de vinilo. Es un polímero por adición y además una resina que resulta de la polimerización del cloruro de vinilo o cloroetano. Tiene una muy buena resistencia eléctrica y a la llama.
Rayo	Es un fenómeno físico que caracteriza por una transferencia de carga eléctrica de una nube hacia la tierra, de la tierra hacia la nube, entre dos nubes, en el interior de una nube o de la nube hacia la ionosfera.

RESUMEN

Un sistema de puesta a tierra puede constar de un único electrodo y del conductor que los une o de un sistema complejo, tanto en su diseño como en la construcción de los enlaces entre electrodos y conductores enterrados horizontalmente.

Existen diversas configuraciones de estos sistemas, tales como: tierra física (el más elemental), tierra aislada (usado principalmente en plantas telefónicas), tierra para protección contra rayos (muy común en torres de alta tensión y de telefonía celular).

En los sistemas monofásicos o trifásicos de baja tensión su instalación es simple y de poco mantenimiento, sin embargo en alta tensión la necesidad se vuelve fundamental, esto por ser el medio donde se drenarán las corrientes elevadas no deseadas hacia el suelo, como una forma de dispersar el peligro.

Su función primordial es la protección del personal antes que el equipo instalado. Para lograr que un sistema sea adecuado se debe realizar mediciones de resistividad, como un análisis de la calidad de las partículas conductoras contenidas en el suelo.

La subestación Guatemala Este es una parte del sistema nacional interconectado, la cual, como en toda instalación industrial, su puesta a tierra es fundamental; por lo tanto su diseño se establece con los estándares internacionales actuales.

El cuerpo humano al entrar en contacto con la electricidad, y dependiendo del tiempo que se mantenga el contacto, circulará por él una corriente de electrones, los cuales pueden dejar desde un mero susto hasta daños permanentes en la persona, por lo que un diseño adecuado de puesta a tierra es de lo que se ocupa el siguiente material.

El procedimiento de cálculo describe el voltaje de contacto y de paso permisibles o voltajes máximos que un cuerpo humano puede soportar, de tal manera que no sean sobrepasados.

Debe tomarse en cuenta que si existiesen diversos sistemas de puestas a tierra en una misma instalación, estos se deben interconectar para formar un solo sistema, siempre que los niveles de voltaje sean del mismo valor o la resistencia de la puesta a tierra sea menor o igual a un Ohm.

OBJETIVOS

General

Realizar un análisis para proporcionar consideraciones, y lineamientos básicos del diseño de un sistema de puesta a tierra para una subestación eléctrica, teniendo como base la subestación Guatemala Este y la distribución de su equipo de alta tensión.

Específicos

1. Evaluar técnicamente la subestación Guatemala Este, en lo referente a su sistema de puesta a tierra para presentar el diseño de una instalación real y actual.
2. Realizar el diseño de la instalación del sistema de puesta a tierra de la subestación Guatemala Este, utilizando el método de una o dos capas de suelo, y presentar de forma sistemática el cálculo del diseño teórico nuevo.
3. Presentar alternativas para reducir la resistencia de una puesta a tierra y aumentar la conductividad del suelo, en una instalación de alta energía construida, para devolver la seguridad al personal y mejorar el desempeño de la instalación.

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de graduación se realiza un análisis en el que se muestra de forma sistemática el procedimiento sobre cómo calcular un sistema de puesta a tierra por el método de una capa de suelo, que es utilizado cuando la resistividad de la capa del suelo es homogénea.

Determinando de esta manera la forma en que puede ser construida la malla de puesta a tierra de una subestación eléctrica convencional, y con énfasis en el terreno de la subestación Guatemala Este.

El procedimiento de cálculo describe el voltaje de contacto, y el voltaje de paso permisible que un cuerpo humano puede soportar, de tal manera que no sean sobrepasados. Un diseño seguro debe principalmente velar por la seguridad del personal de una instalación eléctrica.

Cuando el sistema de puesta a tierra se encuentra en funcionamiento o con años de haberse construido, su valor de resistencia puede variar, por lo que a continuación se describen las diversas formas de cómo mejorar el sistema instalado.

La temática en cuestión será tratada de la siguiente manera: en el capítulo uno se presentan conceptos generales referentes a la puesta a tierra. En el capítulo dos se describen las consecuencias que podrían ocasionar un flujo de corriente por el cuerpo humano, así como la cantidad necesaria para causar un daño al mismo.

En el capítulo tres se describe cómo se comporta el suelo al momento de disipar una corriente de falla, y de la corrosión que provoca al medio por el que se canaliza dicha corriente (conductores, electrodos y uniones).

El capítulo cuatro se refiere a los distintos métodos que existen para medir la resistividad del suelo como de la resistencia de la malla de tierra después de su instalación. En el capítulo cinco se describe un análisis sobre cómo podría ser calculado el sistema de tierra de la subestación antes descrita, tomando en cuenta que en los primeros cuatro capítulos se presentan las ecuaciones necesarias para dicho cálculo.

Para finalizar con el capítulo seis en el que se describen algunas técnicas de mejoramiento de una puesta a tierra en torres de líneas de transmisión, y los diversos tipos de suelos artificiales que se utilizan para mantener el valor de la resistividad en un valor bajo o adecuado.

1. CONCEPTOS AFINES A SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

1.1. Sistemas de tierra

La necesidad de instalar un buen sistema de puesta a tierra es la de mantener todos los equipos y cubiertas metálicas a un mismo plano equipotencial, para proteger al personal de un choque eléctrico y la de mantener la electricidad tan limpia y libre de ruidos eléctricos como sea posible.

Los principales sistemas de puesta a tierra son los siguientes:

- Tierra física
- Tierra para protección contra rayos
- Tierra para protección del equipo
- Tierra aislada
- Tierra de referencia cero

1.1.1. Tierra física

Este sistema es el más elemental, también llamado electrodo de tierra; es la conexión de un electrodo enterrado, constituyendo una parte, pues la otra la completa el conductor conectado al equipo metálico (cubiertas o gabinetes). La creencia general es que con tener una baja resistencia en el electrodo, se cuenta con un buen sistema de puesta a tierra.

El sistema electrodo de tierra o tierra física puede consistir en una varilla, tubería u otra forma que se pueda constituir como electrodo y debe tener un contacto directo con el suelo. Es un sistema bajo el suelo y se encuentra en estrecha relación con las partes existentes por encima del mismo.

Es imperativo considerar el sistema completo de tierra de una instalación eléctrica con sus tres componentes principales:

- Electrodo o tubería metálica
- Conductor eléctrico
- Cubiertas metálicas

1.1.2. Tierra para protección contra rayos

Este sistema es utilizado en edificios y antenas de gran altura, debe conectarse al sistema en general. Su función principal es drenar la energía del rayo a tierra, en forma controlada, por medio del pararrayos instalado en las esquinas del edificio, un conductor eléctrico y uno o varios electrodos de tierra separados entre sí.

La corriente generada por un rayo puede alcanzar niveles de 200 000 amperios y mayores. Esta interconexión de sistemas es por razones de seguridad y sobre todo, proteger al ser humano.

1.1.3. Tierra para protección del equipo

Este sistema conecta todas las partes metálicas de los equipos, es decir, las cubiertas de aparatos eléctricos de uso doméstico o cualquier equipo que

pueda ser energizado y entrar en contacto con las personas, manteniendo de esta forma una misma referencia a tierra por medio de un conductor de cobre.

Estas conexiones para ser efectivas, deben mantener continuidad, y así transportar la corriente de falla con seguridad, facilitando la operación de los dispositivos de protección contra sobrecargas.

1.1.4. Tierra aislada

Este sistema ofrece una tierra libre de ruido eléctrico para equipo electrónico, y se usa especialmente en salas de cómputo. Su función es la de eliminar las interferencias de altas frecuencias en los conductores, y que se producen en los cables de otras fuentes de energía. Por tal motivo se diseñó otro conductor de tierra, diferente del conductor de seguridad, y separada de la tierra del edificio. Las corrientes producidas en sistemas digitales modernos fluctúan entre el espectro de frecuencias de corriente continua y las radiaciones electromagnéticas de la luz visible.

Esta conexión, aunque sus intenciones son buenas, viola las normas internacionales de seguridad y por lo tanto no se aconseja su uso.

1.1.5. Tierra de referencia cero

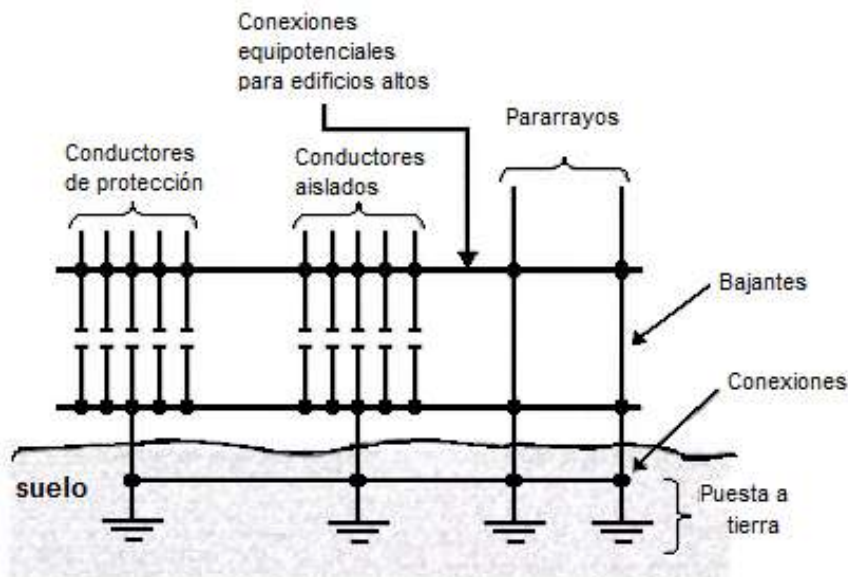
Este sistema es utilizado para todos los equipos de señales digitales. Fue inventado por los fabricantes de equipo electrónico con el fin de proporcionar una protección sin contaminación separada de la tierra del equipo. Comúnmente, la referencia cero es el suelo; ahora si la malla de tierra se encuentra conectada a las bases de las torres o a las cubiertas de los equipos, esta se podría considerar como la referencia cero.

1.2. Conexión efectiva a tierra

La trayectoria a tierra se integra en el circuito eléctrico cuando se instalan todas las conexiones; estas deben ser permanentes, continuas y unidas entre sí. El conductor debe ser del calibre adecuado para soportar la corriente de falla. No es permitido conectar a la misma malla sistemas de tensiones diferentes, salvo que la resistencia de puesta a tierra de cada malla sea menor o igual a un Ohm.

La puesta a tierra es otro circuito eléctrico y por lo tanto debe instalarse con las mismas consideraciones y cuidados que se aplican a cualquier circuito de distribución eléctrico (ver figura 1).

Figura 1. Sistema de puesta a tierra interconectada



Fuente: CASAS, Favio. Tierras soporte de la seguridad eléctrica. P. 147.

1.2.1. Electrodo de tierra

El término electrodo se utiliza para identificar a las terminales de una batería, las cuales indican la trayectoria para la circulación de los electrones dentro y fuera de la misma. El electrodo de tierra de una instalación eléctrica es el medio por el cual entran al suelo las corrientes indeseadas.

Esta podría ser una tubería metálica de agua enterrada con continuidad eléctrica, en contacto directo con la tierra en una longitud mínima de 3 m. En caso de que algún medidor, por ejemplo el de agua, fuese deshabilitado por mantenimiento y por lo tanto se perdiera la continuidad, se debe conectar un conductor como puente entre las dos tuberías que conectan dicho medidor.

La estructura o armazón metálica del edificio puede utilizarse como electrodo de tierra cuando se conecta en forma efectiva. Si la estructura se encuentra en contacto directo con el suelo homogéneo, se considera conectado a tierra en forma efectiva.

El aluminio no está permitido para usarse en electrodos de tierra. Los electrodos de varillas de acero o hierro tendrán un diámetro mínimo de 1,60 cm y una longitud de 2 m.

Electrodos de placa metálica pueden usarse como electrodos de tierra si exponen no menos de 0,186 m² de superficie al terreno exterior. Los electrodos de placa de hierro o acero, deben tener un espesor mínimo de 6,35 mm.

Las tuberías metálicas subterráneas de gas, no debe usarse como electrodos de tierra.

1.2.2. Funciones del electrodo de tierra

Las funciones del electrodo de tierra son diversas, de las cuales se podría mencionar que mantienen un buen contacto con el suelo, de tal forma que las partes metálicas de la instalación que no conducen corriente y que se conectan al sistema, se mantengan al potencial cero.

Otra de las funciones es proporcionar muchas trayectorias a tierra a gran cantidad de electrones generados por una descarga atmosférica o un sobrevoltaje transitorio, de tal forma que sean disipadas en forma instantánea, así como drenar las corrientes de fuga, lo mismo que las descargas electrostáticas, las cuales pueden acumularse en las cubiertas metálicas de los equipos por falla en aislamiento de conductores.

1.2.3. Varilla de tierra

Si se utiliza una varilla como medio de puesta a tierra, esta debe tener una longitud de 2 metros, y un diámetro de 1,6 cm (5/8") como medidas mínimas. Esto proporciona aproximadamente 1005,31 cm² de área superficial en contacto directo con el suelo. Al incrementar la longitud de la varilla, esta tiene un impacto favorable en la resistencia del sistema de puesta a tierra y no de la misma manera si se aumenta el diámetro de la misma.

Existen tres resistencias a considerar:

- De la varilla misma
- Del contacto entre el conductor y la varilla
- Del suelo que rodea a la varilla

La resistencia del material que forma la varilla usualmente tiene un valor muy pequeño y es despreciable. Si la varilla se mantiene libre de grasa, pintura u otro material no conductor en su contacto con el cable y si la tierra alrededor se compacta firmemente, la resistencia de contacto también es muy baja, por lo que se puede despreciar.

La resistencia de la tierra se puede visualizar como una varilla de tierra con capas concéntricas de tierra a su alrededor. Al crecer el área de cada capa, se incrementa el área alrededor de la varilla y existirá un gran número de trayectorias para el flujo de electrones.

1.2.4. Tipos de electrodos

En el mercado existen diversos tipos de electrodos para puestas a tierra y según el precio, la facilidad de incrustación en el suelo y las necesidades que el diseñador requiera, decidirá que electrodo utilizará, por lo cual se mencionan algunos electrodos y sus aplicaciones particulares.

1.2.4.1. Electrodo Copperweld

Esta varilla es una de las más utilizadas, por su relativa facilidad de instalación, poco mantenimiento y bajo costo. Este electrodo está hecho de cobre con aleación de acero para soportar los golpes de incrustación, su longitud es de 2 metros o más y un diámetro de 1,6 cm. La varilla se entierra de forma vertical por medio de golpes constantes. Su área de contacto no es la mejor y lo compensa con la longitud, logrando el contacto con capas de tierra más húmedas y de resistividades más bajas.

Figura 2. **Varilla de cobre con aleación de acero**



Fuente: www.patazas.com.pe/varillas_puesta_a_tierra_21094.html. Consulta: 11 de junio de 2011.

1.2.4.2. Electrodo Chem-Rod

Este electrodo o tipo Chem-Rod cumple con los códigos y estándares internacionales; está diseñado para protección principalmente de personal en instalaciones industriales. También es usado para proteger equipo electrónico sensible en aeropuertos (control de tráfico aéreo).

El electrodo Chem-Rod es un sistema de tierra física diseñado para:

- Sistema de tierra física para protección contra descargas atmosféricas
- Sistema de tierra física que elimina transitorios y sobretensiones
- Sistema de tierra física que protege equipo electrónico contra disturbios eléctricos

Los electrodos Chem-Rod están disponibles en configuración horizontal y vertical, con diámetros de 5,10 y 6,45 cm. Cuando el suelo es rocoso o las condiciones para excavar son difíciles, los electrodos horizontales son enterrados en trincheras (zanja de forma horizontal). La longitud varía desde 1,2 hasta 6 m. Los electrodos están disponibles con mecanismos de conexión mecánica o exotérmica.

Para acomodarse a diferentes suelos, las cargas de diferentes sales están disponibles para todo tipo de clima y condiciones del terreno.

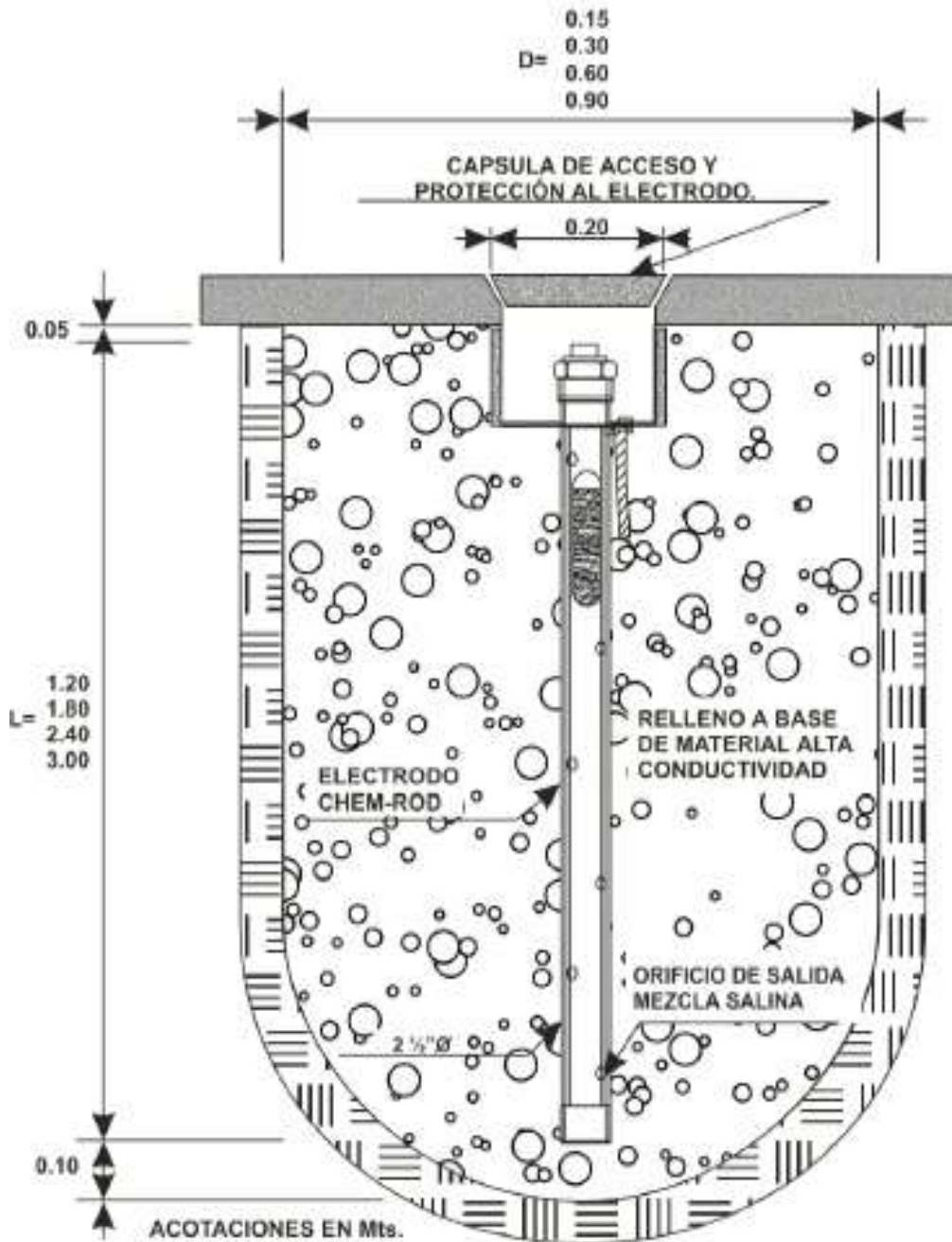
1.2.4.3. Electrodo rehilete

Cuando no es posible clavar una varilla *copperweld* en el suelo debido a las condiciones del terreno, por ejemplo el suelo de talpetate compactado, es utilizado el electrodo rehilete.

Es un electrodo formado por dos placas de cobre soldadas en forma de cruz a una varilla de cobre. Por su alta conductividad eléctrica y térmica puede ser inatacable e inerte frente a los agentes químicos, es el elemento ideal para construir un electrodo de toma de tierra.

Para aprovechar al máximo la eficacia del mismo, es conveniente realizar un pozo de 0,50 metros de diámetro por un metro de profundidad, de forma que el electrodo quede al menos 0,40 metros enterrado.

Figura 3. Electrodo Chem-Rod



Fuente: www.matimsa.com.mx/catalogo/matimsa/electrodos%20quimicos.htm. Consulta: 05

febrero de 2010.

Figura 4. **Electrodo rehilete**



Fuente: www.tierrafisica.com.mx/electrodo-tipo-rehilete.html. Consulta: 02 de marzo de 2010.

1.2.5. **Unión de los electrodos de tierra**

La principal razón de la unión de los electrodos es evitar la diferencia de potencial entre cualquiera de ellos. Al conectar todas las formas de electrodos el resultado es una diferencia de potencial igual a cero en el sistema.

Las diferentes formas de electrodos son:

- Tubería metálica de agua
- Estructura metálica del edificio
- Electrodo incrustado en concreto
- Anillo de tierra

Los circuitos de puesta a tierra formarán una línea eléctricamente continua en la que no podrán incluirse en serie ni masas ni elementos metálicos cualquiera que sean estos. Siempre la conexión de las masas y los elementos metálicos al circuito de puesta a tierra, se efectuará por derivaciones desde este. Si estos electrodos se encuentran disponibles, deben unirse.

1.2.5.1. Tubería metálica como electrodo

Sí la tubería de agua potable o de agua caliente es metálica se debe conectar al sistema de puesta a tierra. Esto no constituye el sistema de puesta a tierra sino solamente una parte; se debe complementar con varillas y conductores de cobre. A la tubería de gas está prohibido conectarse ya que constituye un peligro de incendio.

Cuando se utiliza la tubería de agua se debe tomar en cuenta que existen medidores (contadores de consumo), los cuales pueden ser removidos por personal que realice reparaciones, lo que constituye pérdida en la continuidad del electrodo al ser reemplazado por medidores de cubierta plástica. Para compensar este reemplazo se debe realizar un puente entre el medidor y la tubería.

Los requisitos para utilizar la tubería de agua son:

- Debe ser de metal
- Debe tener una longitud mínima de 3 metros
- Debe tener continuidad eléctrica
- Se debe enterrar y hacer contacto directo con el suelo
- No se deben utilizar los medidores de agua para la continuidad de la trayectoria a tierra

La tubería metálica no es confiable como electrodo, puesto que puede ser removida y en su lugar colocar tubo PVC, lo que eliminaría la continuidad metálica.

1.2.5.2. Estructura metálica como electrodo de tierra

El acero de las estructuras de un edificio o el hierro de construcción de las columnas, son considerados como electrodos de tierra. Cuando una tubería metálica de agua es el electrodo primario, se considera a la estructura metálica del edificio como otro electrodo complementario.

1.2.5.3. Electrodo incrustado en concreto

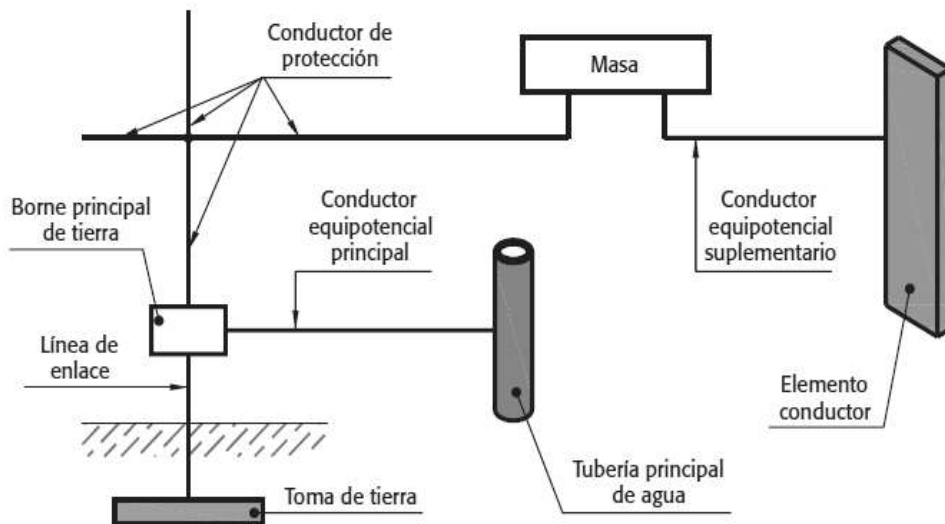
Este se utiliza muy a menudo en sitios remotos de telecomunicaciones, cuando el suelo es rocoso y es difícil la utilización de otras formas de conexión a tierra. El electrodo incrustado en concreto puede ser una varilla con refuerzo de acero o un conductor de cobre, recubierto con un mínimo de 5 cm de concreto.

El electrodo incrustado en concreto ofrece las siguientes ventajas:

- El concreto en contacto directo con el suelo retiene la humedad.
- Las varillas de refuerzo ofrecen más de una trayectoria al flujo de electrones.
- El peso del edificio mantiene una presión constante en el punto de conexión entre el concreto y la tierra.

En una instalación de puesta a tierra, se deberán conectar todos los posibles electrodos, de forma tal que se aprovechen todas las posibles estructuras de metal (ver figura 5).

Figura 5. **Esquema de la unión de los posibles electrodos de tierra**



Fuente: www.marcombo.com/Descargas/8496334147.../UNIDAD%2010.pdf. Consulta: 20 de mayo de 2010.

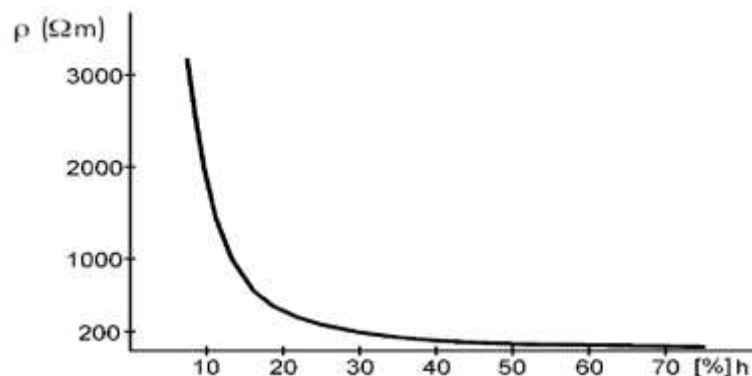
1.2.6. El electrodo incrustado de forma vertical

Cuando la resistividad del suelo es alta, existen métodos para mejorarla. Si se duplica el diámetro del electrodo, la impedancia disminuirá sólo el 10% aproximadamente, mientras que si se duplica la longitud es decir enterrar más un electrodo en el suelo, la impedancia disminuirá hasta un 40%. A continuación se muestran algunas formas de mejorar la resistencia de un sistema:

- El aumento de la longitud del electrodo
- Utilizar más varillas en distintos puntos e interconectarlas
- Realizar un tratamiento al suelo

En la figura 6, se muestra que al aumentar la humedad en el suelo, disminuye la resistividad, por lo que al incrustar un electrodo a mayor profundidad, se espera encontrar con un suelo más húmedo.

Figura 6. **Resistividad de un suelo arcilloso en función de la humedad**



Fuente: www.leonardo-energy.org/espanol/guia-de-la-calidad. Puesta a tierra, cálculo y diseño.

Consulta: 20 julio de 2010.

1.2.7. El conductor como parte del sistema de puesta a tierra

El propósito primario del conductor como parte del sistema de puesta a tierra, es conectar todas las formas de electrodos que estén presentes en una instalación eléctrica, de manera que sea maleable, de material que ofrezca mínima resistencia al flujo de electrones, pero fuerte al ataque de la corrosión.

El cable de cobre es utilizado para este propósito ya que se elabora con hilos enlazados para formar un diámetro adecuado. El cable debe ser de pocos hilos (7 hilos), de tal forma que al estar enterrado en el suelo, su deterioro sea despreciable. Claro está que un cable como el 350 kcmil (37 hilos), no cuenta con pocos hilos; de lo contrario sería muy rígido y poco aplicable (ver tabla I).

Los conductores desnudos de cobre, están manufacturados bajo las normas ASTM B2, B3, B8, B787. Un cable consta de varios alambres trenzados, que le dan mayor resistencia mecánica y flexibilidad para el manejo. Sin embargo, al trenzarlos aumenta la longitud, y por lo tanto, aumenta la resistencia del mismo.

Los conductores, tanto cables como alambres, se identifican por un número, al cual se le conoce como calibre. Normalmente, se sigue el sistema de designación americano AWG (*American Wire Gage*).

El calibre AWG más grueso es el 4/0. Siguiendo en orden descendente los calibres siguientes: 3/0, 2/0, 1/0, 2, 4, 6, 8, 10, 12,..., 20, para conductores cuya sección transversal es mayor al 4/0, la unidad de medida es el circular mil.

Tabla I. Selección del calibre del conductor

Calibre (AWG ó kcmil)	Área		Conductores						
			Trenzado			Total			
	mm ²	Circ. mils	Número de hilos	Diámetro		Diámetro		Área (sección)	
				mm	Pulg.	mm	Pulg.	mm ²	pulg. ²
18	0,823	1620	1	-	-	1,02	0,040	0,823	0,001
18	0,823	1620	7	0,39	0,015	1,16	0,046	1,06	0,002
16	1,31	2580	1	-	-	1,29	0,051	1,31	0,002
16	1,31	2580	7	0,49	0,019	1,46	0,058	1,68	0,003
14	2,08	4110	1	-	-	1,63	0,064	2,08	0,003
14	2,08	4110	7	0,62	0,024	1,85	0,073	2,68	0,004
12	3,31	6530	1	-	-	2,05	0,081	3,31	0,005
12	3,31	6530	7	0,78	0,030	2,32	0,092	4,25	0,006
10	5,261	10380	1	-	-	2,588	0,102	5,26	0,008
10	5,261	10380	7	0,98	0,038	2,95	0,116	6,76	0,011
8	8,367	16510	1	-	-	3,264	0,128	8,37	0,013
8	8,367	16510	7	1,23	0,049	3,71	0,146	10,76	0,017
6	13,30	26240	7	1,56	0,061	4,67	0,184	17,09	0,027
4	21,15	41740	7	1,96	0,077	5,89	0,232	27,19	0,042
3	26,67	52620	7	2,20	0,087	6,60	0,260	34,28	0,053
2	33,62	66360	7	2,47	0,097	7,42	0,292	43,23	0,067
1	42,41	83690	19	1,69	0,066	8,43	0,332	55,80	0,087
1/0	53,49	105600	19	1,89	0,074	9,45	0,372	70,41	0,109
2/0	67,43	133100	19	2,13	0,084	10,62	0,418	88,74	0,137
3/0	85,01	167800	19	2,39	0,094	11,94	0,470	111,9	0,173
4/0	107,2	211600	19	2,68	0,106	13,41	0,528	141,1	0,219
250		-	37	2,09	0,082	14,61	0,575	168	0,260
300		-	37	2,29	0,090	16,00	0,630	201	0,312
350		-	37	2,47	0,097	17,30	0,681	235	0,364

Fuente: FONDONORMA 200. Código Eléctrico Nacional. P. 705.

Por definición, un alambre que tiene un diámetro de un milésimo de pulgada tiene un área de un circular mil (ver figura 7).

Como el diámetro de un CM es igual a un mil, entonces se tiene que:

$$1 \text{ CM} = \frac{\pi \text{ mil}^2}{4} \Rightarrow 1 \text{ mil}^2 = \frac{4 \text{ CM}}{\pi} \quad \text{Ec. 1.1}$$

Un mil² tiene un área mayor que un circular mil (porque un circular mil se encuentra dentro de un cuadrado de lado mil).

Para un alambre de n mils, donde n puede ser cualquier número positivo, se tiene, sustituyendo el valor equivalente de mil² en la ecuación anterior:

$$A = \frac{\pi n^2 \text{mil}^2}{4} = \frac{\pi n^2 \left(\frac{4}{\pi}\right)}{4} \text{CM} \Rightarrow A = n^2 \text{CM} \quad \text{Ec. 1.2}$$

Donde, n = diámetro del conductor expresado en mils.

Por la ecuación resultante se deduce que para encontrar el área de un conductor en CM, cuyo diámetro está dado en pulgadas, este deberá convertirse a mils (multiplicando las pulgadas por 1000) y elevarlo al cuadrado.

Véase el ejemplo siguiente: ¿Cuál es el área en CM de un conductor cuyo diámetro es 0,332 pulgadas?

Solución: se convierte el diámetro a mils:

$$d = 0,332 * 1000 = 332 \text{ mils}$$

Este valor se eleva al cuadrado y entonces se obtiene el área en CM:

$$A = n^2 = (332)^2 = 110\,224 \text{ CM}$$

Como el área en CM es muy pequeña para conductores cuyo calibre es mayor que 4/0 AWG, comercialmente se usa el término KCM, que equivale a 1000 CM, que anteriormente se conocía como MCM (mil cmil).

De esta manera se tiene que:

$$1 \text{ KCM} = 1 \text{ MCM} = 1000 \text{ CM}$$

Cuando se desea el área de los conductores en mm², es necesario tener la equivalencia mm² a CM:

$$1 \text{ CM} = \frac{\pi(0,001)^2}{4} \text{ pulg}^2$$

Donde, una pulgada = 25,40 mm

Por lo tanto:

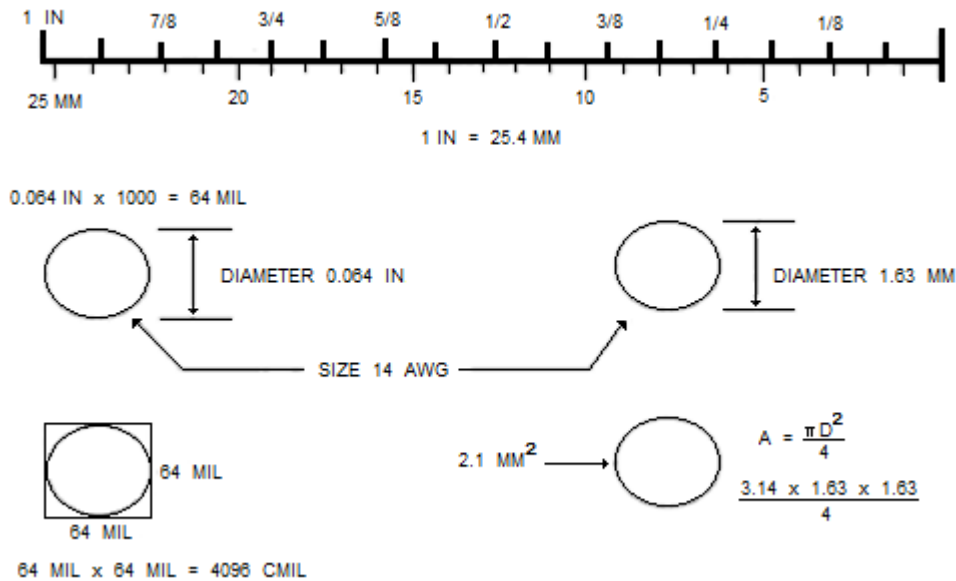
$$0,001 \text{ Pulg} = \frac{25,4}{10^3} = 0,0254 \text{ mm}$$

$$1 \text{ CM} = \frac{\pi(0,0254)^2}{4} \text{ mm}^2 \Rightarrow 1 \text{ mm}^2 = \frac{4}{\pi(0,0254)^2} = 1973,52 \text{ CM}$$

1.2.7.1. Resistencia del conductor

La pérdida de energía debida al choque subatómico entre electrones, generalmente se transforma en calor. También puede definirse como la tendencia de un material a impedir el flujo de corriente a través de él. La unidad en la que se mide la resistencia es el Ohm (Ω).

Figura 7. Representación del diámetro de un conductor en kcmils



Fuente: www.electricasas.com/electricidad/circuitos/tablas-circuitos-electricida. Consulta: 02 de agosto de 2010.

1.2.7.2. Densidad de electrones libres en un conductor

El número de cargas libres por unidad de volumen, se designa por n , se llama densidad de cargas libres. Los metales son los mejores conductores porque tienen muchos electrones libres. Por ejemplo, en el cobre hay al menos $8,45 \times 10^{22}$ electrones libres por centímetro cúbico.

La densidad de electrones libres del resto de los metales es del mismo orden de magnitud. En el aluminio es 6×10^{22} , y en el wolframio $6,3 \times 10^{22}$ electrones libres por centímetro cúbico.

Véase el ejemplo siguiente: ¿Cuántos electrones libres hay en un segmento de cable de cobre, calibre No. 4, de 1 mm de longitud? (ver figura 8).

Solución: según la tabla I, el área transversal de un conductor de cobre No. 4, es $A = 21,15 \text{ mm}^2$.

El volumen de un cilindro es:

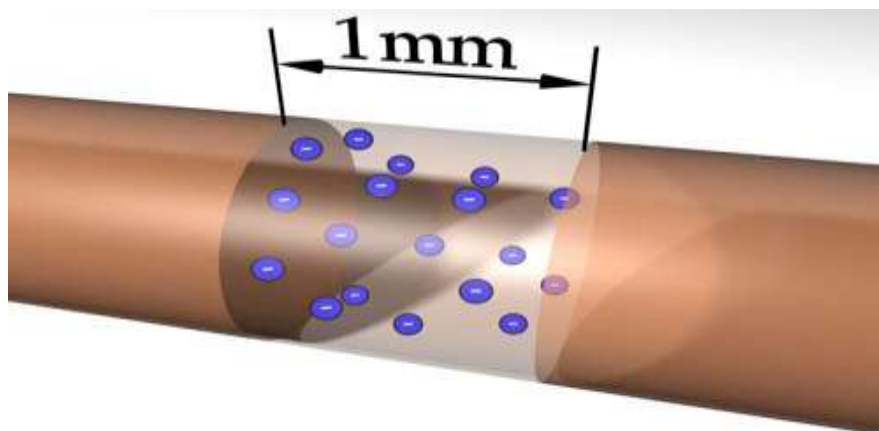
$$V = \pi r^2 h \quad \text{Ec. 1.3}$$

$$V = 21,15 \text{ mm}^2 * 1 \text{ mm} = 21,15 \text{ mm}^3 = 21,15 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$$

Por lo tanto, si en el cobre hay al menos:

$$\eta = 8,45 \times 10^{22} \text{ electrones libres/1 cm}^3$$

Figura 8. **Electrones libres en un conductor de cobre**



Fuente: www.usal.es/~electricidad/Principal/Circuitos/.../VelocidadElectrones. Consulta: 14 de octubre de 2010.

$$(8,45 \times 10^{22} \text{ electrones libres}/1\text{cm}^3) * 21,15 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$$

$$= 1,79 \times 10^{21} \text{ electrones libres}$$

Tomando en cuenta que la sección transversal utilizada fue la de un alambre sólido, si se utiliza un cable trenzado, su área transversal es 27,19 mm² (ver tabla completa en el anexo 1).

1.3. Ecuaciones para el cálculo de la sección transversal del conductor para una malla de tierra

El calibre del conductor depende del valor de la corriente de falla, del tiempo de duración de esta, como del material del que esté hecho el conductor. La norma ANSI/IEEE Std 80-1986 recomienda, como calibre mínimo, el conductor número 4/0 AWG de cobre; esto por razones mecánicas.

El objetivo es mantener los potenciales de paso y de contacto, en sus valores de seguridad, en el interior del perímetro de la cerca de la subestación.

El calibre del conductor se calcula utilizando cualquiera de las siguientes fórmulas y dependiendo de la unidad de medida en que se requiera.

$$A_{mm^2} = I \frac{1}{\sqrt{\frac{TCAP \times 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r} \ln \frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}}} \quad (mm^2) \quad \text{Ec. 1.4}$$

$$A_{kcmil} = I \frac{197,4}{\sqrt{\frac{TCAP}{t_c \alpha_r \rho_r} \ln \frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}}} \quad (kcmil) \quad \text{Ec. 1.5}$$

Donde:

$$k_o = 1/\alpha_o = (1/\alpha_r) - T_r \text{ (}^\circ\text{C)} \quad \text{Ec. 1.6}$$

A = sección transversal del conductor, en mm^2 ó en kcmil

I = corriente simétrica, en kA (debe de considerarse el incremento de este valor a futuro)

T_m = temperatura máxima permisible, en $^\circ\text{C}$

T_a = temperatura máxima ambiente, en $^\circ\text{C}$

T_r = temperatura de referencia para las constantes del material, en $^\circ\text{C}$

α_o = coeficiente térmico de resistividad a 0°C , en $1/^\circ\text{C}$

α_r = coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia T_r , en $1/^\circ\text{C}$

ρ_r = resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia T_r , en $\mu\Omega \text{ cm}$

t_c = tiempo durante el cual circula la corriente de falla, en A o en kA

$TCAP$ = factor de capacidad térmica por unidad de volumen (ver anexo 4), en $\text{J}/(\text{cm}^3 \text{ }^\circ\text{C})$

1.4. Conexiones

Las conexiones o uniones son importantes para el funcionamiento en un sistema de puesta a tierra y que normalmente no reciben mantenimiento, a menos que se realice una reparación. Existen diferentes conexiones entre conductores, tales como: un conductor a una varilla, entre dos conductores y en una subestación eléctrica y a las estructuras de acero; lo importante en este caso es que su unión sea permanente y confiable.

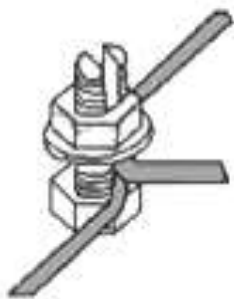
1.4.1. Conexiones mecánicas

Las conexiones mecánicas son todas aquellas que nos permiten sujetar de manera duradera dos o más metales, con ayuda de herramientas mecánicas. Estas pueden ser a presión, atornilladas o remachadas. Realizando esta unión por medio de tuercas y terminales de cobre (compresión elástica). Las uniones pueden ser:

- De cable a cable
- De cable a varilla
- De cable a estructuras metálicas
- De varilla a varilla

El empalme manual no es una técnica certificada por las normas internacionales, por lo que no se recomienda su aplicación (ver figuras 9 y 10).

Figura 9. **Conexiones mecánicas para unión de cables**



**Conexión con
tuerca**



**Conexión para
cables
paralelos**



**Conexión a
presión**

Fuente: CASAS, Favio Tierras soporte de la seguridad eléctrica. P. 187.

Figura 10. **Conexión de un cable de tierra a una estructura**



Fuente: subestación Guatemala Este, finca San Vicente km 18,5 a Santa Catarina Pínula.

1.4.2. Conexión exotérmica

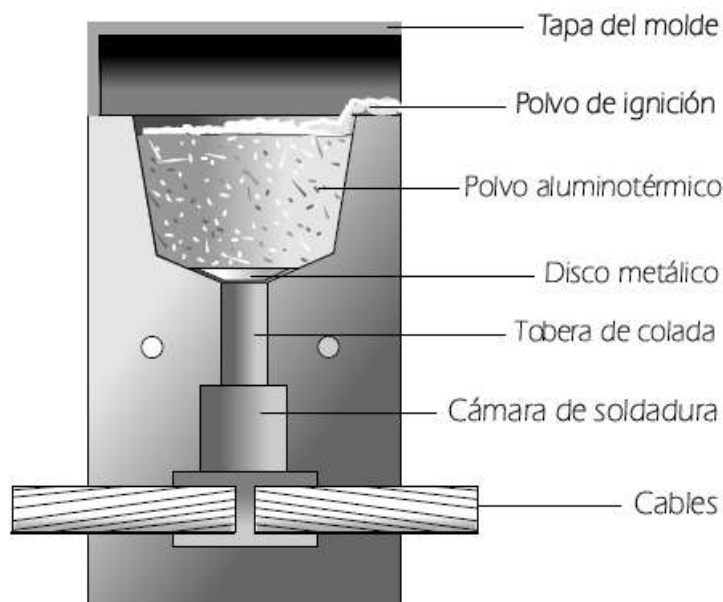
El procedimiento de la soldadura aprovecha la alta temperatura que se desarrolla en la reacción provocada por la reducción del óxido de cobre por el aluminio. La reacción tiene lugar en el interior de un molde-crisol de grafito, en el que previamente se han introducido las piezas a soldar; el metal resultante de la reacción aluminotérmica, en estado de fusión, fluye sobre ellas, fundiéndolas y formando una masa compacta y homogénea.

La reacción es muy rápida y por tanto las piezas a soldar adquieren, en la zona que rodea al punto de soldadura, una temperatura muy inferior a la que se obtiene empleando los procedimientos de soldadura de gas, factor muy importante cuando se trata de proteger el aislamiento del cable o las características físicas de los materiales a soldar.

La conexión exotérmica es una soldadura molecular. La aleación utilizada tiene una temperatura de fusión prácticamente igual a la del cobre.

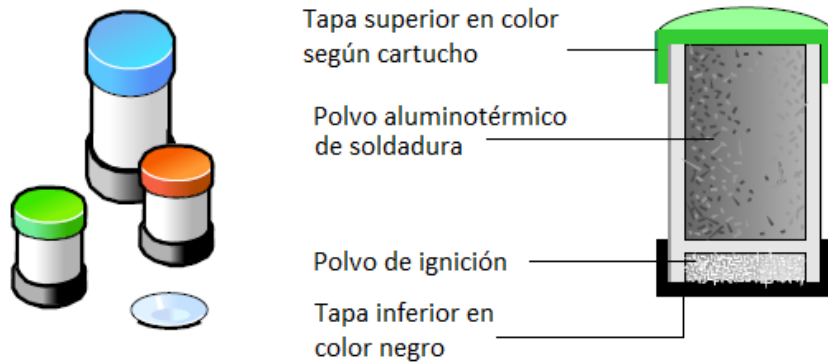
El envase que contiene la carga aluminotérmica es generalmente de plástico, esta consta de dos recámaras o partes que contienen el polvo metálico y en el otro el polvo que produce en encendido o ignición de la fusión.

Figura 11. **Molde de grafito para la fusión del polvo aluminotérmico**



Fuente: www.klk.es/.../CATALOGO_SOLDADURA_ALUMINOTERMICA_COBRE. Consulta: 24 de octubre 2010.

Figura 12. **Cargas o cartuchos de polvo metálico de aluminio**



TIPO CARTUCHO	C-15	C-25	C-32	C-45	C-65	C-90	C-115	C-150	C-200	C-250
COLOR	GRIS CLARO	GRIS OSCURO	VIOLETA	BLANCO	AMARILLO	NARANJA	ROJO	MARRON	AZUL	VERDE
UNID./CAJA	20	20	20	20	10	10	10	10	10	10

Fuente: www.klk.es/.../CATALOGO_SOLDADURA_ALUMINOTERMICA_COBRE. Consulta: 24 de octubre de 2010.

1.4.2.1. **Equipo de soldadura exotérmica**

El equipo para la soldadura exotérmica es ligero y portátil, no necesita de ninguna fuente exterior de energía, por tanto, es idóneo para su utilización en el punto donde se desee la unión de metales. El equipo utilizado se describe a continuación:

- **Moldes:** se mecanizan a partir de un bloque de material refractario (de grafito). Su duración media, en condiciones normales de utilización, es de 70 a 100 soldaduras. Una tapa metálica protege de las proyecciones en el momento del encendido.

- Tenazas de soporte: están diseñadas para manejar los moldes con total seguridad, permitiendo su apertura y cierre cuando el molde está caliente.
- Tenaza MS: está diseñada para manejar los moldes fabricados a partir de una sola pieza de grafito, especialmente los empleados para soldar de un cable a un tubo.
- Pistola de encendido: se utiliza para provocar la chispa al polvo de ignición.
- Cepillo metálico: utilizado para la limpieza correcta de los cables a soldar.
- Brocha: para la limpieza del interior del molde después de cada soldadura.
- Raspador de moldes: su forma está especialmente diseñada para la limpieza de la tolva de carga del molde.

1.4.2.2. El proceso de soldadura exotérmica

Al realizar una soldadura debe tomarse en cuenta la limpieza de los cables en la zona a soldar, de tal forma que no se forme una capa que aisle la junta de los metales. Antes de realizar la primera soldadura, se debe calentar el molde hasta que este no pueda tocarse al tacto, por medio de una flama de gas o quemando un cartucho de las cargas de encendido.

Para soldaduras sucesivas, el calor desarrollado mantendrá el molde a la temperatura adecuada. Si el intervalo entre soldadura y soldadura es prolongado, deberá reiniciarse el proceso.

La fusión se inicia cuando por medio de un reactivo iniciador que proporciona la energía suficiente para activar el proceso, que transcurre de forma rápida y segura en el interior del molde.

Figura 13. **Equipo necesario para una soldadura exotérmica**



Fuente: www.klk.es/.../CATALOGO_SOLDADURA_ALUMINOTERMICA_COBRE. Consulta: 24 de octubre de 2010.

El proceso de preparación de los conductores de cobre es el siguiente:

- Efectuar los cortes de materiales con una mínima deformación
- Retirar una parte del aislante de aproximadamente 3 cm
- Limpiar y secar al máximo las partes que se van a soldar
- En presencia de grasa, esta deberá retirarse con un solvente

Para preparar conductores de acero se procede así:

- Retirar toda presencia de óxido hasta que el metal adquiera brillo
- Alejar toda presencia de pintura de la zona a soldar
- Limpiar y secar la superficie al máximo

Figura 14. **Soldadura exotérmica de una red de tierra**



Fuente: subestación Guatemala Este, finca San Vicente km 18,5 a Santa Catarina Pínula.

2. LA INFLUENCIA DE LA ELECTRICIDAD EN EL CUERPO HUMANO

2.1. La electropatología

Esta disciplina estudia los efectos de la corriente eléctrica, que puede producir lesiones en el organismo. Las consecuencias del paso de la corriente por el cuerpo humano pueden ocasionar desde una simple molestia hasta la muerte, dependiendo del tipo de contacto. La muerte no necesariamente es súbita sino más bien retardada.

Los accidentes de origen eléctrico pueden ser producidos por:

- Contactos directos:
 - Por contacto entre fase a fase
 - Por contacto entre fase a neutro
 - Por descarga de electricidad estática a tierra

Siendo provocados en el momento que se pone en contacto la piel con una fuente de energía.

- Contactos indirectos:
 - Por tensión de paso o transferida
 - Por inducción electromagnética

- Por impacto de rayo
- Por fulguración

Siendo provocados por la influencia de una fuente de alta energía.

2.2. Los efectos de la corriente eléctrica en el ser humano

Al circular una corriente por el organismo, siempre se presentan en mayor o menor grado tres efectos: nervioso, químico y calorífico. Dando como resultado lesiones en el cuerpo y que se muestran a continuación:

La electrocución se produce cuando la persona fallece debido al paso de la corriente en el cuerpo. El fallecimiento es debido a la suspensión respiratoria y la paralización del corazón.

La fibrilación ventricular, que consiste en el movimiento sin control del corazón, el cual no sigue su ritmo normal y deja de enviar sangre a los distintos órganos.

La tetanización muscular es la anulación de la capacidad del control muscular, o sea, la rigidez incontrolada de los músculos.

El estado fisiopatológico de shock se presenta por efectos circulatorios y respiratorios simultáneamente.

La asfixia se produce cuando el paso de la corriente afecta al centro nervioso que regula la función respiratoria, ocasionando el paro respiratorio, por contracción del diafragma.

Las quemaduras o necrosis eléctrica se producen por la energía liberada al paso de la corriente (calentamiento por efecto Joule).

El bloqueo renal es la paralización de la acción metabólica de los riñones, producido por los efectos tóxicos de las quemaduras.

2.3. Factores que inciden en la gravedad de una descarga eléctrica

En cada caso de descarga eléctrica interviene una serie de factores variables con efecto aleatorio, pero los principales son: la intensidad de la corriente, resistencia del cuerpo humano, trayectoria, duración del contacto, tensión aplicada y la frecuencia de la corriente eléctrica.

2.3.1. Intensidad de la corriente

En muchas ocasiones, algunos miliamperios originan contracciones en los músculos; estas hacen que la persona no pueda soltarse de un contacto con una fuente de corriente y como las contracciones afectan por igual a los músculos de la respiración, es posible que se origine la muerte por asfixia.

El límite de desprendimiento para una persona que posee una elevada resistencia del cuerpo es de 16 mA, y de solo 8 mA, en el caso de baja resistencia del cuerpo.

Los experimentos con animales de peso similar a las personas, dan resultados confiables o por expresiones de personas expuestas a las fuentes de energía.

Cuando una persona es afectada por un arco eléctrico, el calentamiento producido por él puede llegar a quemar la ropa, formándose con esto una flama. Este efecto lo puede causar un contacto con alta tensión.

En la tabla II, se muestran los efectos provocados en el cuerpo al contacto con una fuente de energía, capaz de realizar daños permanentes o irreversibles.

Tabla II. **Efectos fisiológicos directos de la electricidad**

Intensidad (mA)	Contacto	Efecto
1,0	Apenas perceptible.	El paso de la corriente produce cosquilleo. No existe peligro.
5,0 o menos	Sensación de adormecimiento de las manos.	Umbral de percepción para el 50% de la población.
15 o menos	Se inicia la sensación de calambres.	Se inician las convulsiones. La persona puede aún soltar voluntariamente la fuente de energía.
Entre 15 y 25	El cuerpo convulsiona sin control.	La persona no puede soltar voluntariamente la fuente de energía. "Límite de desprendimiento".
Entre 25 y 80	Soportable, pero se presentan irregularidades en el movimiento del corazón.	Períodos de paro con reinicios de su actividad. Cuando la corriente fluye por el corazón.
Entre 50 y 80	Inicio de la fibrilación en el corazón.	Al interrumpirse el bombeo, la sangre deja de circular originando la pérdida de conocimiento.
80 mA y 3 A	Se establece plenamente la fibrilación del corazón.	Se presenta la muerte, cuando la fibrilación de la cámara del corazón dura más de 0,30 segundos.
Entre 3 y 10 A	Pérdida del conocimiento.	El paro pulmonar conduce a la muerte inmediata.

Fuente: DE LA VEGA, Miguel. Problemas de ingeniería de la puesta a tierra. P. 99.

Para intensidades superiores a los 10 A, el efecto de calentamiento sobre el tejido orgánico es decisivo, originándose la cocción de los líquidos de los tejidos del cuerpo, lo cual puede conducir a la carbonización de las sustancias del mismo.

2.3.2. Resistencia eléctrica del cuerpo humano

Los resultados de una larga serie de experimentos realizados por investigadores de diferentes nacionalidades sobre que la resistencia del cuerpo humano en un grupo de individuos, revelan que hay personas con valores de resistencia de cien mil Ohm y otras con resistencia menor a los mil. La resistencia del cuerpo está muy relacionado con la condición física de la persona, es decir si esta se encuentra seca, húmeda o mojada.

La resistencia varía de acuerdo con el modo o circunstancia del contacto, según las condiciones físicas del contacto (piel normal, piel lacerada). También la resistencia cambia en función de la clase de corriente aplicada. Todas esas variedades que influyen en la resistencia del cuerpo humano, imposibilitan la determinación exacta de un valor.

Experimentalmente, la resistencia del cuerpo humano, se mide entre las dos manos sumergidas en una solución salina, que sujetan dos electrodos y una placa de cobre sobre la que se deberá parar. Según el Dr. Charles Dalziel y la estimación de la Guía IEEE-80, la resistencia del cuerpo humano se toma como mil Ohm.

2.3.3. La duración del contacto

No solo la intensidad de la corriente es la que provoca los efectos colaterales en la descarga eléctrica, sino también el tiempo de contacto o circulación de la misma por el cuerpo. A mayor tiempo de exposición, peores consecuencias. En la tabla III se muestra que si el tiempo es prolongado, la influencia de la corriente en el cuerpo humano se puede volver peligrosa.

2.3.4. La trayectoria de la corriente

Si una persona pasa a formar parte de un circuito eléctrico, se tienen dos puntos de contacto: uno de entrada y otro de salida de la corriente. El más crítico será el que involucre al corazón. De otra forma, la mayor cantidad de accidentes reportados se presentan en las manos.

Tabla III. Peligrosidad de la corriente según el tiempo de contacto

Tiempo (s)	Intensidad de la corriente peligrosa (mA)
3,0	100
2,0	130
1,0	180
0,6	220
0,3	250
0,2	400

Fuente: DE LA VEGA, Miguel. Problemas de ingeniería de la puesta a tierra. P. 111.

2.4. Umbrales que soporta el cuerpo humano

Se pueden tolerar intensidades de corriente sin originar fibrilación. Si la duración es muy corta y las frecuencias menores de 25 Hz o de corriente directa. La ecuación empírica que relaciona la intensidad de corriente tolerable y el tiempo que un organismo puede soportar, está dada por la fórmula de Charles Dalziel.

$$I_c^2 t_c = 0,0135 \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

I_c = valor efectivo de la corriente que circula por el cuerpo, en A

t_c = duración del choque eléctrico, en segundos

El valor 0,0135, es una constante empírica que representa la potencia por segundo absorbidos por un cuerpo durante un choque eléctrico, para personas del orden de 50 kg.

Ahora, despejando I_c :

$$I_c = \frac{0,116}{\sqrt{t_c}} \quad (A) \quad \text{Ec. 2.2}$$

Sí la persona en análisis es de 70 kg, la constante empírica cambia a 0,0246.

Ejemplo: ¿Qué corriente I_c , soporta un cuerpo humano de 50 y 70 kg para una duración de 0,15 segundos, y que la fibrilación sea reversible?

Solución: para una persona de 50 y 70 kg los resultados son los siguientes:

$$I_c = \frac{0,116}{\sqrt{0,15}} = 299 \text{ mA} \approx 0,30 \text{ A}$$

$$I_c = \frac{0,0246}{\sqrt{0,15}} = 63,51 \text{ mA} \approx 0,06 \text{ A}$$

2.4.1. Tensiones de seguridad

Es necesario tomar en cuenta los diversos casos que pueden presentarse al hacer contacto un cuerpo con alguna superficie energizada en una instalación de alta energía. Las diferencias de potencial tolerables se determinan de acuerdo con los conceptos de tensión de paso, de contacto o de transferencia.

2.4.1.1. Tensión de contacto

Es la diferencia de potencial entre la elevación del potencial de tierra y el potencial superficial en el punto en donde una persona está parada, y al mismo tiempo tiene una mano en contacto con una estructura metálica aterrizada.

La ecuación de la tensión de contacto para una persona de 50 kg es:

$$E_c = \frac{0,116(1000 + 1,5C_s\rho_s)}{\sqrt{t_c}} \quad (V) \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde:

C_s = coeficiente en función del terreno y la capa superficial

h_s = espesor de la capa superficial, (entre 0,1 y 0,15 m)

ρ = resistividad aparente del terreno tomado como suelo uniforme, en Ω m

ρ_s = resistividad aparente de la capa superficial (grava u otro material),
en Ω m

$$C_s = 1 - \frac{0,09 [1 - (\rho/\rho_s)]}{2h_s + 0,09} \quad \text{Ec. 2.4}$$

El valor de C_s , se determina por medio de una gráfica, involucrando al factor K . Si no se tiene prevista una capa superficial de grava, entonces: $\rho_s = \rho$ y por lo tanto $C_s = 1$.

$$K = (\rho - \rho_s)/(\rho + \rho_s) \quad \text{Ec. 2.5}$$

Para calcular la tensión correspondiente a una persona con un peso aproximado a 70 kg, se utilizan las mismas fórmulas con la salvedad de cambiar la constante 0,116 por $0,157 = \sqrt{0,0246}$.

Para diseño de subestaciones se utiliza el peso de una persona de 50 kg, debido a que es un valor más conservador.

2.4.1.2. Tensión de malla

Es la máxima tensión de contacto dentro de un perímetro que alberga o encierra un sistema de puesta a tierra.

Si el contacto se realiza con una estructura metálica conectada sólidamente a tierra.

La ecuación de la tensión de malla es la siguiente:

$$E_m = \frac{\rho K_m K_i I''}{L_T} \quad (V) \quad \text{Ec. 2.6}$$

El valor de K_i es un factor de irregularidad debido a que la corriente tiende a irse hacia la periferia de la red, y especialmente hacia las esquinas, está dado por:

$$K_i = 0,656 + 0,172n \quad \text{Ec. 2.7}$$

$$n = \sqrt{a b} \quad \text{Ec. 2.8}$$

Donde:

a = número de conductores longitudinales

b = número de conductores transversales

El valor de K_m es un factor geométrico, y depende de la geometría de la malla del conductor dado por:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[\frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \right] \quad \text{Ec. 2.9}$$

Donde:

D = espaciamiento entre conductores paralelos, en m

h = profundidad de los conductores de la malla de tierra, en m

d = diámetro del área transversa del conductor de la malla de tierra, en m

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}} \quad \text{Ec. 2.10}$$

Para mallas con electrodos tipo varilla a lo largo del perímetro, en las esquinas o dentro de la malla, $K_{ii} = 1$.

Para mallas sin electrodos tipo varilla o con pocas varillas dentro de la malla, se utiliza la siguiente ecuación.

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} \quad \text{Ec. 2.11}$$

Donde:

K_h = factor de corrección relacionado con la profundidad de la malla

El valor de h_0 es la profundidad de referencia y es igual a un metro, por lo tanto la ecuación 2.11, se establece como:

$$K_h = \sqrt{1 + h} \quad \text{Ec. 2.12}$$

El valor de L_T es la longitud total de los conductores más los electrodos verticales dado por la siguiente ecuación:

$$L_T = L + L_v \quad (m) \quad \text{Ec. 2.13}$$

Donde:

L = longitud total de los conductores transversales más los longitudinales

L_v = factor que se establece para los electrodos verticales

El valor de L_v , está dado por la siguiente ecuación:

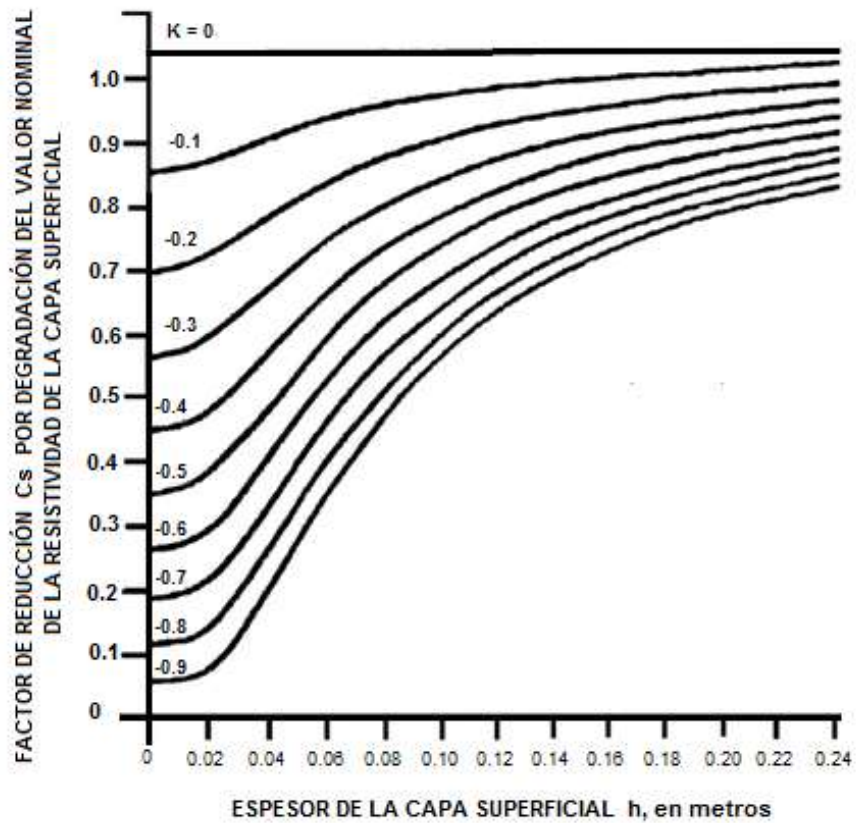
$$L_v = 1,15L_r \quad (m) \quad \text{Ec. 2.14}$$

Donde:

L_r = suma de la longitud de todos los electrodos verticales

El valor constante 1,15, refleja el hecho de que la densidad de corriente es más alta en las varillas de tierra cercanas al perímetro, que en los conductores de la malla.

Figura 15. El factor C_s , como una función del factor de reflexión K



Fuente: HARPER, Enríquez. Manual de instalaciones eléctricas residenciales e industriales.
P. 482.

Forma alternativa para determinar el valor de “n”, para redes de tierras cuadradas y rectangulares.

$$n = n_a n_b n_c n_d \quad \text{Ec. 2.15}$$

$$n_a = 2L_c/L_p \quad \text{Ec. 2.16}$$

Donde:

L_p = longitud de los conductores en la periferia de la malla de tierra, en m

L_c = longitud total de los conductores horizontales de la malla de tierra, en m

$n_b = 1$, para mallas cuadradas y rectangulares

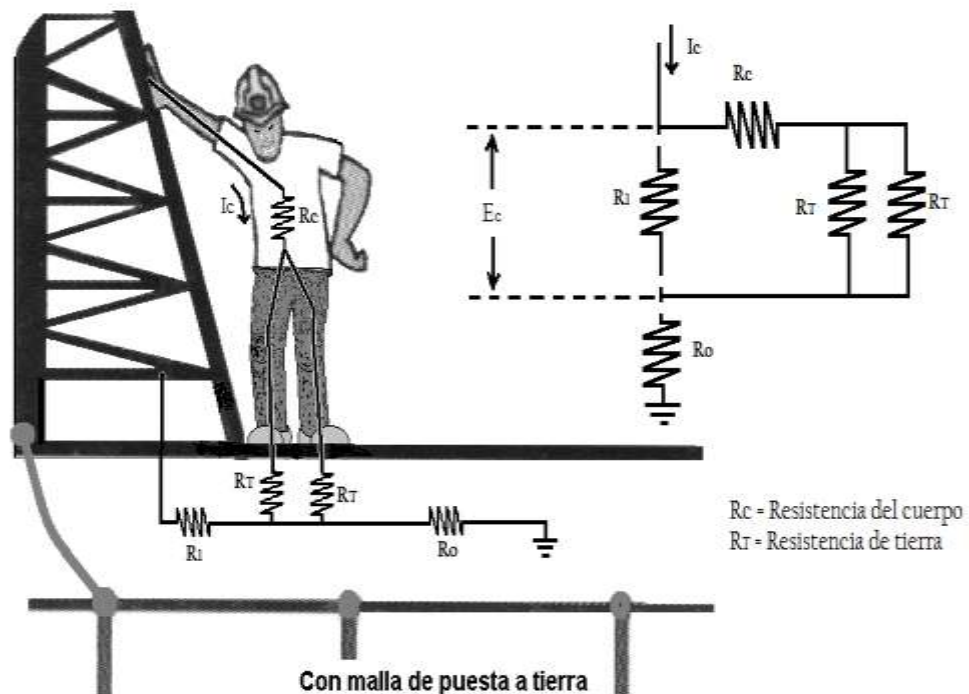
$n_c = 1$, para mallas cuadradas y rectangulares

$n_d = 1$, para mallas cuadradas y rectangulares

Para cualquier otro caso:

$$n_b = \sqrt{L_p / 4\sqrt{A}} \quad \text{Ec. 2.17}$$

Figura 16. Tensión de malla



Fuente: elaboración propia, con base a "Diseño de subestaciones eléctricas; Tierras soporte de la seguridad eléctrica", de Raúl Martín; Favio Casas.

2.4.1.3. Tensión de paso

Es la diferencia de potencial superficial que puede experimentar una persona con los pies separados a un metro de distancia y sin hacer contacto con algún objeto aterrizado. La ecuación para el cálculo de la tensión de paso para una persona de 50 kg es:

$$E_p = [0,116(1000 + 6C_s \rho_s)]/\sqrt{t_c} \quad (V) \quad \text{Ec. 2.18}$$

Tomando en cuenta los factores que influyen cuando una malla de tierra está instalada, se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_p = (\rho K_s K_i I'')/L_T \quad (V) \quad \text{Ec. 2.19}$$

Para la profundidad usual de la malla de tierra de 0,25 m hasta 2,50 m, la fórmula para K_s es:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{(n-2)}) \right] \quad \text{Ec. 2.20}$$

Para profundidades menores a 0,25 m, la ecuación es:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} w \right) \quad \text{Ec. 2.21}$$

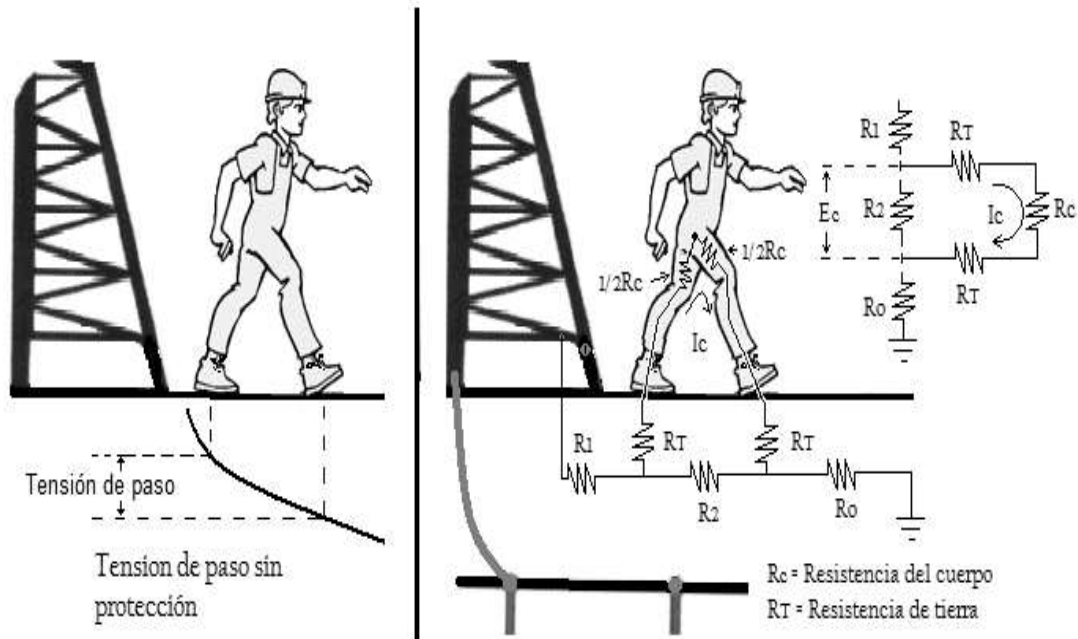
Donde:

$$w = 1/2 + 1/3 + 1/4 + \dots + 1/(n-1) \quad \text{Ec. 2.22}$$

O bien para $n \geq 6$

$$w = 1/[2(n - 1)] + \ln[(n - 1) - 0,423] \quad \text{Ec. 2.23}$$

Figura 17. Tensión de un paso



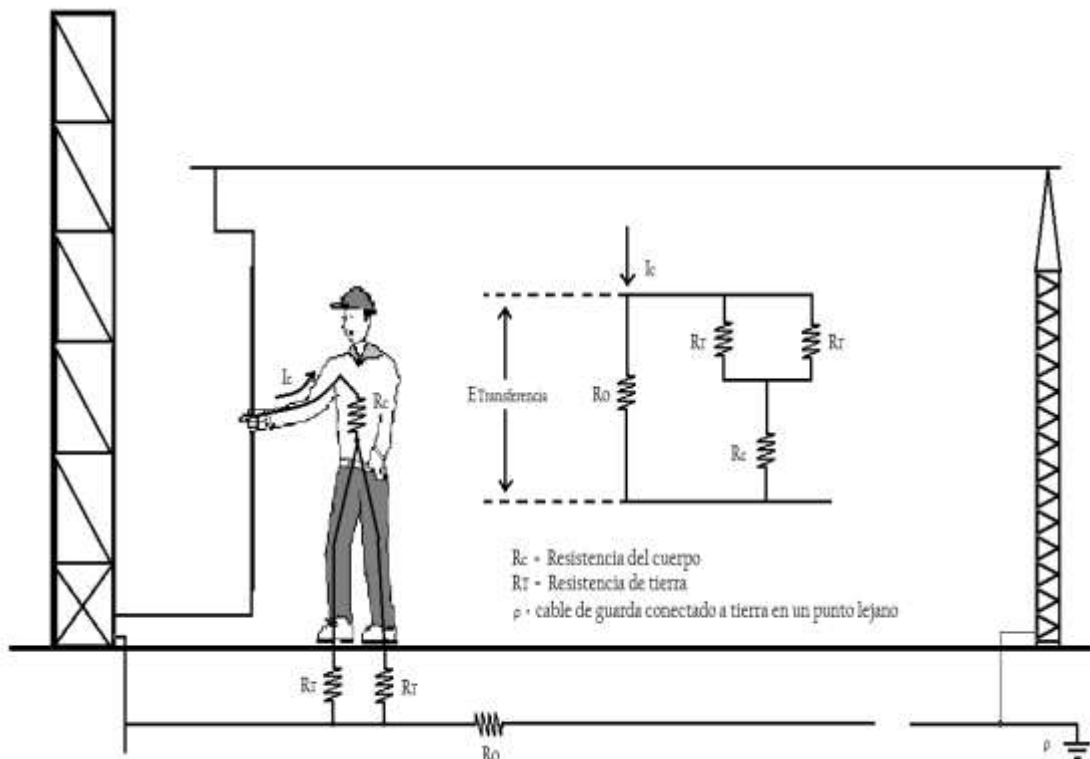
Fuente: elaboración propia, con base a "Diseño de subestaciones eléctricas" de Raúl Martín.

2.4.1.4. Tensión transferida

Es un caso especial de tensión de contacto en donde una tensión es transferida hacia el interior o a la parte de afuera de la subestación, desde un punto externo remoto (ver figura 18).

La tensión del choque eléctrico puede ser igual a la elevación total de potencial de la malla a tierra. Los circuitos incluyen las resistencias del sistema de electrodos de tierra.

Figura 18. **Tensión de transferencia**



Fuente: elaboración propia, con base a "Diseño de subestaciones eléctricas" de Raúl Martín.

2.5. Protección contra descargas electroatmosféricas

Las descargas electroatmosféricas son algunas de las perturbaciones que más pueden afectar las instalaciones. Un rayo puede considerarse como una fuente de corriente, capaz de fluir a través de una impedancia.

La tensión producida por el rayo es el producto de la corriente por esa impedancia. Las ondas de impulso normalizadas para rayos son: 1,2/50 (100% x 50%) μs o 2,5/40 (90% x 50%) μs .

El rango de las corrientes del rayo se estima desde 2000 a 500 000 A y la distribución de valores, en la forma como ocurre frecuentemente en la naturaleza, se asume del tipo logarítmico – normal.

Al inicio de un rayo se presenta un gran impulso de campo electromagnético que viaja hasta 7 km, de manera que la mayor amenaza se debe a los efectos inducidos y radiados que producen acoplamientos en las instalaciones.

Tabla IV. **Parámetros del rayo**

	Parámetros	50 % probable	Tipo de descarga
1	I (kA)	45,3	Primera descarga negativa
2		16,3	Descarga subsecuente negativa
3		33,9	Primera descarga positiva
4	Q rayo (C)	83,7	Rayo negativo
5			Rayo positivo
6	Q corta (C)	5,2	Primera descarga negativa
7		0,99	Descarga subsecuente negativa
8		17,3	Primera descarga positiva
9	WRkJ/ Ω	107	Primera descarga negativa
10		6,33	Descarga subsecuente negativa
11		612	Primera descarga positiva
12	di/dt kA/ μs	10,4	Primera descarga negativa
13		29,9	Descarga subsecuente negativa
14		2,53	Primera descarga positiva
15	di/dt 30 – 90% kA/ μs	24,7	Primera descarga negativa

Fuente: CASAS, Favio. Tierras soporte de la seguridad eléctrica. P. 59.

2.5.1. Polarización de la nube y la tierra

La nube se carga fuertemente con una polaridad en su base y con la contraria en su parte superior. Al mismo tiempo, se presenta en la tierra un efecto "espejo" de polarización inversa, respecto de la base de la nube. Los tres procesos por los que se polariza la nube son:

- Convección: es el movimiento que la acción del calor produce en la masa de los cuerpos fluidos.
- Convergencia: se le llama a la acción en que los vientos soplan en puntos con más concentración (ver figura 19).
- Orografía: esta es representada por la elevación y forma de degradación del terreno, o lugar donde se forman remolinos de viento (ver figura 20).

Figura 19. Polarización de la nube



Fuente: CASAS, Favio. Tierras soporte de la seguridad eléctrica. P. 61.

Figura 20. Orografía



Fuente: CASAS, Favio. Tierras soporte de la seguridad eléctrica. P. 61.

2.5.1.1. Proceso de formación del rayo

El planeta tierra es como una gran batería y constantemente está cediendo electrones a la atmósfera; esta corriente es del orden de $3 \mu\text{A}/\text{km}^2$, pero del total es de 2000 Amperios continuos.

A continuación se presentan los pasos más importantes en la formación de una descarga (ver figura 21):

- Encendido de la descarga: se inicia un líder por una ruptura preliminar dentro de la nube.
- Líder escalonado: es el líder descendente o trazador, parte desde la nube en pasos de $1 \mu\text{s}$ de duración y longitud de varias decenas de metros con

pausas de 20 a 50 μ s. Este líder, en su viaje hacia la tierra, produce estructuras geométricas ramificadas descendentes.

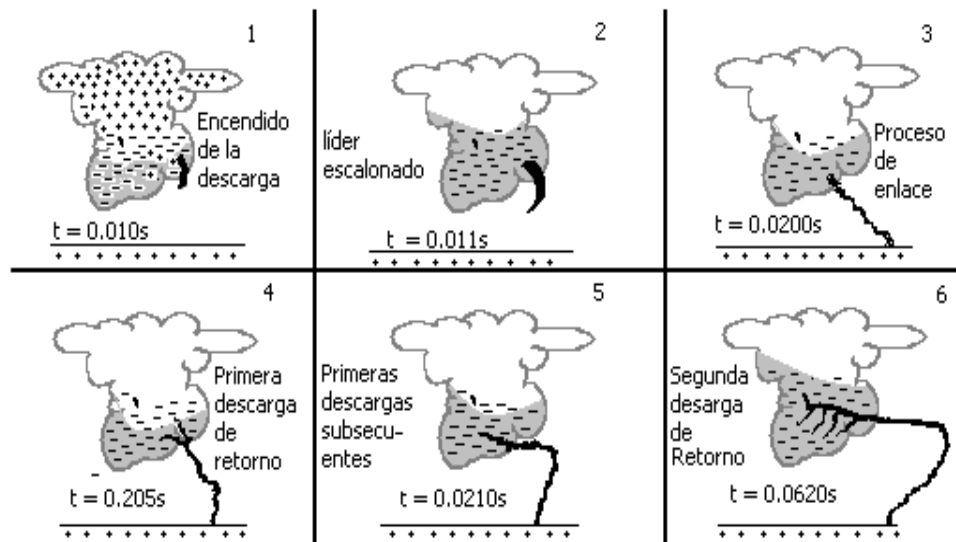
- Proceso de enlace: a medida que la punta del líder se acerca a tierra, el campo eléctrico de las puntas e irregularidades, alcanza valores que exceden el nivel de disrupción del aire.
- Descarga de retorno: cuando el líder descendente llega más o menos a 150 m de la tierra, sale a su encuentro el líder ascendente, desde una punta o irregularidad, produciendo la gran descarga de retorno. Esta liberación rápida de energía eleva la temperatura hasta 30 000 °K y genera un canal de alta presión con plasma que se expande, originando el trueno y el relámpago.
- Líder dardo: si queda carga disponible en la nube, esta se puede propagar hacia abajo por el canal ya conformado. Este líder dardo da comienzo a las descargas subsecuentes.
- Descargas subsecuentes: por el mismo canal de ionización se producen descargas hasta lograr un equilibrio natural.

2.6. Sistema de protección contra descargas electroatmosféricas

Este sistema parte de la valoración del nivel de riesgo, y va hasta la puesta en práctica de una guía de seguridad personal; su objetivo principal es controlar (no eliminar) el fenómeno natural, encausándolo en forma segura, por medio de conductores de dimensiones adecuadas y para tal canalización.

El sistema de protección contra descargas electroatmosféricas forma una serie de pasos que se deben seguir, para una mejor coordinación del nivel de riesgo (ver tabla V).

Figura 21. **Proceso de formación del rayo**



Fuente: CASAS, Favio. Tierras soporte de la seguridad eléctrica. P. 61.

2.6.1. **Protección contra descargas por hilo de guarda**

Es una serie de cables desnudos, generalmente de acero, que se fijan sobre las estructuras de una subestación o en torres de transmisión de alto voltaje, formando una red que actúa como un blindaje, para proteger las partes "vivas" de las descargas directas de los rayos. La red de cables de guarda actúa como contraparte del sistema de tierra. La altura de los hilos es máxima en el punto donde un 60 % de los rayos suelen caer en las torres y un 40 % en el claro de la subestación.

El número de descargas atmosféricas que ocurren sobre un cable de guarda depende del nivel cerámico de la región.

$$N_s = 0,063(nc)^{1,25} \quad \text{Ec. 2.24}$$

Donde:

N_s = densidad de descargas eléctricas, en descargas/km²

nc = nivel cerámico de la región, en días/año

En el modelo electrogeométrico se considera que al quedar protegidos los conductores más altos de una subestación, los niveles inferiores quedan automáticamente protegidos. La distancia de protección r_s , también es llamada “radio crítico de flameo”.

Como en realidad los cables de guarda no se instalan exactamente encima de los cables por proteger, entonces conviene establecer la protección por zonas (ver figuras 22 y 23).

2.6.1.1. El efecto de los hilos de guarda al sistema

Al conectar los hilos de guarda al sistema de tierra de la subestación, se considera que estos desvían una pequeña porción de la corriente de falla, restando de esta manera al total de la corriente calculada.

Un hilo de guarda de una línea que esté conectado a tierra en muchos puntos, presenta una impedancia longitudinal Z_1 , y una conductancia transversal $1/R_2$.

Si la línea, además es de longitud suficientemente grande, la impedancia equivalente es independiente de la longitud, por lo que se calcula con la siguiente ecuación:

$$Z = \sqrt{Z_1 R_2} \left(\frac{\Omega}{km} \right) \quad \text{Ec. 2.25}$$

Donde:

Z_1 = impedancia longitudinal, en Ω/km

R_2 = resistencia transversal, en Ω/km

Tabla V. Sistema integral de protección contra rayos

	Componente	Función que cumple
1,0	Evaluación del nivel de riesgo	Determinar el nivel de protección requerido
2,0	Sistema de protección externo	Canalizar el rayo hasta el suelo en forma segura
2,1	Terminales de captación	Interceptar el rayo
2,2	Bajantes	Conducir el rayo, atenuar efectos internos del campo magnético
2,3	De protección contra rayos	Dispersar y disipar la corriente del rayo
3,0	Sistema de protección interno	Limitar las sobrecorrientes y sobretensiones transitorias en el interior de la instalación
3,1	Equipotencialización con DPS	Limitar sobretensiones en los puertos de los equipos
3,1,1	Protección primaria	Limitar sobrecorrientes transitorias al interior de las instalaciones
3,1,2	Protección secundaria	Limitar sobretensiones en equipos electrónicos
3,2	Equipotencialización con conductores	Reducir efectos internos del campo eléctrico
3,3	Apantallamientos localizados	Reducir efectos internos del campo magnético en equipos electrónicos
3,4	Topología de cableados	Contribuir a la compatibilidad electromagnética, disminuyendo las impedancias de transferencia
3,5	Instalación de filtros	Controlar las perturbaciones conducidas, comúnmente se aplican pasa-bajos
4,0	Prevención de riesgos	
4,1	Guía de seguridad personal	Desarrollar comportamientos seguros hacia las personas
4,2	Sensor de tormentas	Suspender actividades de alto riesgo
4,2,1	Fijos	Suspender actividades de alto riesgo
4,2,2	Portátiles	Suspender actividades de alto riesgo

Fuente: CASAS, Favio. Tierras soporte de la seguridad eléctrica. P. 65.

Tabla VI. **Características mecánicas y eléctricas del cable de guarda**

Descripción	Cable de guarda
Calibre	3/8
Diámetro, en m	0,00952
Peso unitario, en kg/m	0,409
Tensión de ruptura, en kg	5100
Impedancia, en Ω /km	1,80

Fuente: MAZÁ, Baltazar. Análisis de la coordinación de aislamiento por sobretensiones externas en las líneas de 138 kV, del área oriental del INDE. P. 68.

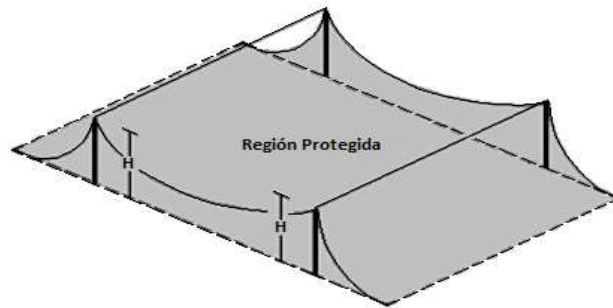
2.6.1.2. Método electrogeométrico

Este es un sistema analítico desarrollado por Gilman y Whitehead para determinar la efectividad de los apantallamientos. En él se pretende que los objetos que se van a proteger sean menos atractivos a los rayos que los terminales de captación; esto se logra determinando la distancia de impacto o "radio de atracción" del rayo a un objeto. Este método se aplica en todo el mundo, sin embargo, es importante tener en cuenta que presenta diferencias entre la teoría y algunos resultados en la práctica. La siguiente ecuación ha sido la tradicional y de aplicación universal:

$$r_s = 10I^{2/3} \text{ (m)} \quad \text{Ec. 2.26}$$

La distancia de descarga determina la posición de la estructura que apantalla respecto del objeto que se quiere proteger, tomando en cuenta la altura sobre el nivel del piso de cada uno. Dicha distancia está relacionada con la carga del canal del rayo, y por tanto es una función de la corriente de la descarga de retorno.

Figura 22. **Zona protegida con hilos de guarda**



Fuente: CASAS, Favio. Tierras soporte de la seguridad eléctrica. P. 69.

Figura 23. **Hilo de guarda en la cima de las torres, lado de 69 kV**



Fuente: subestación Guatemala Este, finca San Vicente km 18,5 a Santa Catarina Pínula.

2.7. Electricidad estática

Si se realiza un experimento de frotar dos aislantes como ebonita o vidrio con un paño, estos se cargan eléctricamente. Los materiales conductores permiten el paso de cargas eléctricas, mientras los aislantes lo obstaculizan. Las cargas electrostáticas negativas son electrones de los átomos de los elementos químicos y las positivas equivalen a la acción de los protones del núcleo atómico, privados de los electrones de la última capa.

Los electrones situados en la superficie de un material aislante o un conductor aislado no pueden disiparse fácilmente mientras no tengan una vía conductora a tierra. Al no poder circular con facilidad dan lugar a la denominada electricidad estática, a diferencia de la electricidad dinámica que circula por los conductores con fines de transformación de energía (luz, calor, movimiento).

Los electrones tienen libertad de movimiento de una molécula a otra en los conductores, pero los protones son inseparables del átomo y no pueden moverse, a menos que lo haga el propio átomo. El conjunto de los átomos de los cuerpos sólidos forman estructuras que mantienen la posición de dichos átomos entre sí. En cambio en los líquidos y mucho más en los gases, se tiene un desplazamiento relativo entre los mismos. Esa es la razón porque en los sólidos solo se mueven los electrones y en los líquidos y gases se pueden mover electrones y protones.

La carga eléctrica es una magnitud física que se representa por la letra "q", cuya unidad natural será el electrón, aunque por razones prácticas se considera el culombio (C), ya que un electrón tiene una carga de $1,60 \times 10^{-19}$ C

es decir, para obtener una carga negativa de un culombio, se necesitan $6,24 \times 10^{18}$ electrones.

2.7.1. Accidentes ocasionados por la electricidad estática

El accidente más destacable es el incendio o explosión; ocurre por la mezcla de aire con vapores, nieblas, gases o polvo combustible. Si la cantidad de cargas electrostáticas es grande, origina un potencial eléctrico elevado que puede dar lugar a la descarga electrostática. Esta descarga puede ser el principio de una atmósfera explosiva, dependiendo de la energía que posea y siempre que esta sea igual o superior a la energía mínima de ignición. Los valores mínimos se dan para atmósferas explosivas de hidrógeno con 0,019 mJ y de sulfuro de carbono con solo 0,009 mJ.

Las descargas más potentes suelen ocurrir en forma de chispas y desde conductores aislados que han tenido un proceso de carga y se descargan a otro conductor cercano, en el que la energía desprendida en función de la capacidad del condensador eléctrico formado por los dos conductores, su potencial y la cantidad de carga eléctrica acumulada, se obtienen según la ecuación:

$$W = \frac{CV^2}{2} = \frac{QV}{2} = \frac{Q^2}{2C} \quad (J) \quad \text{Ec. 2.27}$$

Donde:

W = energía desprendida en la descarga, en J

C = capacidad, en F

V = potencial eléctrico, en V

Q = cantidad de electricidad, en C

Las descargas desde cuerpos aislantes hacia conductores se dan si la acumulación de carga electrostática es muy grande. El cuerpo humano es un buen conductor, y en ambientes con humedad relativa baja, acumula cargas electrostáticas que dan lugar a un potencial de varios miles de voltios.

Cuando una persona se ha cargado electrostáticamente provoca descargas al tocar objetos conductores en conexión con la tierra. Estas cargas se generan por contacto del calzado con suelos aislantes. La ropa utilizada también influye en la generación de la electricidad estática (ver figura 24).

De lo expuesto anteriormente se afirma que un cuerpo conductor aislado de la tierra tiene una constante llamada capacitancia.

Véase el ejemplo siguiente: ¿Es posible demostrar que una persona cargada electrostáticamente que toque con la palma de la mano un cuerpo conductor, produzca una chispa suficiente para encender una mezcla combustible-aire?

Solución: la capacitancia de una persona aislada con suela de caucho es de 200 pF, la densidad de carga es de $3,1 \times 10^{-9}$ C/cm² y superficie de la mano de 210 cm².

La tensión que se adquiere es:

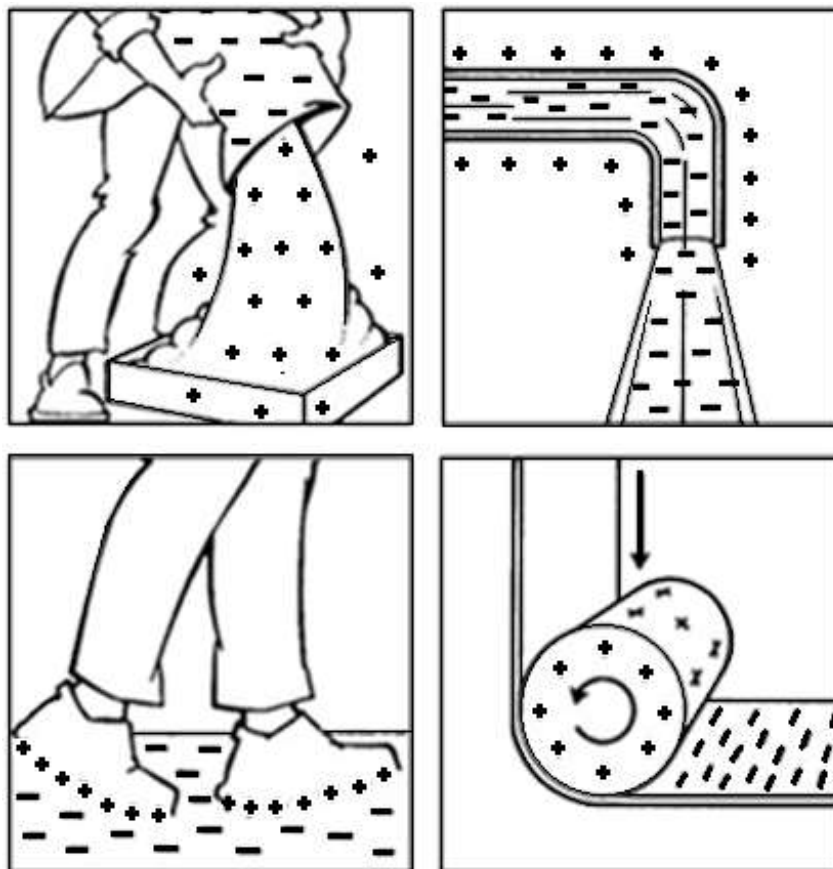
$$V = (3,1 \times 10^{-9} * 210) / 200 \times 10^{-12} = 3255 \text{ V}$$

Por lo tanto la energía disipada será de:

$$W = E = [200 \times 10^{-12} * (3255)^2] / 2 = 1,06 \times 10^{-3} \text{ J} = 1,06 \text{ mJ}$$

Se concluye que esta energía es factible que origine una chispa, y por lo tanto un incendio, en instalaciones con atmósferas inflamables como el hidrógeno.

Figura 24. **Generación de cargas electrostáticas**



Fuente: www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/. Protección frente a cargas electrostáticas. Consulta: 07 de noviembre de 2010.

3. FUNDAMENTOS DE GEOLOGÍA Y LA COMPOSICIÓN DEL SUELO

3.1. Geología básica

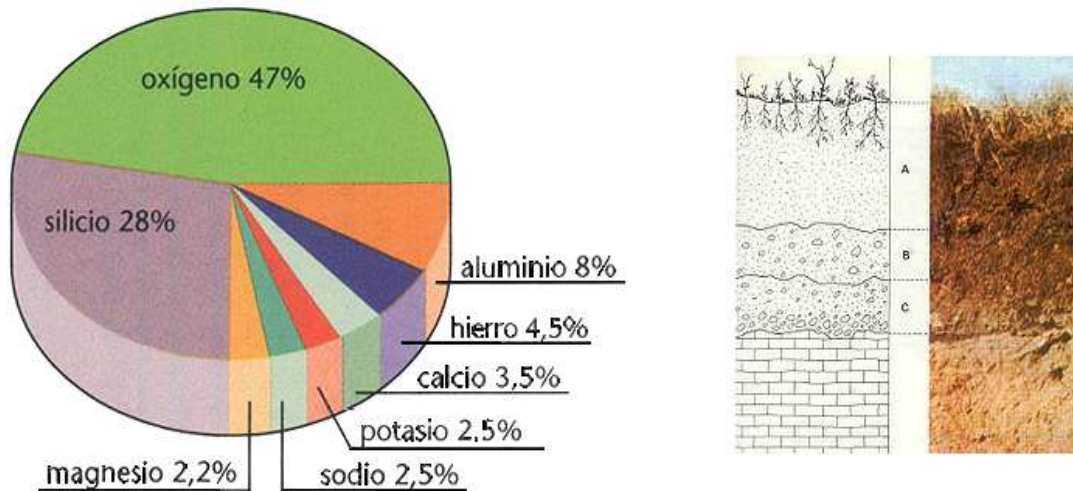
La geología es la ciencia que estudia la estructura de la tierra y de la formación de las rocas, su evolución y sus orígenes. Desde el punto de vista geológico, la tierra es un cuerpo aproximadamente esférico, compuesto de varias capas concéntricas de material rocoso; la corteza (con una profundidad de aproximadamente 30 km), el manto superior (situado entre 30 y 700 km de profundidad), el manto inferior (ubicado entre 700 y 2900 km de profundidad), las cuales envuelven al núcleo central (de un radio aproximado de 3741 km). La corteza terrestre está compuesta de roca meteorizada (compuesta de meteoritos).

3.1.1. La corteza terrestre y su composición

La corteza terrestre está compuesta de 92 elementos químicos conocidos. Los minerales son formados por todos estos elementos y aproximadamente el 98 % del peso de la corteza terrestre está compuesto por ocho elementos químicos: el Oxígeno y Silicio, forman el 75 % de los elementos, el restante está formado de: Aluminio, Hierro, Calcio, Potasio, Sodio y Magnesio.

En un diagrama de pastel se presenta una visualización de estas proporciones (ver figura 25).

Figura 25. **Composición química de la corteza terrestre**



Fuente: elaboración propia, con base a www.astrociencia.com/2007/09/;
www.es.wikipedia.org/wiki/Suelo. Consulta: 20 de enero de 2011.

3.1.1.1. Las rocas y su proceso natural de transformación

El planeta Tierra es un cuerpo que está en constantes cambios, tanto en el núcleo como en la superficie. Las fuerzas internas actúan y forman nuevas montañas, volcanes y corrimiento de las placas tectónicas, dando nueva forma a la superficie, esto con ayuda de las lluvias, del viento y la vegetación, formando nuevas rocas y pulverizando otras.

Algunas propiedades geotécnicas importantes de las rocas son, por ejemplo: la densidad relativa, permeabilidad, compresibilidad, grado de intemperie, resistencia mecánica y la conductividad. Si bien todas son independientes, el grado de intemperie influye decisivamente en las demás.

El proceso natural de las rocas a fragmentarse cerca de la superficie, es debido a que exponen mayor área por unidad de volumen a la intemperie, el agua penetra sus discontinuidades; la acidez de la lluvia es debido al bióxido de carbono disuelto en la atmósfera, y por su parte las plantas liberan bióxido de carbono por sus raíces, desintegrando las rocas. Los principales componentes de los suelos son:

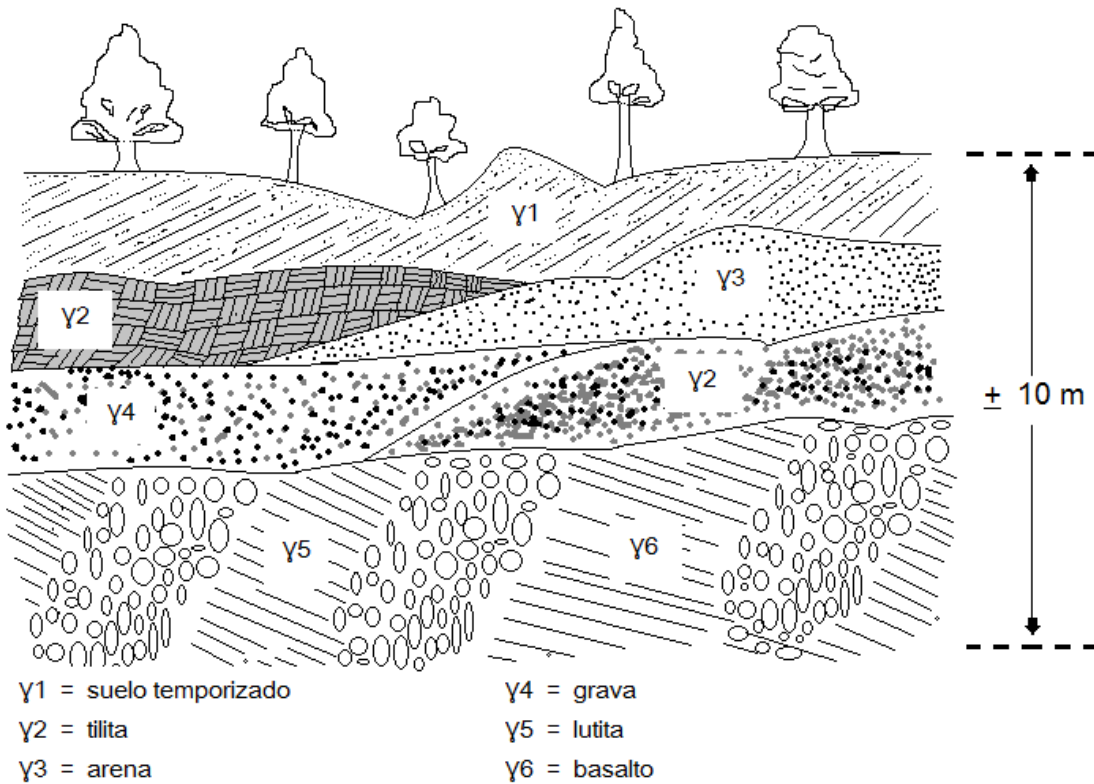
- Arena: que es la más abundante de todos
- Arcilla: formada por granos de menos de 2 milímetros
- Materias orgánicas: formados por detritos de plantas, microorganismos y animales en descomposición
- Agua: cuyo porcentaje, presentación y característica puede ser variada

3.1.2. Las rocas y su resistividad

La humedad es un factor importante en la resistividad de una roca. Con pocas excepciones, la corriente eléctrica circula únicamente por el electrolito que rellena sus poros, y como la conductividad eléctrica de las rocas es esencialmente electrolítica, la resistividad es fuertemente influenciada por la humedad. Por lo que, en rocas que se encuentran bajo el nivel de las aguas subterráneas, los poros están totalmente saturados de humedad. El valor absoluto de la humedad queda determinado por la porosidad de la roca.

Algunas rocas tienen una elevada resistividad, por ejemplo: las arenas secas, y los sedimentos hidroquímicos compactos (el yeso y la anhidrita). Las arcillas poseen generalmente menor resistividad que las arenas, lo que se debe a la considerable influencia del agua vinculada a la superficie de separación de las fases sólida y líquida.

Figura 26. Representación de las distintas capas de un suelo



Fuente: DE LA VEGA, Miguel. Problemas de ingeniería de puesta a tierra. P. 41.

3.1.3. La grava como capa superficial

Se conoce como grava a la superficie de acumulación de piezas de piedra, una al lado de otra o sobre otra, cuya resistividad eléctrica macroscópica no solo depende de la forma, tamaño y estructura mineralógica de las piezas unitarias, sino también de la forma de contacto entre cada una de ellas. La grava es un material que se utiliza como suelo final en las instalaciones de transformación y distribución de energía de alta tensión para formar una capa aislante.

La subestación Guatemala Este cuenta con una capa superficial de grava de aproximadamente 15 cm de altura y cada piedra tiene 2,5 cm de diámetro, en el área ocupada por el equipo de alta tensión y transformación.

Las áreas de circulación de vehículos, parqueo y centro de monitoreo se encuentran cubiertas de piso de hormigón (ver figura 27).

Figura 27. **Grava en la subestación Guatemala Este, lado de 230 kV**



Fuente: subestación Guatemala Este, finca San Vicente km 18.5 a Santa Catarina Pínula.

En la práctica, se adoptan valores de resistividad que varían entre 2000 y 3000 Ω m, aun cuando se ha llegado a medir 5000 Ω m, en estado húmedo, en cierta clase de grava.

3.2. Propiedades del suelo y su influencia en la puesta a tierra

A primera vista se cree que el suelo es un mal conductor de la electricidad, principalmente si este se encuentra totalmente seco. La resistividad varía dependiendo de la composición de sus partículas, así como de la cantidad de agua, sales minerales y otros parámetros que a continuación se describen.

Para que un terreno sea propicio deben realizarse pruebas de muestreo, tales como:

- La humedad del suelo para posibilitar los procesos electrolíticos necesarios para dispersar la carga eléctrica absorbida.
- La cantidad de sales que contiene el agua del terreno.
- La porosidad de la muestra para contener vacíos o poros, los cuales podrían absorber agua u otro líquido hidratante.
- La higroscopicidad muestra la porosidad del material y la existencia en él de sustancias solubles. Al aumentar la higroscopicidad disminuyen las propiedades aislantes de los dieléctricos.
- La plasticidad es la prueba de deformación de un material húmedo por la aplicación de una presión.

- La polarización es la prueba de una roca para provocar una variación del potencial en el medio, haciendo circular una corriente eléctrica por la misma.
- La permeabilidad magnética es una relación entre la inducción magnética y la intensidad de campo magnético.
- La absorción es la prueba de atracción de una sustancia sólida sobre un fluido, de modo que las moléculas de este penetren en ella.
- La temperatura del suelo es un factor que influye sobre la velocidad del movimiento de los iones. Una temperatura elevada provoca evaporación de los líquidos del suelo.
- La solubilidad se determina agregando un cristal de sal u otra sustancia al agua, los dipolos de esta ejercen fuerzas de atracción sobre los iones, obligando al cristal a romperse y sus moléculas a ionizarse.
- La superficie específica es el área superficial disponible por cada gramo de muestra (m^2/gr). Esta propiedad está relacionada con el tamaño de las partículas. Entre más pequeña es una partícula, mayor es su superficie específica.
- El potencial de ionización es la energía necesaria para separar un electrón de un átomo, produciendo un ión cargado positivamente y un electrón libre. Los elementos alcalinos como Litio y el Sodio, poseen baja energía de ionización y son fuertemente electropositivos (tienden a perder electrones).

3.2.1. Conducción de cargas eléctricas hacia el suelo

El suelo, como parte de un circuito eléctrico, es representado como un conductor, utilizado como retorno de la corriente eléctrica para disipar la corriente de cortocircuito y como polo eléctrico en telecomunicaciones. En líneas de transmisión funciona como un cuarto conductor en paralelo con el circuito, lo cual se debe tomar en cuenta durante la determinación de la magnitud de la corriente.

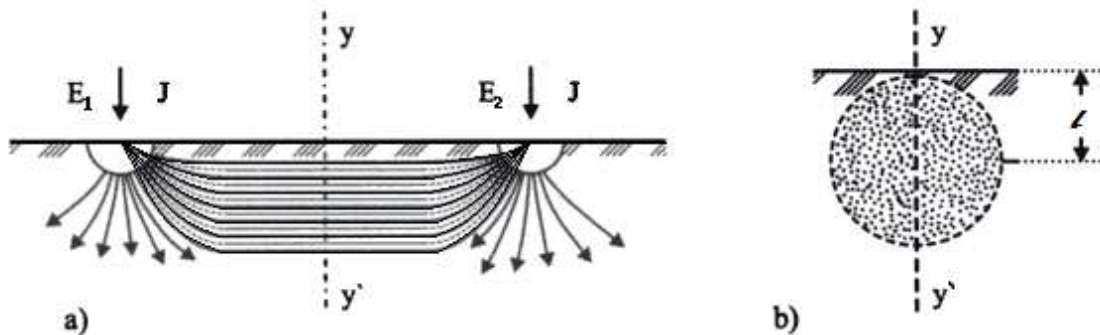
En general se acepta como un conductor sin tomar en cuenta las dificultades que esto implica. Para presentar una idea objetiva de la problemática esencial, basta considerar el caso en que la tierra actúa como circuito de retorno de corriente.

Si la conductividad del cobre es de 5×10^7 S/m y la de un terreno considerado como favorable, es de aproximadamente 10^{-2} S/m, se puede intuir que tal diferencia entre sus conductividades debe presentar diferencias por la muestra que se utilizó al realizar la comparación.

El problema se resuelve al determinar la equivalencia entre las secciones transversales de ambas clases de conductores, por la clase de terreno y para el caso de corrientes estacionarias, la resistencia óhmica que presenta el mismo resulta del orden de $0,05 \Omega/\text{km}$; así que en el caso del conductor de cobre, ello involucraría una sección transversal, de alrededor de 350 mm^2 . En cambio, al representar al conductor que en este caso es el suelo, sería de aproximadamente $2 \times 10^6 \text{ m}^2$, lo que significa una relación $S_t/S_c \approx 6 \times 10^9$, es decir que la sección del circuito de retorno por el suelo, debería de ser, 6×10^9 veces más grande que la sección del conductor de cobre.

Se asume en principio, una sección circular para el conductor de retorno del suelo, para la circulación de corriente entre dos electrodos semiesféricos E_1 y E_2 . El eje del conductor que en este caso es el suelo, quedaría situado aproximadamente a la profundidad $l = \sqrt{0,16 * 2 \times 10^6} = 566$ m. El cálculo de la sección de retorno se ha hecho de forma ideal, es decir, suponiendo que el terreno es homogéneo (tiene la misma naturaleza geológica), y por lo tanto presenta la misma conductividad en cualquier punto del volumen del terreno (ver figura 28).

Figura 28. **Electrodos semiesféricos en un suelo homogéneo (ideal), utilizado como conductor**



Fuente: DE LA VEGA, Miguel. Problemas de ingeniería de puesta a tierra. P. 46.

3.3. La resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica es la relación entre la diferencia de potencial en un material y la densidad de corriente que resulta en el mismo. Numéricamente, es la resistencia ofrecida por un cubo de 1 m x 1 m x 1 m, medida entre dos caras opuestas.

Matemáticamente, se representa como:

$$\rho = RS/L \quad (\Omega m) \quad \text{Ec. 3.1}$$

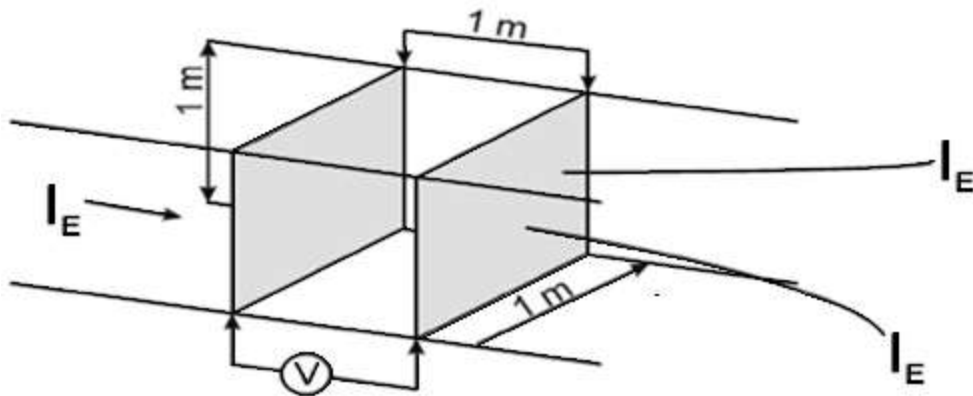
Donde:

R = resistencia del material, en Ω

S = sección de una de las seis caras del cubo, en m^2

L = distancia de una de las aristas del cubo, en m

Figura 29. **Ilustración de la resistividad del terreno**



Fuente: www.leonardo-energy.org/espanol/guia-de-la-calidad. Puesta a tierra, cálculo y diseño.

Consulta: 20 julio de 2010.

3.3.1. Teoría elemental del electrodo vertical

Para la evaluación de este electrodo elemental, se debe considerar como una extensión de una fuente puntual a una lineal. En el caso de un electrodo vertical se asemeja a una fuente lineal, a la cual se le aplica un principio llamado, el de la imagen reflejada (extenderse de forma imaginaria el doble de su longitud para facilitar o encontrar una figura geométrica adecuada para el análisis), se busca la distribución de su potencial y luego se trata de identificar la imagen de sus líneas equipotenciales con la de una figura conocida (elipsoide).

El análisis primordial es establecer que las expresiones finales de sus magnitudes características queden en función de parámetros que sean fáciles de determinar en la práctica.

El electrodo se encuentra inmerso o enterrado en un suelo con resistividad “ ρ ”, pero contra la atmósfera, a la que, aplicándole el principio de la imagen reflejada se forma un electrodo gemelo imaginario con longitud igual al reflejado y para el análisis se toma como dos veces el electrodo original ($2l$). Rodeando por todos lados al electrodo por un medio homogéneo, se aplica una corriente uniforme a lo largo de la longitud (de forma ideal). Para realizar este análisis se utilizan coordenadas cartesianas, haciendo coincidir la longitud $2l$ con el eje y . El eje x , perpendicular al eje y (ver figura 30).

Al establecer un punto arbitrario $P(x,y,z)$, en el cual el potencial generado por la fuente lineal, es la contribución del potencial de cada una de las partes parciales que forman la fuente lineal.

Si la longitud de cada una de las partes parciales es $d\lambda$, entonces la corriente parcial será igual a:

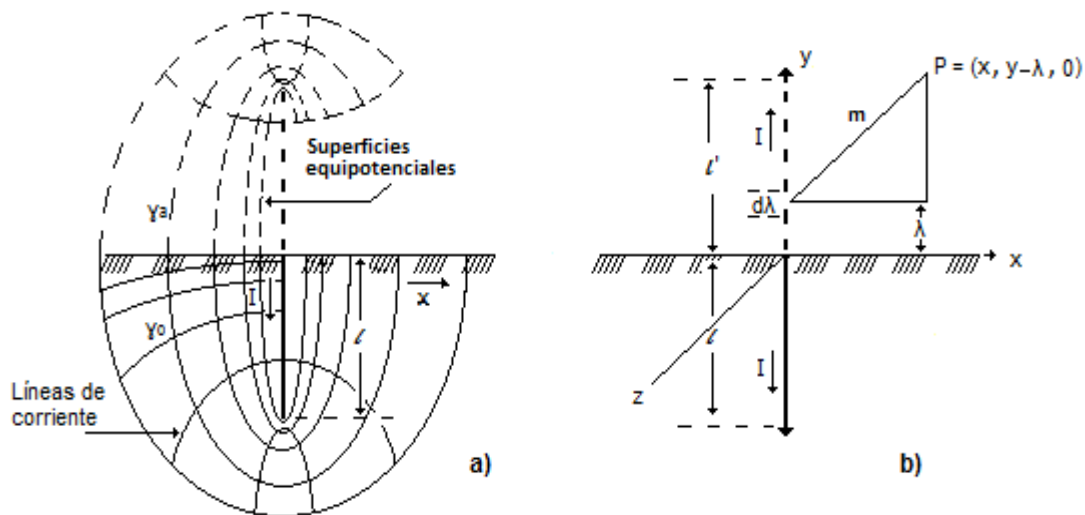
$$dI = \frac{2J}{2l} d\lambda \quad \text{Ec. 3.2}$$

En donde λ es la distancia del segmento parcial a partir de la superficie del suelo.

Por tanto la distancia al punto P es:

$$m = \sqrt{x^2 + (y - \lambda)^2} \quad \text{Ec. 3.3}$$

Figura 30. **Análisis de un electrodo vertical como una carga lineal**



Fuente: DE LA VEGA, Miguel. Problemas de ingeniería de puesta a tierra. P. 243.

De esta manera la contribución del potencial al punto en cuestión del segmento parcial de fuente, expresada como:

$$\varphi_m = \frac{J}{l} \frac{\rho}{4\pi m} \quad \text{Ec. 3.4}$$

Dará la siguiente expresión:

$$d\varphi = \frac{J}{l} d\lambda \left[\frac{\rho}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{x^2 + (y - \lambda)^2}} \right] \quad \text{Ec. 3.5}$$

Por lo tanto, la contribución total de todos los segmentos parciales de la fuente sobre el punto P , resulta:

$$\varphi = J \frac{\rho}{4\pi l} \int_{-l}^{+l} \frac{d\lambda}{\sqrt{x^2 + (y - \lambda)^2}} = J \frac{\rho}{4\pi l} \ln \frac{\sqrt{x^2 + (y + l)^2} + y + l}{\sqrt{x^2 + (y - l)^2} + y - l} \quad \text{Ec. 3.6}$$

Sustituyendo en ella la condición $y = 0$ correspondiente al nivel del suelo, así como a x , por $x = ml$, la ecuación anterior se transforma en:

$$\varphi = J \frac{\rho}{4\pi l} \ln \frac{\sqrt{m^2 + 1} + 1}{\sqrt{m^2 + 1} - 1} \quad \text{Ec. 3.7}$$

En forma simplificada:

$$\varphi = J \frac{\rho}{4\pi l} \ln K \quad \text{Ec. 3.8}$$

En la que el valor $\ln K$, queda en función de la relación $m = x/l$, que son magnitudes físicas de inmediata determinación.

Si el electrodo vertical tiene la forma de un cilindro cuyo diámetro es d , entonces el semieje menor del cilindro que suplanta al elipsoide es igual a $d/2$; así que con base en la ecuación 3.6, el potencial para la mitad del cilindro, es decir para $y = 0$, y $x = d/2$, queda la expresión de la siguiente manera:

$$\varphi = J \frac{\rho}{4\pi l} \ln \frac{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + l^2} + l}{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + l^2} - l} \quad \text{Ec. 3.9}$$

Se considera que un electrodo vertical en forma de cilindro de radio $x = d/2$ es siempre muy pequeño en comparación con su longitud, por lo tanto se realiza la siguiente sustitución:

$$\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + l^2} \approx \frac{d^2}{8l} + l \quad \text{Ec. 3.10}$$

Puesto que $d^2/8l$ es muy pequeño comparado con l , por lo tanto se le puede despreciar en el numerador, llegándose a la siguiente expresión para el potencial del electrodo vertical:

$$\varphi_0 = J \frac{\rho}{4\pi l} \ln \frac{4l}{d} \quad \text{Ec. 3.11}$$

Por lo tanto, la resistencia a la propagación del electrodo gemelo vertical rodeado de un suelo homogéneo con resistividad “ ρ ”, queda expresado de la siguiente manera:

$$R_o = \frac{\varphi_o}{J} = \frac{\rho}{4\pi l} \ln \frac{4l}{d} \quad \text{Ec. 3.12}$$

Al hacer un corte en el eje de simetría (a nivel del suelo), no altera nada en lo referente a la distribución del potencial, ya que la parte reflejada en la parte superior consta de las mismas características y solo es utilizada para simplificar los cálculos.

Al removerse el semiespacio superior, el restante representa al electrodo inmerso en el suelo en análisis. Tal electrodo distribuye solamente la mitad de la corriente llamada de esta manera como J .

La resistencia a la propagación de la corriente en el electrodo de longitud l , será:

$$R_o = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} \quad \text{Ec. 3.13}$$

Donde:

l = longitud del electrodo vertical, en m

d = diámetro del electrodo, en m

Con base en lo anterior se presenta el siguiente ejemplo: calcular la resistencia a la propagación de un electrodo vertical, incrustado en un terreno homogéneo con resistividad = $37,61\Omega$ m, de longitud = 3,05 m, y diámetro 1,6 cm (5/8”), contra de la atmósfera.

Solución:

$$d = 1,6 \text{ cm} * (1 \text{ m}/100 \text{ cm}) = 0,016 \text{ m}$$

$$R_o = 37,61/(2 * 3,1416 * 3,05) [\ln 4 * 3,05/0,016] = 13 \Omega$$

3.3.2. Ecuaciones para estimar la resistencia de una malla de tierra

Para subestaciones eléctricas de alta tensión a nivel de transmisión y de subtransmisión, el valor de la resistencia de la malla, debe ser alrededor de un ohm o menor. Para subestaciones de potencia de media tensión, el valor de la resistencia debe ser entre 1 a 4 ohm. En el caso de subestaciones de distribución de media tensión, el valor de la resistencia debe ser como máximo 5 ohm, según las normas NRF-011-CFE-2004 (Comisión Federal de Electricidad).

La ecuación para calcular la resistividad se aplica según la profundidad de enterramiento:

- Para profundidades de la red menores de 0,25 m

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_T} \quad \text{Ec. 3.14}$$

Donde:

A = área ocupada por la malla de tierra, en m²

L_T = longitud total de los conductores enterrados, en m

- Si la profundidad se encuentra en el rango de 0,25 y 2,50 m, se requiere una corrección por profundidad.

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{20/A}} \right) \right] \quad \text{Ec. 3.15}$$

Donde:

h = profundidad de la malla de tierra, en m

L_T = suma de los conductores longitudinales más los conductores transversales

Considerando la red de tierra con conductores horizontales y electrodos verticales, se utilizan las siguientes ecuaciones para suelos de dos capas:

- Con una capa superior de espesor H, con un cierto valor de resistividad, y una capa inferior de más baja de resistividad. La fórmula de Schwarz es:

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2R_{12}} \quad \text{Ec. 3.16}$$

Donde:

R₁ = resistencia de los conductores de la red de tierra, en Ω

R₂ = resistencia de todos los electrodos verticales, en Ω

R₁₂ = resistencia mutua entre el grupo de conductores, R₁ y el grupo de electrodos verticales R₂, en Ω

Siempre que se encuentren las variables R_1 , R_2 , R_{12} , con las siguientes ecuaciones:

$$R_1 = \frac{\rho_1}{\pi l_1} \left[\ln \left(\frac{2l_1}{h'} \right) + \frac{k_1 l_1}{(A)^{1/2}} - k_2 \right] \quad \text{Ec. 3.17}$$

$$R_2 = \frac{\rho_a}{2n\pi l_2} \left[\ln \left(\frac{8l_2}{d_2} \right) - 1 + \frac{2k_1 l_2}{(A)^{1/2}} ((n)^{1/2} - 1)^2 \right] \quad \text{Ec. 3.18}$$

$$R_{12} = \frac{\rho_a}{\pi l_1} \left[\ln \left(\frac{2l_1}{l_2} \right) + \frac{k_1 l_1}{(A)^{1/2}} - k_2 + 1 \right] \quad \text{Ec. 3.19}$$

Donde:

ρ_1 = resistividad del terreno con los conductores a una profundidad h , en $\Omega \text{ m}$

ρ_a = resistividad aparente del terreno vista por el electrodo vertical, en $\Omega \text{ m}$

H = espesor de la primera capa del terreno, en m

ρ_2 = resistividad del terreno desde la profundidad H , hacia abajo, en $\Omega \text{ m}$

l_1 = longitud total de los conductores de la malla de tierra, en m

l_2 = longitud promedio del electrodo vertical, en m

h = profundidad de la malla de tierra, en m

h' = coeficiente de la profundidad de la malla de tierra $h' = (d_1 h)^{1/2}$

Para conductores enterrados a la profundidad h , en m :

$h' = 0.5d_1$, para conductores enterrados en $h = 0$ (en la superficie), en m

A = área cubierta por la malla de tierra con dimensiones "a x b", en m^2

n = número de electrodos verticales localizadas en el área A

k_1, k_2 = constantes relacionadas con la geometría del sistema de tierra

(ver figura 31 y 32)

d_1 = diámetro del conductor de la malla de tierra, en m

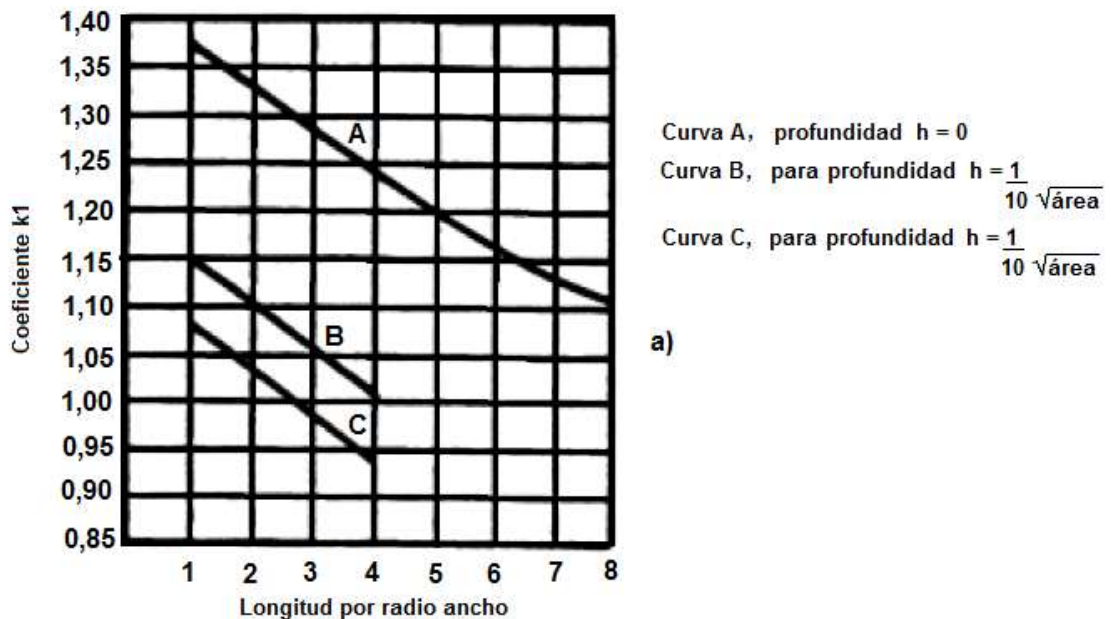
d_2 = diámetro del electrodo vertical (varilla de tierra), en m

a = ancho de la malla de tierra, en m

b = largo del malla de tierra, en m

No existe una ecuación para determinar el número óptimo de electrodos verticales; sin embargo, para que los electrodos tengan una disipación efectiva de corriente, estos pueden instalarse con una separación mínima de dos veces su longitud.

Figura 31. **Coefficiente k_1 de la fórmula de Schwarz**



Fuente: www.ruelsa.com/.../tierras/pea0NRF_011_Sistema_de_Tierra_Plantas...

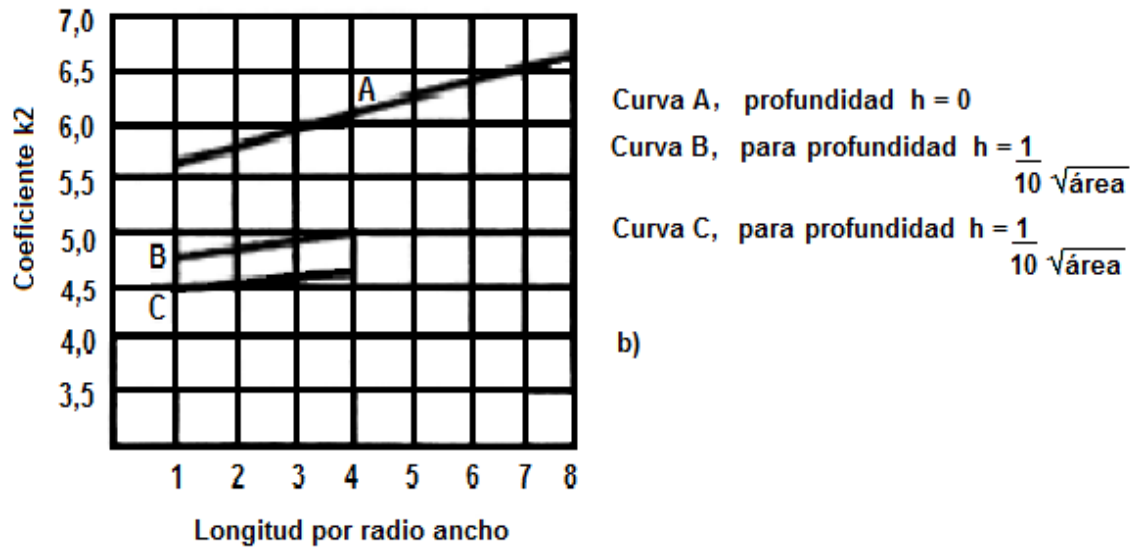
- En el caso para ρ_1/ρ_2 , la malla de tierra se encuentra en la capa de resistividad ρ_1 , pero los electrodos verticales están en contacto tanto con la capa de resistividad ρ_1 , como con la capa de resistividad ρ_2 .

Por lo que R_2 y R_{12} se calculan con una resistividad aparente ρ_a , vista por los electrodos verticales.

$$\rho_a = \frac{l_2 \rho_1 \rho_2}{\rho_2(H - h) + \rho_1(l_2 + h - H)} \quad \text{Ec. 3.20}$$

Para suelos con resistividad uniforme, $\rho_1 = \rho_2$.

Figura 32. **Coefficiente k2 de la fórmula de Schwarz**

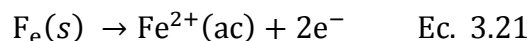


Fuente: www.ruelsa.com/.../tierras/pea0NRF_011_Sistema_de_Tierra_Plantas...

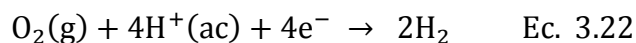
3.4. La corrosión

La corrosión se define como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. Algunos ejemplos de corrosión son: la tonalidad rojiza que se forma en la superficie del hierro, la pátina verde que se forma en el cobre y el latón. Para que el hierro se oxide es necesario que estén presentes el agua y el oxígeno gaseoso. Aunque las reacciones implicadas son bastantes complejas y todavía no se explican completamente, se cree que los pasos principales son los siguientes:

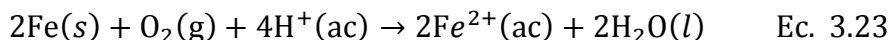
- Una región de la superficie del metal funciona como ánodo, donde ocurre la oxidación:



- Los electrones liberados por el hierro reducen el oxígeno atmosférico a agua en el cátodo, que es otra región de la misma superficie del metal:



- La reacción redox global es:

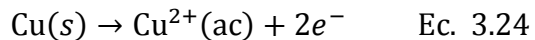


La reacción ocurre en un medio ácido; los iones H^+ son aportados en parte por la reacción del dióxido de carbono atmosférico con el agua, para formar H_2CO_3 . El aluminio tiene una mayor tendencia a oxidarse que el hierro.

En el anexo 7, se puede observar que el aluminio tiene un potencial estándar de oxidación más negativo que el hierro.

Este proceso no es acelerado a causa de la capa insoluble de óxido de aluminio (Al_2O_3) que se forma en la superficie cuando el metal se expone al aire, y que sirve para proteger al aluminio de la corrosión. El óxido que se forma en la superficie del hierro es demasiado poroso para proteger al metal. A la forma hidratada del óxido de hierro (III) se conoce como herrumbre.

El cobre también sufre el proceso de corrosión, pero mucho más lento:



A la presión atmosférica normal, el cobre forma una capa de carbonato de cobre (CuCO_3), una sustancia verde, llamada pátina, que protege al metal de una corrosión posterior.

3.4.1. Tipos de corrosión

La corrosión se clasifica según el medio en que se desarrolla, por ejemplo:

- Corrosión química: se le llama así a todos aquellos casos en los que el metal reacciona con un medio no iónico, por ejemplo, oxidación en aire a alta temperatura.
- Corrosión electroquímica: es aquella que se produce con un transporte simultáneo de electricidad a través de un electrolito. Un ejemplo de esta corrosión se encuentra en soluciones salinas, agua de mar, la corrosión

atmosférica, la corrosión en suelos, etc. En los procesos de corrosión electroquímica circulan corrientes eléctricas sobre el material, que originan el ataque. Las causas más frecuentes son entre dos o más metales distintos en contacto entre sí (corrosión galvánica).

3.4.2. El proceso de corrosión en los metales

La corrosión es provocada por un flujo eléctrico generado por las diferencias químicas entre las piezas implicadas. Una corriente de electrones se establece cuando existe una diferencia de potencial entre un punto y otro.

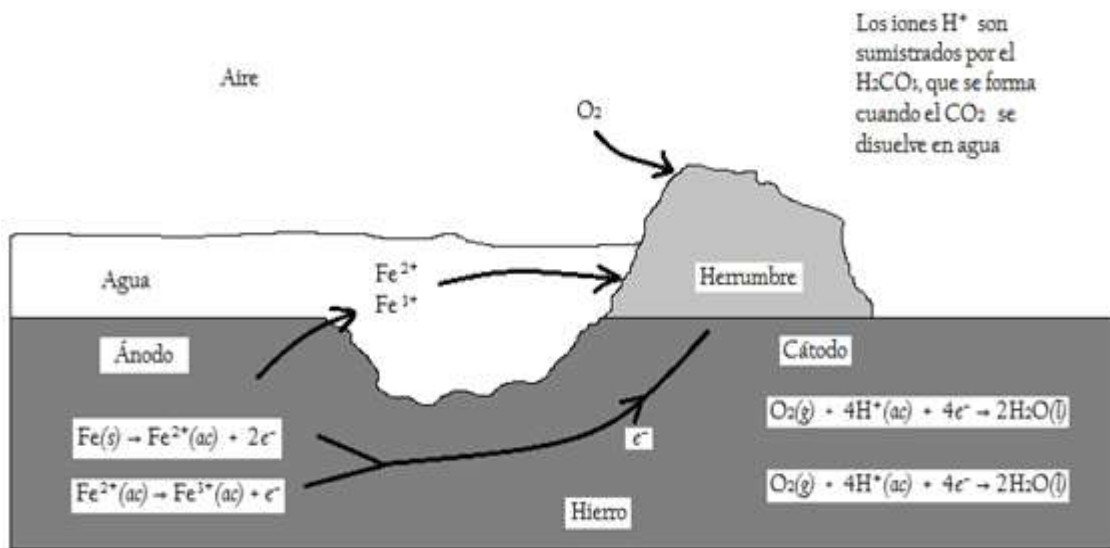
Cuando desde una especie química cede y migran electrones hacia otra especie, se dice que la que los emite se comporta como un ánodo y se verifica la oxidación, aquella que los recibe se comporta como cátodo y en ella se verifica la reducción (ver figura 33).

Para que esto suceda entre las especies, debe existir un diferencial electroquímico. Si se separa una especie y su semireacción, se le denominará semipar electroquímico; si se juntan ambos semipares, se formará un par electroquímico. Cada semipar está asociado a un potencial de reducción. Aquel metal o especie química que exhiba un potencial de reducción más positivo, procederá como una reducción y por el contrario, aquel que exhiba un potencial de reducción más negativo, procederá como una oxidación.

Para que exista corrosión electroquímica, además del ánodo y el cátodo debe haber un electrólito. La transmisión de cargas eléctricas es por electrones del ánodo al cátodo (por medio del metal) y por iones en el electrolito.

Este par de metales constituye la llamada pila galvánica, en donde la especie que se oxida (ánodo) cede sus electrones y la especie que se reduce (cátodo) acepta electrones. Al formarse la pila galvánica, el cátodo se polariza negativamente, mientras el ánodo se polariza positivamente.

Figura 33. **Proceso electroquímico que se da para formar la herrumbre**



Fuente: CHANG, Raymond. Química. P. 801.

3.5. El suelo como agente corrosivo

La velocidad de corrosión está ligada a la resistividad del terreno. La intensidad dependerá de varios factores tales como el contenido de humedad, composición química, pH del suelo, etc. La resistividad de un terreno depende de las dimensiones de sus partículas que las constituyen, de su porosidad, permeabilidad, contenido de humedad y contenido de iones.

La temperatura no ejerce una influencia tan marcada, a menos que supere el punto de congelación, después de lo cual hay un aumento significativo de la resistividad del terreno.

3.5.1. Evaluación de la agresividad de los suelos

En lo referente a la acidez, los suelos muy ácidos ($\text{pH} < 5,5$) pueden motivar una rápida corrosión del metal, y la agresividad del suelo aumenta con el incremento de la acidez (disminución del pH). La mayoría de suelos tienen pH comprendido entre 5,0 y 8,0, en cuyo caso la corrosión depende de otros factores.

En un medio anaerobio, es posible predecir la corrosión midiendo el pH y el potencial redox. Estas medidas permiten establecer las condiciones que favorecen la actividad microbiológica responsable de la corrosión anaerobia.

Tabla VII. **Grado de agresividad del suelo por bacterias sulfato reductoras**

Valor del potencial redox en mV vs. electrodo de hidrógeno	Grado de agresividad potencial (posibilidad de corrosión anaerobia)
< 100	Severa
100 – 200	Moderada
200 – 400	Escasa
> 400	Nula

Fuente: www.bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm. Consulta: 05 de mayo de 2010.

La medida del potencial redox efectuada con electrodo de platino, permite establecer si un terreno está predispuesto al crecimiento de bacterias sulfato reductoras (ver tabla VII).

En la tabla VIII, se muestran unos índices que permiten determinar las características agresivas de un suelo, basándose en el contenido de aniones del mismo tipo, cloruros, sulfatos y sulfuros, pH, potencial redox y resistividad.

Tabla VIII. **Determinación de la agresividad de los suelos**

		Índice
Resistividad, ρ (Ω-cm)	> 12 000	0
	12 000 - 5 000	-1
	5 000 - 2 000	-2
	< 2 000	-4
Potencial redox, E_{redox} (mV vs. en h)	> + 400	+2
	400 - 200	0
	200 - 0	-2
	< 0	-4
pH	> 5	0
	< 5	-1
Cloruros, Cl^- (mg/kg)	< 100	0
	100 - 1000	-1
	> 1000	-4
Sulfatos, SO_4^{2-} (mg/kg)	< 200	0
	200 - 300	-1
	> 300	-2
Sulfuros, S^{2-} (mg/kg)	0	0
	0 - 0,5	-2
	> 0,5	-4
Características del suelo		Suma
No agresivo		0
Débilmente agresivo		-1 a -8
Medianamente agresivo		-8 a -10
Sumamente agresivo		< -10

Fuente: www.bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm. Consulta: 05 de mayo de 2010.

4. MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD Y LA RESISTENCIA

4.1. Factores a considerar al realizar mediciones del suelo

Al realizar mediciones de resistividad en el suelo y de resistencia en la malla de tierra, es necesario tomar en cuenta las condiciones climatológicas. Podría presentarse el caso de que las lecturas ni se aproximen en la estación de verano a las realizadas en invierno. Los electrodos incrustados permanentemente deben ser compactados en su alrededor para un mejor contacto con capas húmedas del suelo.

4.1.1. Instrumento de medición

El telurómetro o terrómetro es el nombre con el cual se conoce al instrumento de medición de resistividad del suelo y de resistencia en una malla de cables o a una varilla enterrada. El instrumento como tal, no muestra en su pantalla el valor de la resistividad de la medición, el valor obtenido es de resistencia (ver figura 34).

La medición se debe realizar en forma instantánea y automática, por lectura directa en una pantalla digital o analógica y se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Para la precisión: el error máximo admisible es del 3 %. Las condiciones ambientales deben estar en un rango de 0 a 50 °C y humedad relativa de 90 %.

- Función de voltímetro: en esta función el equipo debe medir en un rango de 0 a 200 V (corriente alterna).
- La pantalla: debe ser visible aún en condiciones de baja luminosidad y en un amplio ángulo.
- La alimentación: debe ser autónoma y alimentarse con pilas alcalinas.
- El rango de medición: este va de 0,00 hasta 10 000 Ω .
- Antes de realizar la medición de un terreno se aconseja realizar mediciones a resistencias de valores conocidos, que estén en el rango de 0 a 100 Ω .

Figura 34. **Telurómetro marca AEMC, modelo 4610**



Fuente: subestación Guatemala Este, finca San Vicente km 18.5 a Santa Catarina Pínula.

4.2. Medición de la resistividad del suelo

Al diseñar una nueva red de tierra, y especialmente al construir una nueva subestación eléctrica, es necesario realizar mediciones en el terreno, esto con el propósito de establecer el valor promedio que va a utilizarse para la obtención de los demás parámetros, tales como: voltaje de paso, de contacto, necesarios para asegurar la integridad del personal y de los equipos que se van a utilizar.

4.2.1. Métodos de medición de resistividad

La norma IEEE 81–1983, describe una serie de técnicas o métodos de medición de resistividad del suelo, en la cual el método de los cuatro electrodos es el más aplicado. El número de lecturas debe ser mayor donde se presenten fuertes variaciones de valores, tanto verticales como horizontales.

Existen diversos métodos de medición de resistividad, los cuales solo se mencionan como referencia, por enfocarse más en el método de Wenner o de los cuatros puntos.

Los nombres de algunos métodos son:

- Wenner
- Schlumberger–Palmer
- De toma de muestras
- Tetraelectródico no rectilíneo

4.2.1.1. Método de Wenner o de los cuatro puntos

En este método, todos los electrodos están espaciados uniformemente. Se trata de un caso particular del método de los cuatro electrodos, solo que aquí se disponen en línea recta, y equidistantes una distancia "a", simétricamente respecto del punto en el que se desea medir la resistividad del suelo. El equipo de medición es un telurómetro con cuatro terminales; por los dos electrodos extremos se inyecta la corriente de medida "I", y los dos centrales son los electrodos de medida del potencial "P".

La tensión "V" medida entre los dos electrodos más cercanos, se divide por la corriente "I" que circula entre los dos electrodos más lejanos para obtener un valor de resistencia "R" (ver figura 35).

Para obtener el valor de la resistividad, se aplica la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde:

R = resistencia medida por el telurómetro, en Ω

a = distancia entre electrodos, en m

b = profundidad de enterramiento, en m

Si "a" y "b" se miden en cm o en m, y la resistencia en Ω , la resistividad estará dada en Ω cm o en Ω m, respectivamente.

Si la relación a/b es menor a 20, entonces se utilizará la ecuación 4.1, para calcular la resistividad del terreno.

Si la longitud “b” es mucho menor que la longitud “a”, es decir cuando la relación a/b sea mayor o igual a 20, entonces puede suponerse que $b = 0$. Por lo tanto la ecuación 4.1 se reduce a:

$$\rho = 2\pi aR \quad \text{Ec. 4.2}$$

Con estas fórmulas se obtiene la resistividad promedio del terreno, también conocida como resistividad aparente.

Una desventaja del método de Wenner es el decremento rápido en la magnitud de la tensión entre los dos electrodos interiores, cuando su espaciamiento se incrementa a valores muy grandes.

Las lecturas obtenidas en campo pueden graficarse en función de su espaciamiento, indicando en dónde existen capas de diferente tipo de suelo con sus resistividades y profundidades respectivas.

Lo anterior puede ejemplificarse con lo siguiente: Si en una medición, la resistencia que mide el telurómetro es $R = 0,43 \Omega$, la distancia entre electrodos es $a = 4 \text{ m}$, y los electrodos se entierran $b = 0,20 \text{ m}$. ¿Cuál es el valor de la resistividad del suelo?

Solución: al determinar la relación a/b , el valor es:

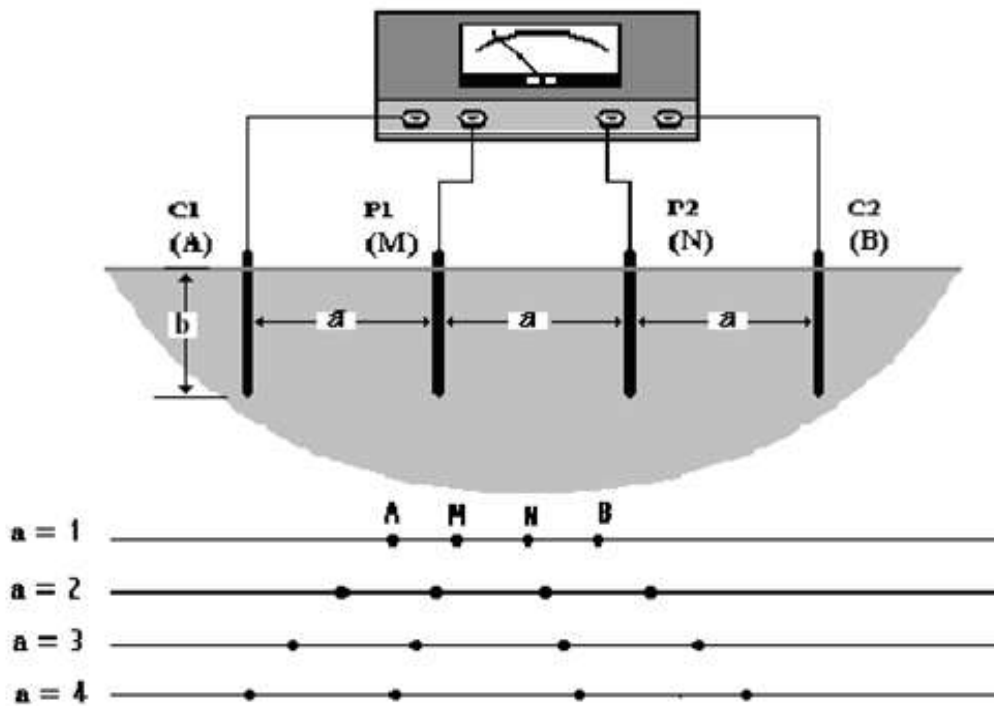
$$4 \text{ m} / 0,20 \text{ m} = 20$$

Por lo tanto, se justifica que “b” es próximo a cero en comparación con “a”. Utilizando de esta manera la ecuación 4.2, dando el siguiente resultado:

$$\rho = 2 * 3,1416 * 4 * 0,43 = 10,81 \Omega m$$

Si los valores a utilizar fueran, $a = 3,50$ m, y $b = 0,20$ m, la relación sería $a/b = 17,50$ la que es menor a 20, en este caso se tendría que utilizar la ecuación 4.1, y el valor de resistividad sería en este caso $\rho = 9,50 \Omega m$.

Figura 35. **Medición por el método de Wenner**



Fuente: CASAS, Favio. Tierras soporte de la seguridad eléctrica. P. 209.

4.2.1.2. Método de Schlumberger-Palmer

Este método también utiliza cuatro electrodos, con la diferencia que estos no se instalan a igual espaciamiento. Se utiliza para medir la resistividad con espaciamientos muy grandes entre los electrodos de corriente.

La corriente tiende a fluir cerca de la superficie para pequeños espaciamientos entre los electrodos. Así se asume que la resistividad medida para un espaciamiento entre electrodos “a” representa la resistividad aparente del suelo a una profundidad “b”.

La información de las mediciones puede incluir datos de temperatura e información sobre las condiciones de humedad del suelo en el tiempo en que se realizó la medición.

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

La fórmula empleada en este caso se puede determinar de esta manera: si la profundidad de los electrodos es pequeña comparada, con la separación “d” y “c”, entonces la resistividad aparente puede calcularse como:

$$\rho = \frac{\pi c(c + d)R}{d} \quad \text{Ec. 4.3}$$

Donde:

c = distancia entre un electrodo de potencial y uno de corriente, en m

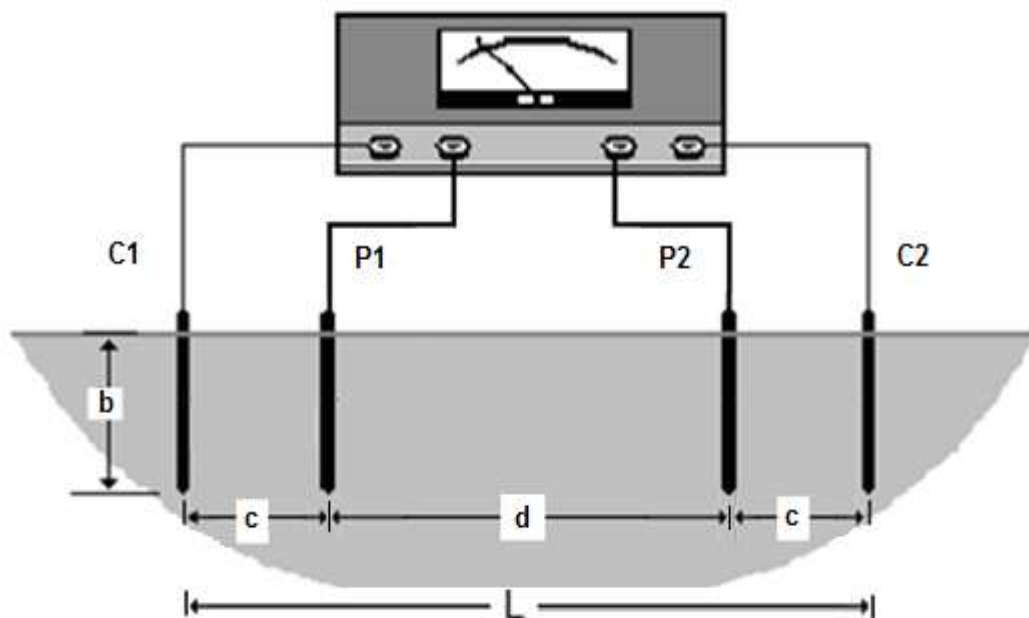
d = distancia entre los electrodos de potencial, en m

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

Los objetos conductivos en contacto con el suelo pueden invalidar las lecturas si están lo suficientemente cerca, alterando el flujo de corriente del equipo de prueba. Un ejemplo puede ser la tubería metálica de agua.

El color del suelo y la humedad no es referente para determinar la resistividad del mismo.

Figura 36. **Medición por el método de Schlumberger-Palmer**



Fuente: elaboración propia con base a "NRF-011-2004", Comisión Federal de Electricidad.

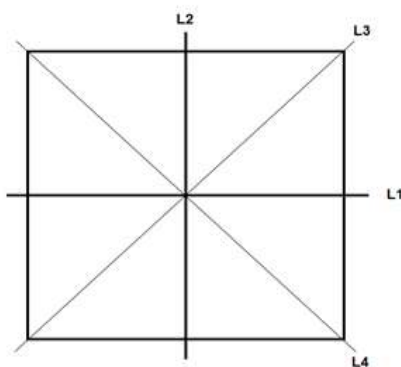
4.2.1.3. Procedimiento de medición en campo

Al iniciar se debe dividir el terreno en estudio, en cuadros de 10 x 10 m; cada cuadro va a formar una sección; se deben numerar en un plano las secciones que resulten (ver figura 37).

Seleccionar aleatoriamente las secciones en donde se van a realizar las mediciones, de preferencia realizar las mediciones en los cuadros de la periferia del terreno. Es necesario trazar diagonales en los cuadros donde se tomarán las muestras, seleccionar una diagonal, y sobre esta se realizar las mediciones.

Partiendo del centro de la diagonal y a lo largo de la misma, colocar los cuatro electrodos de prueba a una profundidad mínima de 0.20 m, formando una línea recta entre ellas, procediendo a variar la separación de los electrodos a 0,50, 1, 2, 3 metros como mínimo. Compactar la tierra alrededor del electrodo de prueba. Trazar las gráficas de resistividad contra la separación para cada sección.

Figura 37. **Una sección del terreno con trazo diagonal**



Fuente: elaboración propia con base a “NRF-011-2004”, Comisión Federal de Electricidad.

4.3. Medición de la resistividad en las cercanías de la subestación Guatemala Este, como elemento de comparación

Para realizar el cálculo del sistema de puesta a tierra en un terreno, es necesario determinar el valor de su resistividad, y de las condiciones climatológicas. Según un informe del INSIVUMEH, en la meseta y altiplanos (Huehuetenango, el Quiché, San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán, Sololá, Chimaltenango y Guatemala) las lluvias no son tan intensas, los registros más altos se obtienen de mayo a octubre, en los meses restantes estas pueden ser deficitarias; en cuanto a la temperatura en diversos puntos de esta región se registran los valores más bajos del país.

Las mediciones de resistividad se realizan dentro de la subestación en un área donde no se localizan equipos de alta tensión ni equipo electrónico.

La temperatura del suelo medida a 0,15 metros de profundidad de la superficie, es de 35 °C, y a una temperatura ambiente de 25 °C. Los electrodos del instrumento son de 0,40 metros de longitud, y para mayores profundidades se deben incrustar electrodos permanentes.

El telurómetro solo muestra valores de resistencias por lo que para obtener las resistividades es necesario aplicar la ecuación 4.1 o la 4.2, siempre y cuando se justifique que la relación a/b sea mayor a 20.

En las anteriores no se cambiaron las separaciones es decir; $a = 3,50$ m, y $b = 0,15$ m, por lo tanto la relación siempre es de 23,33.

Tabla IX. **Lecturas en cercanías de la subestación Guatemala Este**

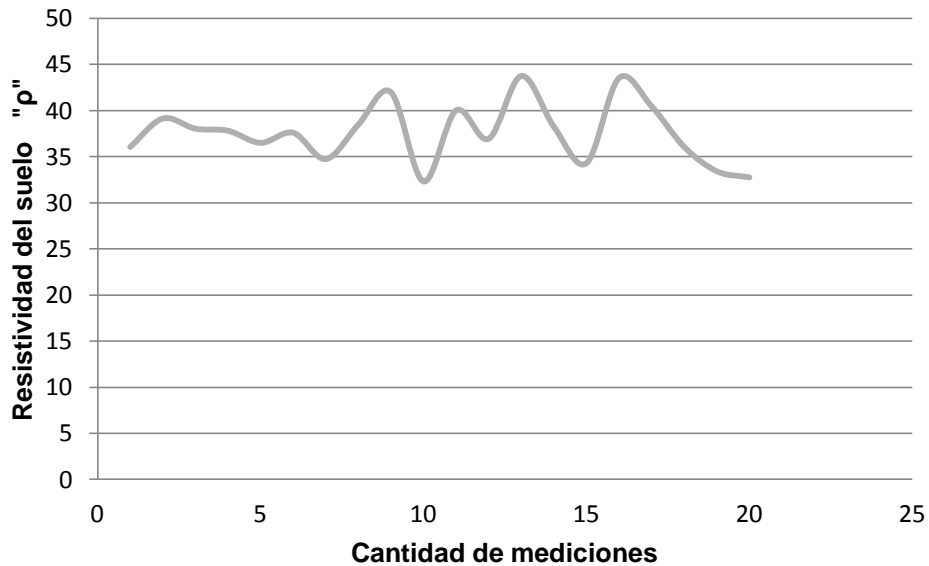
Medición	Separación de "a", en m	Profundidad de "b", en m	Relación a/b	Resistencia, Ω	Resistividad, Ω m
1	3,50	0,15	23,33	1,64	36,06
2	3,50	0,15	23,33	1,78	39,14
3	3,50	0,15	23,33	1,73	38,04
4	3,50	0,15	23,33	1,72	37,82
5	3,50	0,15	23,33	1,66	36,50
6	3,50	0,15	23,33	1,71	37,60
7	3,50	0,15	23,33	1,58	34,74
8	3,50	0,15	23,33	1,75	38,48
9	3,50	0,15	23,33	1,91	42,00
10	3,50	0,15	23,33	1,47	32,32
11	3,50	0,15	23,33	1,82	40,02
12	3,50	0,15	23,33	1,68	36,94
13	3,50	0,15	23,33	1,99	43,76
14	3,50	0,15	23,33	1,74	38,26
15	3,50	0,15	23,33	1,56	34,30
16	3,50	0,15	23,33	1,98	43,54
17	3,50	0,15	23,33	1,84	40,46
18	3,50	0,15	23,33	1,64	36,06
19	3,50	0,15	23,33	1,52	33,42
20	3,50	0,15	23,33	1,49	32,76

Fuente: subestación Guatemala Este, finca San Vicente km 18,5 a Santa Catarina Pínula.

En la siguiente gráfica podrá visualizarse que los valores de resistividades se encuentran cercanos entre 35 y 40 Ω m, por lo tanto el valor promedio es de 37,61 Ω m.

Si la distancia entre los electrodos "a" permanece constante, y se varía la profundidad "b", se determina la tendencia de la resistividad del suelo a mayor profundidad, tomando en cuenta que la longitud del electrodo del instrumento de medición es de 0,40 m.

Figura 38. **Gráfica de la resistividad en la subestación Guatemala Este**



Fuente: subestación Guatemala Este, finca San Vicente km 18,5 a Santa Catarina Pínula.

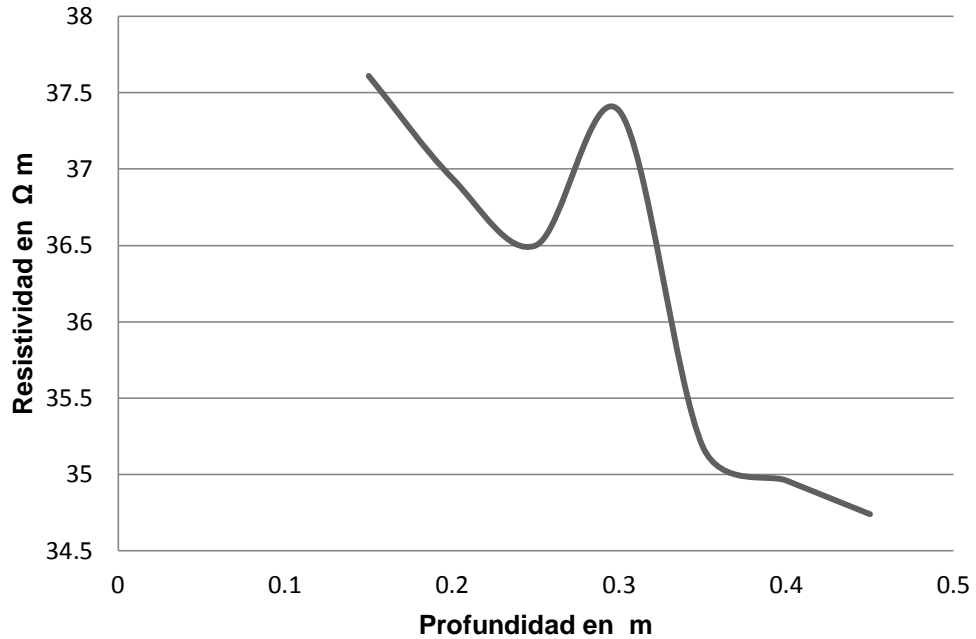
Tabla X. **Medición del terreno a diferentes profundidades**

Medición	Separación de "a", en m	Profundidad de "b", en m	Resistencia Ω	Resistividad Ωm
1	3,50	0,15	1,71	37,61
2	3,50	0,20	1,68	36,94
3	3,50	0,25	1,66	36,50
4	3,50	0,30	1,70	37,38
5	3,50	0,35	1,60	35,18
6	3,50	0,40	1,59	34,96
7	3,50	0,45	1,58	34,74

Fuente: subestación Guatemala Este, finca San Vicente km 18,5 a Santa Catarina Pínula.

De la tabla X, se desprende la siguiente gráfica de la tendencia de la resistividad del terreno.

Figura 39. **Gráfica de la tendencia, resistividad vs profundidad**



Fuente: subestación Guatemala Este, finca San Vicente km 18,5 a Santa Catarina Pínula.

4.4. La resistencia de la torre de una línea de transmisión

La medición de la resistencia de puesta a tierra de una torre de líneas de transmisión que forma parte de la subestación es compleja y produce errores si se mide con métodos tradicionales, dado que todas ellas están eléctricamente unidas a través del cable de guarda a otras estructuras.

Una forma de tener una lectura válida es utilizando un telurómetro de 25 kHz, teniendo como ventaja que no se necesita desconectar el cable de guarda y la torre puede estar en servicio.

A la frecuencia empleada de 25 kHz, la reactancia inductiva del cable de guarda en un vano (distancia entre estructuras de alta tensión) de extensión normal, es razonablemente alta y permite minimizar el efecto de las puestas a tierra de las estructuras adyacentes a la que se está midiendo.

Típicamente, la inductancia del cable de guarda es del orden de $1,8 \mu\text{H}/\text{m}$, es decir, más de $300 \mu\text{H}$ y considerando un vano normal. Ello representa a 25 kHz, una reactancia inductiva de más de 100Ω .

Este valor es cinco veces superior al que se exige para una puesta a tierra de línea de transmisión, permitiendo con ello asumir que para esa frecuencia el cable de guarda se aproxima a un circuito abierto, tal como si se hubiera desconectado el conductor.

Figura 40. **Conexión en cada pata y panorámica total de la torre**



Fuente: subestación Guatemala Este, finca San Vicente km 18,5 a Santa Catarina Pinula.

Para una torre de la subestación Guatemala Este de 230 kV las dimensiones en su base son de ocho metros por lado, donde rematan las líneas aéreas de entrada; compuestas por dos conductores por fase.

Ecuación para el cálculo de la resistencia de una torre:

$$B = \sqrt{A'/\pi} \quad (m) \quad \text{Ec. 4.4}$$

Donde:

B = radio equivalente en la base de la torre, en m

A' = área en la base de la torre, en m²

Por lo tanto, la resistencia aproximada de una torre es:

$$R_{torre} = \rho/2\pi B \quad \text{Ec. 4.5}$$

4.5. Métodos de medición de la resistencia para la malla de tierra

Otro factor que se debe tomar en cuenta en el diseño de una puesta a tierra, es la resistencia de la malla después de haberse instalado. El propósito fundamental es verificar la efectividad o detectar cambios como parte de una rutina de mantenimiento. Algunos métodos se describen a continuación:

- De la caída de potencial
- De la pendiente
- De la intersección de curvas

Tabla XI. **Valores de resistencias en torres de transmisión**

Frecuencia Hz	Método	Características	Distancia del electrodo de corriente, en m	Resistencia Ω
25 000	Caída de potencial	Con cable de guarda	100	27,00
1470	Caída de potencial	Con cable de guarda	100	11,39
111	Caída de potencial	Con cable de guarda	100	9,93
111	Caída de potencial	Sin cable de guarda	100	34,50
111	Caída de potencial	Sin cable de guarda	150	32,60

Fuente: CASAS, Favio. Tierras soporte de la seguridad eléctrica. P. 221.

4.5.1. Método de la caída de potencial

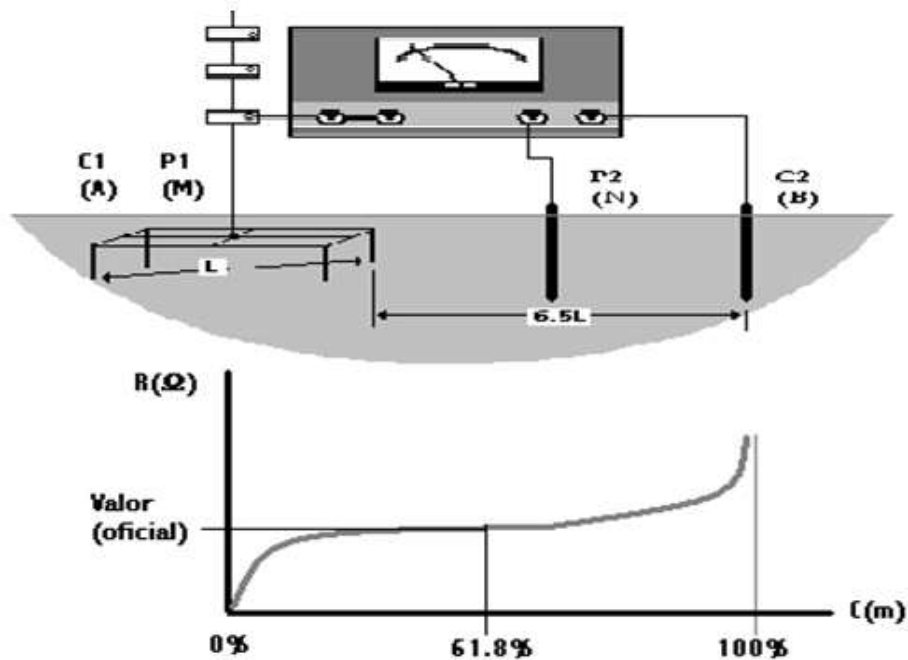
Este método también es llamado de los tres puntos y es aplicable a todo tipo de sistema de tierra. Consiste en hacer circular una corriente eléctrica a través de la malla en estudio y un electrodo de potencial es utilizado como referencia en la medición. Además del electrodo de potencial, el circuito está constituido por un electrodo de corriente cuya finalidad es cerrar el circuito y permite la circulación de la corriente de prueba.

La ubicación del electrodo de corriente estará en función de las dimensiones del sistema, de forma tal que se considere en el infinito.

Si en una investigación de campo se incrusta el electrodo de corriente a una cierta distancia, de manera que se esté fuera de la zona de influencia de la malla de valor desconocido, seguidamente se toman las lecturas de resistencia de dicho montaje, al variar la distancia del electrodo de tensión, se observará que existe una zona plana de potencial equivalente a un valor constante de resistencia. Este valor constante es el verdadero de la resistencia del sistema.

Si los resultados no estuvieran dentro del error previsto, se debe distanciar el electrodo de corriente mucho más, y significa que no se está en la zona plana de potencial (ver figura 41).

Figura 41. Representación del método de la curva de caída de potencial



Fuente: CASAS, Favio. Tierras soporte de la seguridad eléctrica. P. 213.

4.5.2. Método de la pendiente

Este método se utiliza para medir grandes sistemas de puesta a tierra; es más sencillo, pues basta realizar las mediciones como se muestran en la figura 42; proporciona significativos resultados y no es muy vulnerable en suelos no homogéneos.

Procedimiento de medición y cálculo:

- Medir R con P₂ al 20%, 40% y 60% de C
- Tomar R₁ con P₂ al 20% de C
- Tomar R₂ con P₂ al 40% de C
- Tomar R₃ con P₂ al 60% de C
- Calcular:

$$\mu = (R_{\varepsilon} - R_2)/(R_2 - R_1) \quad \text{Ec. 4.6}$$

- Obtener *k* del anexo 6, para el valor calculado de μ
- Calcular:

$$P_T = kC \text{ (m)} \quad \text{Ec. 4.7}$$

- Incrustar el electrodo de potencial P₂ en P_T
- Medir con esta nueva disposición o entrar a la curva de R vs P₂

Tomar otro valor de C, si se desea verificar el valor de la resistencia.

4.5.3. Método de la intersección de curvas

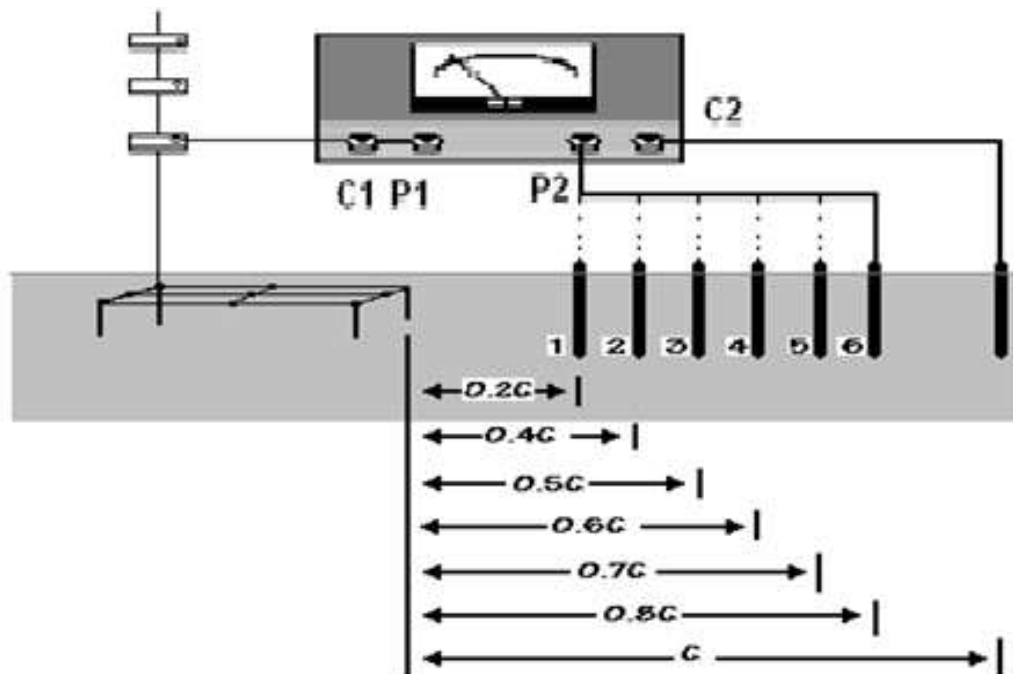
Este método consiste en obtener varias curvas de resistencia de dispersión y diferentes posiciones del centro eléctrico; por medio de un procedimiento sencillo se obtiene la verdadera resistencia de puesta a tierra.

Resuelve diversos problemas, por un lado ya no exige ubicar el electrodo de corriente a distancias considerables y elimina dudas sobre las influencias mutuas entre electrodos (ver figura 43).

Para medir la resistencia de la malla de una subestación de 230 kV, se debe realizar de la siguiente manera:

- Seleccionar una distancia “C” para el electrodo de corriente y tomar una serie de medidas de resistencia X_i ; entre 0 y el 90% de “C”.
- Seleccionar otra distancia “C” en la misma dirección y repetir el procedimiento.

Figura 42. Representación del método de la pendiente



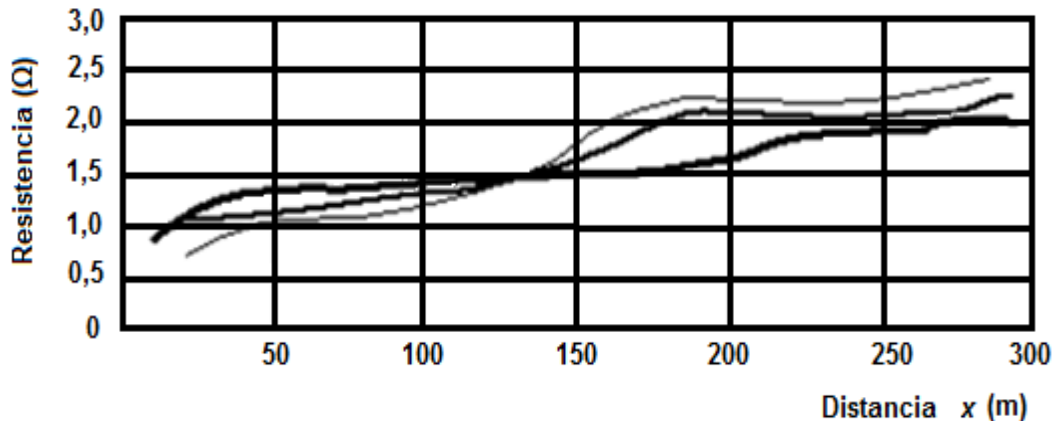
Fuente: CASAS, Favio. Tierras soporte de la seguridad eléctrica. P. 215.

Para cada X_i , calcular la posición del electrodo de potencial con la siguiente ecuación:

$$P_i = 0,62(C + X_i) - X_i \quad \text{Ec. 4.8}$$

Para cada P_i , tomar el valor de resistencia R_i , graficar R_i vs X_i .

Figura 43. **Gráfica de intersección de curvas**



Fuente: CASAS, Favio. Tierras soporte de la seguridad eléctrica. P. 217.

4.6. Nociones de corriente de cortocircuito

Sí en un circuito eléctrico energizado y que trabaja normalmente, ocurre inesperadamente que el valor de la resistencia eléctrica disminuye de forma anormal, a un valor próximo a cero en algún punto de la instalación, la corriente eléctrica se eleva bruscamente y alcanza grandes valores que causan daños al sistema eléctrico, esto si no se interrumpe rápidamente la fuente de energía de la cual esta se alimenta.

El cortocircuito en una instalación eléctrica es provocado generalmente:

- Entre una fase y tierra
- Entre fases
- Entre fases y tierra

Las causas de cortocircuito probables se pueden agrupar en:

- Descargas atmosféricas
- Condiciones del ambiente (vientos, sismos, lluvias, etc.)
- Fallas en la operación de los sistemas eléctricos por sobretensiones
- Fallas accidentales (provocadas por vandalismo, o deterioro del equipo)

4.6.1. Fuentes generadoras de corrientes de cortocircuito

Una fuente generadora se le conoce como aquella donde se genera energía eléctrica, la capacidad de la fuente que alimente a un usuario determinará la corriente de cortocircuito, al producirse una falla.

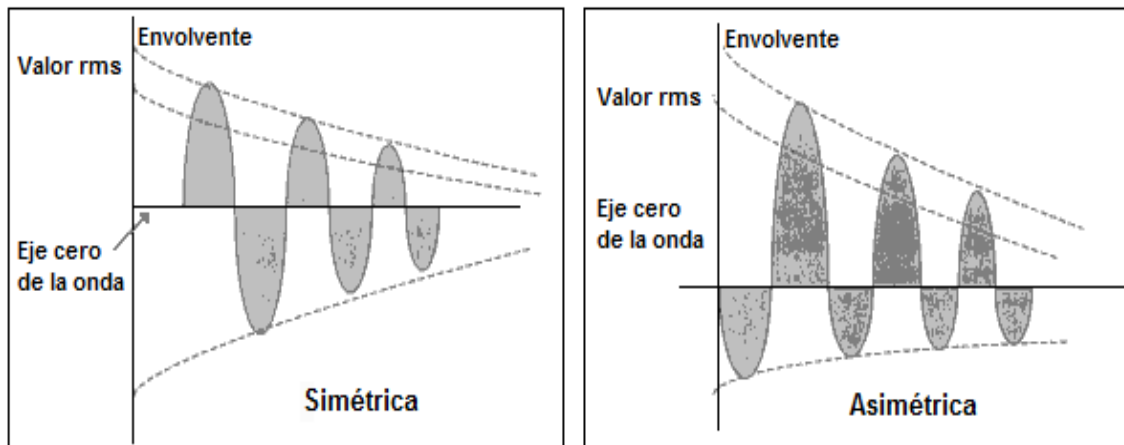
Las fuentes generadoras de cortocircuito más conocidas son:

- Las compañías suministradoras del servicio eléctrico
- Los generadores propios en las plantas industriales

Se considera que la generación de corriente de cortocircuito de los motores, ya sea síncronos o de inducción, es cuatro veces la magnitud de su corriente a plena carga, además dicha corriente es simétrica.

Aunque existe una componente de corriente continua que se presenta en los primeros ciclos del cortocircuito, provocando un efecto en la onda y tornándola asimétrica.

Figura 44. **Corriente de cortocircuito**



Fuente: SAUCEDO, Roberto. Introducción a las instalaciones eléctricas. P. 76.

Para calcular la corriente nominal secundaria del transformador se emplea la siguiente ecuación:

$$I_{st} = S/\sqrt{3}V \quad (A) \quad \text{Ec. 4.9}$$

Donde:

S = potencia del transformador, en *kVA*

V = voltaje entre fase y fase, en *V*

Con la siguiente ecuación se puede calcular la corriente de cortocircuito simétrica:

$$I_{cc} = 100 I_{st} / \%Z_T \quad (A) \quad \text{Ec. 4.10}$$

Donde:

I_{st} = corriente de carga total del secundario del transformador, en A

$\% Z_T$ = porcentaje de impedancia del transformador

A continuación se presenta un ejemplo: en la subestación eléctrica Guatemala Este, se destacan los siguientes valores de una placa de un transformador; voltaje nominal de 230/69 kV, potencia de 195 MVA en la red trifásica (65 MVA, monofásica) y porcentaje de impedancia de 11,91. ¿Encontrar la corriente simétrica de cortocircuito del sistema?

Solución: la corriente de cortocircuito en el transformador del lado secundario es:

$$I_{st} = 195\,000 / \sqrt{3} * 69 = 1634 \text{ A}$$

Con el anterior valor, se determina la corriente de cortocircuito simétrica:

$$I_{cc} = 100 * 1634 / 11,91 = 13\,719 \text{ A} = 13,7 \text{ kA}$$

Los transformadores no constituyen fuentes de corriente de cortocircuito; estos solo cambian las magnitudes de voltaje y corriente; no los generan.

4.6.2. El transformador como limitador de la corriente de cortocircuito

La oposición a la corriente está limitada por las impedancias de los transformadores, reactores, cables, barras conductoras, fusibles, disyuntores u otras impedancias del circuito. Debido a su reactancia, los transformadores reducen la magnitud de las corrientes de cortocircuito producidas por las fuentes a las cuales están conectados.

La corriente de cortocircuito que se proporciona mediante un transformador, depende de la relación de voltaje nominal de su secundario y de su porcentaje de reactancia. También depende de la reactancia de los generadores y del sistema hasta las terminales del transformador, así como de las reactancias que tiene el circuito entre el transformador y la falla.

El porcentaje de reactancia de un transformador es el porcentaje del voltaje nominal aplicado al primario, para producir la corriente nominal total de carga en el secundario con cortocircuito.

El porcentaje de reactancia es una medida porcentual de voltaje, no una impedancia.

4.6.3. La relación x/R

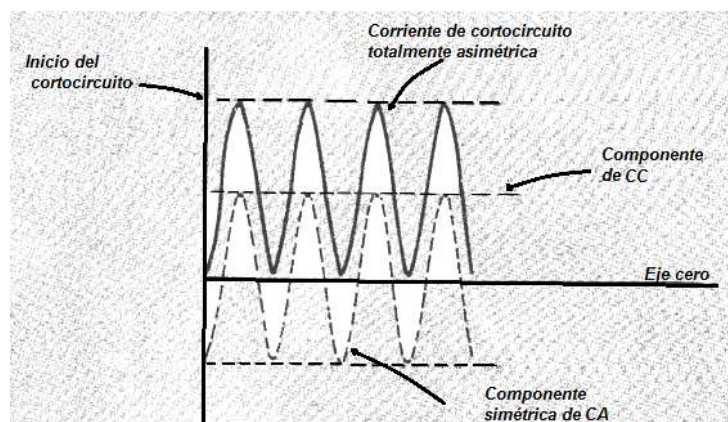
El valor del factor x/R , establece la relación entre la corriente simétrica y asimétrica de cortocircuito, donde “x” corresponde a la reactancia y “R” a la resistencia de todos los componentes del circuito entre la fuente y la falla.

La relación entre la reactancia y la resistencia del circuito, es la responsable del tiempo en la cual se disminuye a cero el valor de la componente de corriente continua del cortocircuito como se muestra:

- Si $R = 0$, la relación es infinita y la componente de corriente continua nunca disminuye.
- Si $x = 0$, la relación es cero y la componente de corriente continua disminuye instantáneamente.
- En el caso de relaciones intermedias, la componente de corriente continua disminuye con el transcurso del tiempo a cero.

La suma de una corriente alterna simétrica y una componente de corriente continua superpuesta da como resultado una corriente asimétrica de cortocircuito (ver figura 45).

Figura 45. **Corriente asimétrica de cortocircuito**



Fuente: LAZAR, Irwin. Análisis y diseño de sistemas eléctricos para plantas industriales. P. 6.

4.6.4. Factor de decremento

Para la determinación de la corriente máxima de falla a tierra, se utiliza un factor llamado de decremento, el cual considera el efecto de desplazamiento de la componente de corriente directa, y la atenuación de las componentes transitorias alterna y directa de la máxima corriente de falla. Esta proporciona la magnitud del valor efectivo de una corriente senoidal equivalente a la onda de falla asimétrica.

En la tabla XII se presentan los factores de decremento, utilizados en diseño de subestaciones eléctricas y que están relacionadas con x/R .

4.6.5. Fundamentos de corriente de cortocircuito para el diseño de una puesta a tierra

Al diseñar una subestación eléctrica se debe considerar el tiempo en que se puede liberar una falla y el crecimiento posible de esta subestación.

Estos valores se multiplican con la corriente de cortocircuito para formar la ecuación de la corriente de diseño de puesta a tierra:

$$I'' = I_{cc} D_f f_c \quad (kA) \quad \text{Ec. 4.11}$$

Donde:

I_{cc} = corriente de cortocircuito, en kA

D_f = factor de decremento

f_c = factor de crecimiento de la instalación

La corriente de cortocircuito de diseño se utiliza para calcular el conductor que más se adecua para la formación de la malla de cobre. Por norma, para subestaciones eléctricas, el diámetro mínimo recomendado es el 4/0 AWG.

Tabla XII. **Valores típicos de factores de decremento**

Duración de falla (tf)		Factor de decremento (Df)			
Segundos	Ciclos a 60 Hz	x/R = 10	x/R = 20	x/R = 30	x/R = 40
0,00833	0,5	1,576	1,648	1,675	1,688
0,05	3	1,232	1,378	1,462	1,515
0,10	6	1,125	1,232	1,316	1,378
0,20	12	1,064	1,125	1,181	1,232
0,30	18	1,043	1,085	1,125	1,163
0,40	24	1,033	1,064	1,095	1,125
0,50	30	1,026	1,052	1,077	1,101
0,75	45	1,018	1,035	1,052	1,068
1,00	60	1,013	1,026	1,039	1,052

Fuente: NRF-011-CFE-2004. Sistema de tierra para plantas y subestaciones eléctricas. P. 18.

4.7. **Cálculo de la elevación del potencial a tierra, EPT**

La elevación del potencial a tierra instalada en una subestación se puede alcanzar con relación a un punto de tierra distante, asumiendo que esté al potencial de la tierra remota. Este potencial es igual a la corriente de diseño multiplicada por la resistencia de la malla de tierra.

Si el valor de la máxima elevación del potencial de tierra en el diseño preliminar se encuentra abajo de la tensión de contacto tolerable por un cuerpo humano, la red de tierra es adecuada y por lo tanto, únicamente es necesario conductores adicionales para la conexión a los equipos o electrodos verticales.

El valor de la elevación del potencial se representa matemáticamente con la siguiente ecuación:

$$EPT = I'' R_g \quad (V) \quad \text{Ec. 4.12}$$

Donde:

I'' = corriente de cortocircuito de diseño, en kA

R_g = resistencia de la malla de tierra, en Ω

Este valor no debe exceder el máximo voltaje de contacto tolerable. Además, el máximo valor de la elevación del potencial a tierra no debe ser mayor a 5000 V.

Tabla XIII. **Corriente de cortocircuito, subestación Guatemala Este**

Tensión en kV	Sistema	Corriente de cortocircuito en kA
Voltaje: 230	1 \emptyset	11,20
	3 \emptyset	11,10
Voltaje: 69	1 \emptyset	13,50
	3 \emptyset	10,40

Fuente: Departamento de subestaciones eléctricas, Guatemala Sur, INDE.

5. LA SUBESTACIÓN GUATEMALA ESTE

5.1. La función de una subestación eléctrica

Una subestación eléctrica es un conjunto de elementos o dispositivos que permiten cambiar las características de la energía eléctrica (voltaje, corriente, etc.), cambiando esta de corriente alterna a corriente continua, o bien, mantenerla dentro de valores adecuados de operación.

Las subestaciones se clasifican de acuerdo con el tipo de función que cumplen:

- Variadora de tensión
- De maniobra o seccionadora de circuito
- Mixta (mezcla de las dos anteriores)

5.1.1. Configuración en doble juego de barras

A esta configuración también se le conoce con el nombre de barra partida, y es de las más utilizadas.

La configuración tiene como característica que la mitad de las líneas y transformadores se conectan a un juego de barras y la otra mitad al otro juego.

El arreglo de doble barra tiene las siguientes ventajas:

- Es más barato que la configuración interruptor y medio, es decir que se necesita de menos equipo para que pueda entrar en operación.
- La subestación en condiciones normales, se opera con el interruptor de amarre y sus dos juegos de cuchillas en posición de cerrado, de tal manera que en caso de una falla en uno de los juegos de barras, el otro sigue operando.
- La subestación trabaja a media capacidad en lo que se realizan las maniobras necesarias, para librar las cuchillas de todos los circuitos de las barras dañadas.

Las desventajas del arreglo de doble barra son:

- Desde el punto de vista de la continuidad, por cada interruptor que necesite revisión, se tiene que desconectar el transformador o línea correspondiente.
- Para dar mantenimiento a cada interruptor, se necesita desconectar el circuito correspondiente.

5.2. La subestación eléctrica Guatemala Este

La subestación eléctrica Guatemala Este fue construida inicialmente por el Instituto Nacional de Electrificación, INDE; la fecha de inauguración fue el trece de septiembre de 1986.

Esta subestación fue construida durante el gobierno del Presidente Marco Vinicio Cerezo Arévalo, y su función es la de interconexión Guatemala-El Salvador (ver figura 46).

Creada con la finalidad de cerrar y abrir las interconexiones a otras líneas de transmisión en voltaje de 230 kV. Seguidamente, fue construida una segunda parte por la Empresa Eléctrica de Guatemala S.A. en el año de 1996-1997, la cual es utilizada para distribución, en voltaje de 230/69 kV, con transformadores reductores y capacidad de potencia 195 MVA.

Figura 46. **Oficina de monitoreo de la subestación Guatemala Este**



Fuente: subestación Guatemala Este, finca San Vicente km 18.5 a Santa Catarina Pinula.

El montaje del equipo para voltaje de 230 kV, es en perfil bajo, es decir que sus dispositivos, tales como pararrayos, seccionadores tipo pantógrafo, seccionadores de puesta a tierra, interruptores, transformares de potencial y transformadores de corriente, se encuentran en el suelo; esto por medio de sus respectivas bases. Mientras en voltaje de 69 kV, el equipo se encuentra instalado en perfil alto, y sus dispositivos están sobre la estructura de acero. Solamente el interruptor de potencia es de tipo tanque muerto y, por lo tanto, se encuentra instalado en la superficie del suelo.

Cuenta con cuatro transformadores de capacidad de 65 MVA, espaciados uno a la par del otro. Tres de los transformadores se encuentran en operación para la distribución trifásica, mientras que el cuarto transformador es de reserva, es decir cuando uno de los anteriores sale de operación, por mantenimiento o reparación entra a trabajar este (ver figura 47).

5.2.1. Diagrama unifilar de la subestación Guatemala Este

El diagrama unifilar de una subestación eléctrica es el resultado de conectar en forma simbólica, y a través de un solo hilo, todo el equipo mayor que forma parte de la instalación, considerando la secuencia de operación de cada uno de los circuitos.

El diseño de una instalación eléctrica tiene su origen en el diagrama unifilar correspondiente, que es el resultado del estudio de las necesidades de carga de la zona en el presente y con proyección a un futuro o mediano plazo. También representa una manera de visualizar con relativa facilidad la configuración de una subestación, y la conexión de sus campos (ver figura 48).

Figura 47. **Transformadores de potencia, subestación Guatemala Este**

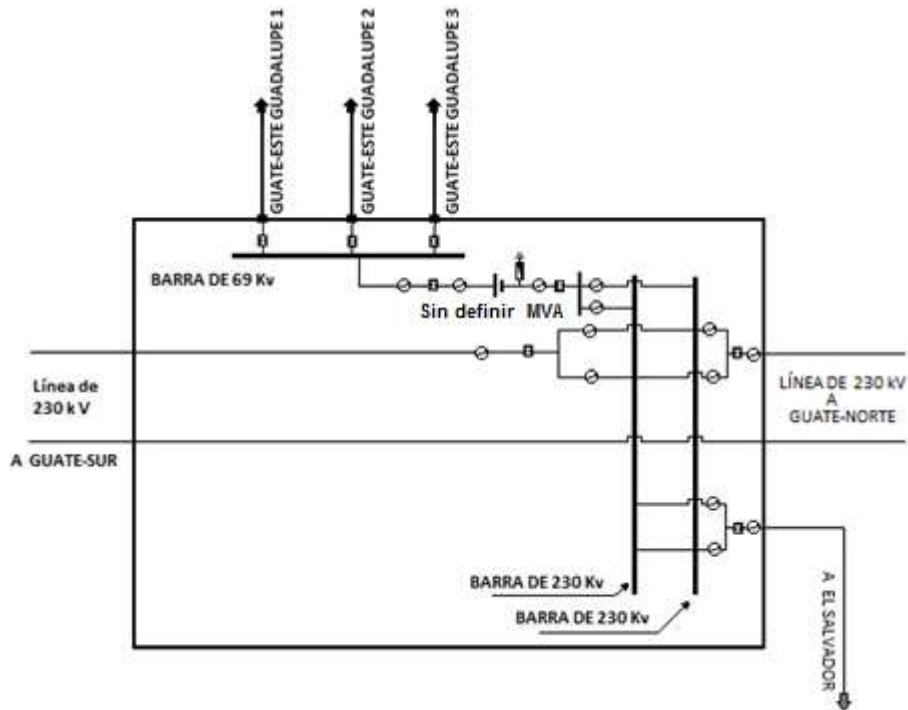


Fuente: subestación Guatemala Este, finca San Vicente km 18.5 a Santa Catarina Pinula.

En el diagrama están representados de forma simbólica los diferentes equipos, tales como:

- Pararrayos
- Seccionadores de línea y de barra
- Transformadores
- Interruptores
- Seccionadores de puesta a tierra
- Transformadores de potencial
- Transformadores de corriente

Figura 48. Diagrama unifilar de la subestación Guatemala Este



Fuente: Empresa Eléctrica de Guatemala S.A.

5.2.2. Dimensiones de la subestación Guatemala Este

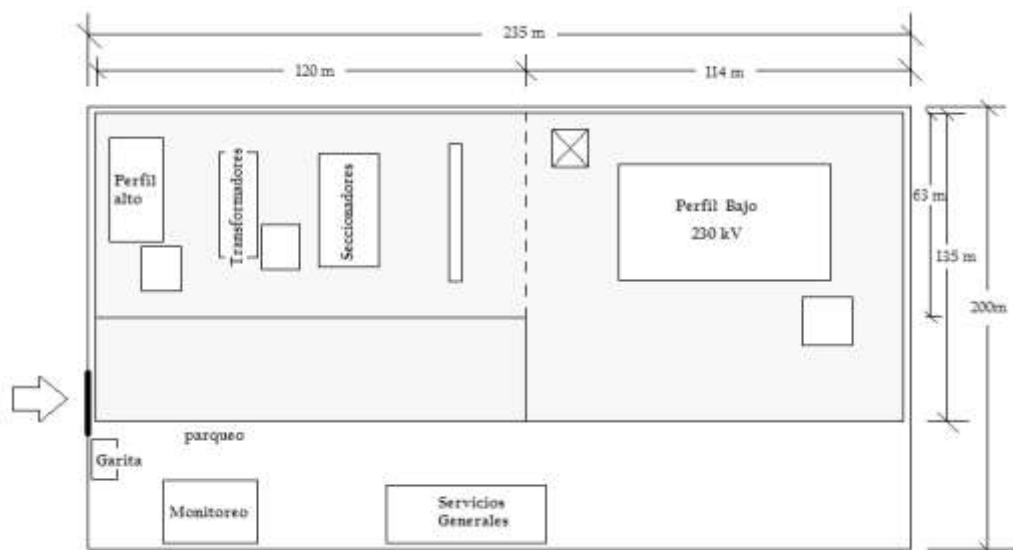
La subestación eléctrica Guatemala Este se encuentra encerrada por un muro perimetral, con una altura aproximada de 3 m. La entrada está protegida por un portón metálico con dimensiones aproximadas de 3 m x 6 m.

El área total encerrada por la subestación es de forma rectangular, con dimensiones aproximadas de 200 m x 235 m. Esta se encuentra distribuida de la siguiente manera: área ocupada por el equipo en perfil bajo del lado de 230 kV, área ocupada por las estructuras, transformadores, banco de

capacitores, en perfil alto, área de oficina de monitoreo, área de oficinas de servicios generales, parqueo, calle de circulación de vehículos, garita, etc.

El área ocupada por la red de tierra está dispuesta en forma rectangular con las medidas de 135 m x 234 m. Mientras que el área de la subestación en total es de 200 m x 235 m (figura 49).

Figura 49. **Vista en planta de la subestación Guatemala Este**



Fuente: subestación Guatemala Este, finca San Vicente km 18.5 a Santa Catarina Pínula.

5.2.3. Condiciones climatológicas para el diseño

La ubicación de la subestación se presta para tener un clima templado, es decir que en estación de verano la temperatura promedio es de 25 °C, y en invierno las lluvias son conforme a la temporada (de forma moderada). El acceso es adecuado, encontrándose separada de residencias, fábricas, logrando con ello una mejor accesibilidad y ventilación.

5.2.4. El sistema de puesta a tierra actual

El mantenimiento de la red de tierra es necesario, por lo que la subestación cuenta con fosas de monitoreo, donde se puede realizar una supervisión ocular, para determinar el grado de deterioro del conductor, así como de las soldaduras de la malla.

Las estructuras metálicas se encuentran conectadas al sistema de puesta a tierra como a las estructuras de alumbrado. La unión de cualquier estructura con el conductor es mecánica (atornillada), de tal manera que al remover la estructura, una nueva pueda ser conectada con facilidad; otra razón es la unión de diferentes metales.

Estas uniones están formadas por cables de cobre, conectores con baño de estaño, sujetos a estructuras de acero por medio de tornillos de acero.

5.2.5. Disposición física de la malla de tierra para el diseño

En el diseño preliminar se debe incluir una malla hecha de conductores, dispuestos de tal manera que permitan el acceso a los conductores de los equipos y estructuras.

La separación inicial estimada de los conductores debe de tener como base la corriente de cortocircuito de diseño y el área de la subestación. Se sugiere que la separación inicial esté de acuerdo con los niveles de tensión del sistema, en caso de no contar con programas de cálculo de red de tierra.

Para subestaciones convencionales nuevas con tensiones de 230 y 400 kV en el lado de alta tensión, se toma en cuenta lo siguiente:

- La cuadrícula de la malla será de 10 m x 10 m, en toda el área del terreno y de acuerdo con el criterio adoptado para la puesta a tierra de la cerca.
- En un sistema de tierra de una subestación, el espaciamiento típico entre conductores de la malla, puede estar entre 3 y 7 m.

La malla estará constituida por cables colocados de forma paralela, y perpendicularmente con el espaciamiento requerido, conforme al cálculo de su resistencia eléctrica y de las tensiones de paso y contacto, considerados en el diseño del sistema.

Para el diseño de puesta a tierra se considera únicamente el conductor enterrado con o sin electrodos verticales.

En el diseño preliminar debe considerarse el colocar electrodos en los extremos de la malla y en algunos puntos de unión del perímetro. Se deben también colocar electrodos en equipos como pararrayos, interruptores y transformadores de potencia.

5.3. Aspectos importantes para el diseño de una puesta a tierra

Estos cálculos cubren principalmente subestaciones tipo exterior, con aislamientos convencionales, en las que se incluyen: subestaciones de distribución, transmisión y plantas generadoras.

Un diseño de puesta a tierra seguro, busca dos objetivos:

- Proporcionar el medio de transporte de la corriente de falla hacia tierra, bajo condiciones normales, sin exceder algún límite de operación.
- Asegurar que una persona dentro del área aterrizada, no esté expuesta al peligro de descargas o voltajes residuales ya sea por inducción o por contacto directo.

5.3.1. Cálculo de la puesta a tierra de la subestación Guatemala Este

Para el diseño de una malla de tierra, y en este caso de la subestación Guatemala Este, es necesario contar con información acorde al área a tomar en cuenta, la potencia, etc. Para este análisis la malla estará formada por cable con una cuadrícula de 9 m x 9 m; esto por conveniencia ya que de esta forma, la cantidad de conductores transversales y longitudinales quedan con valores enteros.

Los datos a utilizar se presentan en la tabla XIV o se tomarán de las tablas anteriormente descritas. Iniciando por establecer el área donde se instalará la subestación y su equipo:

Ancho del terreno = 135 m

Largo del terreno = 234 m

$$A = 135 \text{ m} * 234 \text{ m} = 31\,590 \text{ m}^2$$

Tabla XIV. **Valores a considerar en el diseño**

Descripción	Valor
Capacidad instalada, en MVA, 3Ø	195
Voltaje, en kV	230/69
Corriente de cortocircuito, en kA, 3Ø	11,10
Temperatura ambiente, en °C	25
Resistividad promedio del terreno, en Ω m	37,61
Resistividad superficial (grava), en Ω m	3000
Espesor de la capa superficial, en m	0,15
Profundidad de la malla de tierra, en m	0,30
Ancho del terreno, en m	135
Largo del terreno, en m	234
Tiempo de duración de la falla, en segundos	0,35
Ciclos	20
Factor de crecimiento	1,50

Fuente: subestación Guatemala Este, finca San Vicente km 18.5 a Santa Catarina Pinula.

Los valores típicos de t_f que recomienda la CFE es entre 0,25 a 1,0 segundos. Con el propósito de dar un valor adecuado, se establecerá el de 0,35 segundos, por ser un valor más conservador. En la tabla XII y en la columna $X/R = 20$, se determina el valor de D_f :

0,30	1,085
0,35	x
0,40	1,064

Por interpolación:

$$\frac{0,30 - 0,35}{0,35 - 0,40} = \frac{1,085 - x}{x - 1,064} = x = 1,07 = D_f$$

Para calcular la corriente máxima de diseño para la red de tierra, se parte de la corriente de cortocircuito simétrica que se establece en la subestación referida al lado de alta tensión trifásica, según la tabla XIII $I_{cc} = 11,1 \text{ kA}$.

$$I'' = I_{cc} D_f f_c = 11,10 * 1,07 * 1,50 = 17,82 \text{ kA}$$

Para el cálculo de los voltajes de contacto y de paso permisibles, para una persona de 50 y 70 kg, se encuentra primero el factor de reducción C_s :

$$C_s = 1 - \frac{0,09 [1 - (37,61/3000)]}{(2 * 0,15) + 0,09} = 0,77$$

Donde:

$h_s = 0,15 \text{ m}$

El valor de C_s , también puede ser tomado de la figura 15

- El voltaje de contacto permisible es:

- Para una persona de 50 kg:

$$E_c = \frac{0,116[1000 + (1,50 * 0,77 * 3000)]}{\sqrt{0,35}} = 878 \text{ V}$$

- Para una persona de 70 kg:

$$E_c = \frac{0,157[1000 + (1,50 * 0,77 * 3000)]}{\sqrt{0,35}} = 1188 \text{ V}$$

- El voltaje de paso permisible es:

- Para una persona de 50 kg:

$$E_p = 0,116[1000 + (6 * 0,77 * 3000)]/\sqrt{0,35} = 2922 V$$

- Para una persona de 70 kg:

$$E_p = 0,157[1000 + (6 * 0,77 * 3000)]/\sqrt{0,35} = 3954 V$$

Para calcular el área transversal mínima del conductor requerido para el diseño de la malla de tierra se toman en cuenta los datos siguientes:

Tabla XV. **Constante del cobre comercial**

Cobre comercial inmersión – dura	
TCAP	3,42 J/(cm ³ °C)
Tr	20 °C
Tm	1084 °C
Ta	40 °C (temperatura máxima ambiente)
Tc	0,33 s
Ar	0,00381
Pr	1,78 μΩ cm

Fuente: elaboración propia, con base a “NRF-011-2004” Comisión Federal de Electricidad.

Al determinar el conductor adecuado con la ecuación del área en mm², se encuentra primero el valor de temperatura K_o y el valor de la corriente de cortocircuito de diseño se escribe, en kA.

$$K_o = (1/0,00381) - 20 = 242 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$A_{mm^2} = 17,82 \frac{1}{\sqrt{\frac{3,42 * 10^{-4}}{0,35 * 0,00381 * 1,78} \ln \frac{242 + 1084}{242 + 40}}} = 37,75 \text{ mm}^2$$

El anterior resultado al buscarlo en el anexo 1 de propiedades de los conductores eléctricos, se aproxima a un valor superior, es decir al conductor calibre No. 1 (42,41 mm²).

Según la norma ANSI/IEEE Std 80-1986, se recomienda como calibre mínimo el conductor AWG No. 4/0 (107,2 mm²).

Figura 50. **Muestra de la temperatura máxima ambiente**

ANSALDO							
Ansaldo Coemsa S.A.							
TRANSFORMADOR							
Nº DE SERIE	111.188/	MANUAL DE INSTRUCCIONES	111.188	AÑO	1987	Nº DE FASES	01
TIPO	MOC - NF	NORMA	ANSI	FRECUENCIA	60 Hz	LÍQUIDO AISLANTE	ACEITE MINERAL NAFTÉNICO
ELEVACION MEDIA DE LA TEMPERATURA EN LOS DEVANADOS EN REGIMEN CONTINUO EN OA Y FA SOBRE MAXIMA AMBIENTE DE 40°C						65	°C
ELEVACION MAXIMA DE LA TEMPERATURA DEL ACEITE EN REGIMEN CONTINUO EN OA Y FA SOBRE MAXIMA AMBIENTE DE 40°C						65	°C

Fuente: placa parcial de un transformador. Subestación Guatemala Este, INDE.

Para calcular la resistencia de la malla de tierra, primero se encuentra la longitud total L_T y se procede de la siguiente manera:

- La malla se instalará a una profundidad de 0,30 metros, valor de enterramiento de la malla actual en Guatemala Este.
- En este diseño se considera una malla con cuadrícula de 9 metros por lado (ver figura 53).

Para encontrar la longitud total se toman en cuenta los conductores longitudinales y transversales de la malla, de la siguiente manera:

$$\text{Conductores longitudinales} = (15 + 1) * 234 \text{ m} = 3744 \text{ m}$$

$$\text{Conductores transversales} = (26 + 1) * 135 \text{ m} = 3645 \text{ m}$$

$$\text{Total en metros del conductor} = L_T = 7389 \text{ m}$$

Por lo tanto la resistencia de la malla de tierra es la siguiente:

$$R_g = 37,61 \left[\frac{1}{7389} + \frac{1}{\sqrt{20 * 31\ 590}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0,30 \sqrt{20/31\ 590}} \right) \right] = 0,10 \ \Omega$$

Para calcular el efecto que causan los hilos de guarda en la distribución de la corriente de falla de un sistema de puesta a tierra, se toman en cuenta los siguientes datos:

- Dos hilos de guarda por torre
- Tres torres de 230 kV por kilómetro

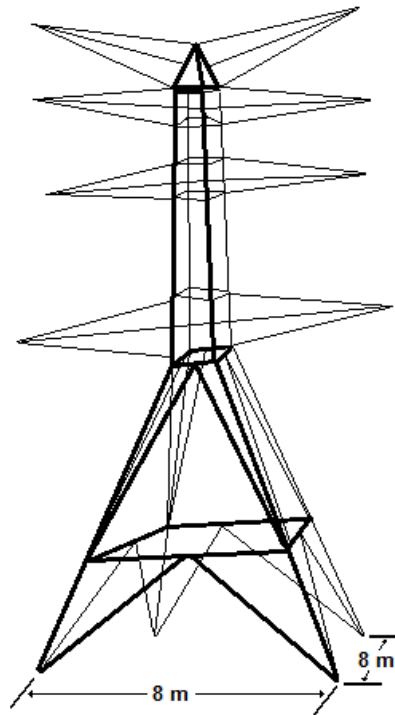
- $Z_1 = 1,8 \Omega/\text{km}$, impedancia de un hilo de guarda (3/8" de área transversal)
- La distancia de un lado en la base de la torre de 230 kV es de 8 metros (ver figura 51)

Por lo tanto el área en la base de la torre y el radio equivalente al área rectangular son:

$$A' = 8 \text{ m} * 8 \text{ m} = 64 \text{ m}^2$$

$$B = \sqrt{64/3,1416} = 4,51 \text{ m}$$

Figura 51. **Área en la base de una torre de 230 kV**



Fuente: estructura de acero. Subestación Guatemala Este, INDE.

Con los valores encontrados se determina la resistencia aproximada de cada torre y la resistencia equivalente R_2 (3 torres/km) de la siguiente manera:

$$R_{Torre} = 37,61/2 * 3,1416 * 4,51 = 1,33 \Omega$$

$$R_2 = 1,33/3 = 0,44 \Omega$$

Para calcular la impedancia de los hilos de guarda en conjunto con la de las torres, se determina con la siguiente ecuación:

$$Z = \sqrt{1,8 * 0,44} = 0,89 \Omega/km$$

Por lo tanto la impedancia equivalente de cada hilo de guarda es la siguiente y su representación se muestra en la figura 52.

$$Z' = 0,89/6 = 0,15 \Omega$$

Cálculo de la elevación del potencial de tierra, EPT:

$$EPT = I''R_g = 10,69 * 0,10 = 1,07 \text{ kV} \text{ (Con divisor de los hilos de guarda)}$$

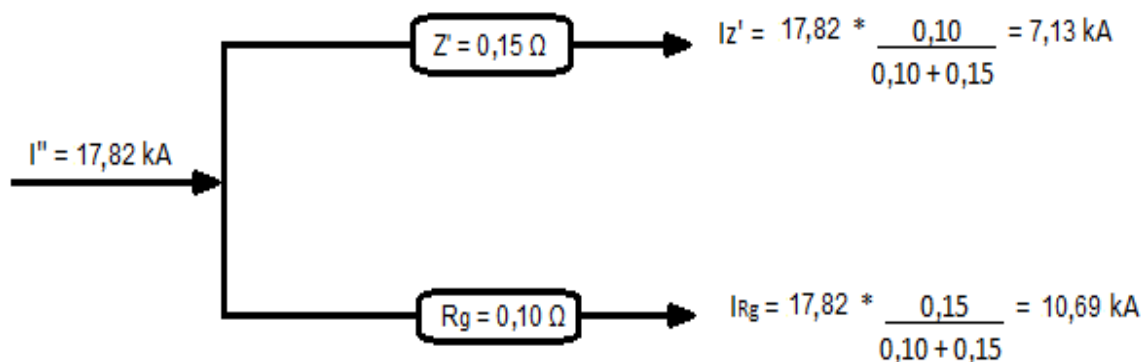
$$EPT = I''R_g = 17,82 * 0,10 = 1,78 \text{ kV} \text{ (Sin los hilos de guarda)}$$

El valor del EPT es mayor que el valor del máximo voltaje de contacto permisible de 878 V para una persona de 50 kg y de 1188 V en una de 70 kg. Como el valor del EPT es mayor al voltaje permisible, es necesario realizar cálculos del voltaje de malla.

Para calcular el voltaje de malla y voltaje de paso se toman en cuenta los siguientes factores:

- Al estar instalada una malla de tierra, se conectarán electrodos verticales a la misma.
- Se instalarán 75 electrodos Copperweld de 1,6 cm (5/8") de diámetro y 3 metros de longitud.
- Los electrodos se instalarán en el perímetro de la malla de tierra y en lugares donde se desee reducir los gradientes de potencial.
- $K_{ii} = 1$ (para mallas con electrodos en su perímetro).

Figura 52. **Distribución de la corriente de falla del sistema de puesta a tierra para la subestación Guatemala Este**



Fuente: elaboración propia, con base a "Diseño de Subestaciones Eléctricas" Raúl Martín.

El factor K_h se establece cuando a una malla se le conectan electrodos verticales, con $h = 0,30$ m y se calcula de la siguiente manera:

$$K_h = \sqrt{1 + (0,30/1)} = 1,14$$

El factor K_i se encuentra al contar los conductores transversales y los longitudinales: $a = 16$ (conductores longitudinales), $b = 27$ (conductores transversales).

$$n = \sqrt{16 * 27} = 20,78$$

$$K_i = 0,656 + (0,172 * 20,78) = 4,23$$

El factor k_m , se calcula de la siguiente manera:

$$K_m = \frac{1}{2 * 3,1416} \left[\ln \left(\frac{9^2}{16 * 0,30 * 0,0134} + \frac{[9 + (2 * 0,30)]^2}{8 * 9 * 0,0134} - \frac{0,30}{4 * 0,0134} \right) + \frac{1}{1,14} \ln \left[\frac{8}{3,1416(2 * 20,78 - 1)} \right] \right] = 0,76$$

El valor L_T a calcular en este caso, es la cantidad de conductores más los electrodos verticales:

$$L_v = 75 * 3 \text{ m} = 225 \text{ m}$$

$$L_T = 7389 + (1,15 * 225) = 7648 \text{ m}$$

Por lo tanto, el voltaje de malla es:

$$E_m = (37,61 * 0,76 * 4,23 * 17\ 820) / 7648 = 282\ V$$

Para determinar el voltaje de paso se toma como base a “n”, que representa la mayor cantidad de conductores paralelos, es decir los conductores transversales de la malla y en este caso $n = 27$.

Los demás valores son los mismos que se utilizaron en las ecuaciones anteriores.

$$K_s = \frac{1}{3,1416} \left[\frac{1}{2 * 0,30} + \frac{1}{9 + 0,30} + \frac{1}{9} (1 - 0,5^{(27-2)}) \right] = 0,60$$

El nuevo valor de K_i es el que se muestra a continuación:

$$K_i = 0,656 + (0,172 * 27) = 5,30$$

Por lo tanto, el voltaje de paso es:

$$E_p = (37,61 * 0,60 * 5,30 * 17\ 820) / 7648 = 279\ V$$

Si los voltajes de contacto y de paso calculados con las disposiciones de la cuadrícula y electrodos verticales brindan valores menores a los permisibles o tolerables por el cuerpo humano, se establece que el diseño es adecuado.

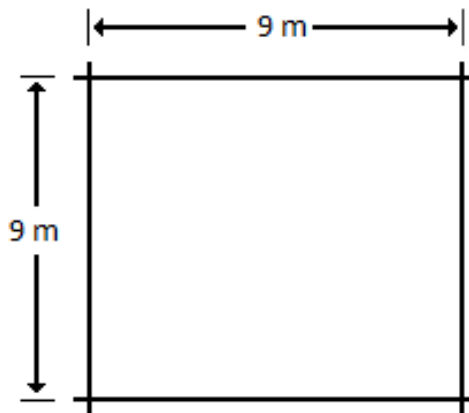
Tabla XVI. **Comparación de voltajes permisibles o tolerables**

Voltajes de contacto y de paso permisibles	Voltajes de contacto y de paso actuales ó con influencia de un sistema de puesta a tierra
$E_{c\ 50\ kg} = 878\ V$ $E_{c\ 70\ kg} = 1188\ V$	$E_c = 282\ V$
$E_{p\ 50\ kg} = 2922\ V$ $E_{p\ 70\ kg} = 3954\ V$	$E_p = 279\ V$

Fuente: elaboración propia, con base a el cálculo efectuado.

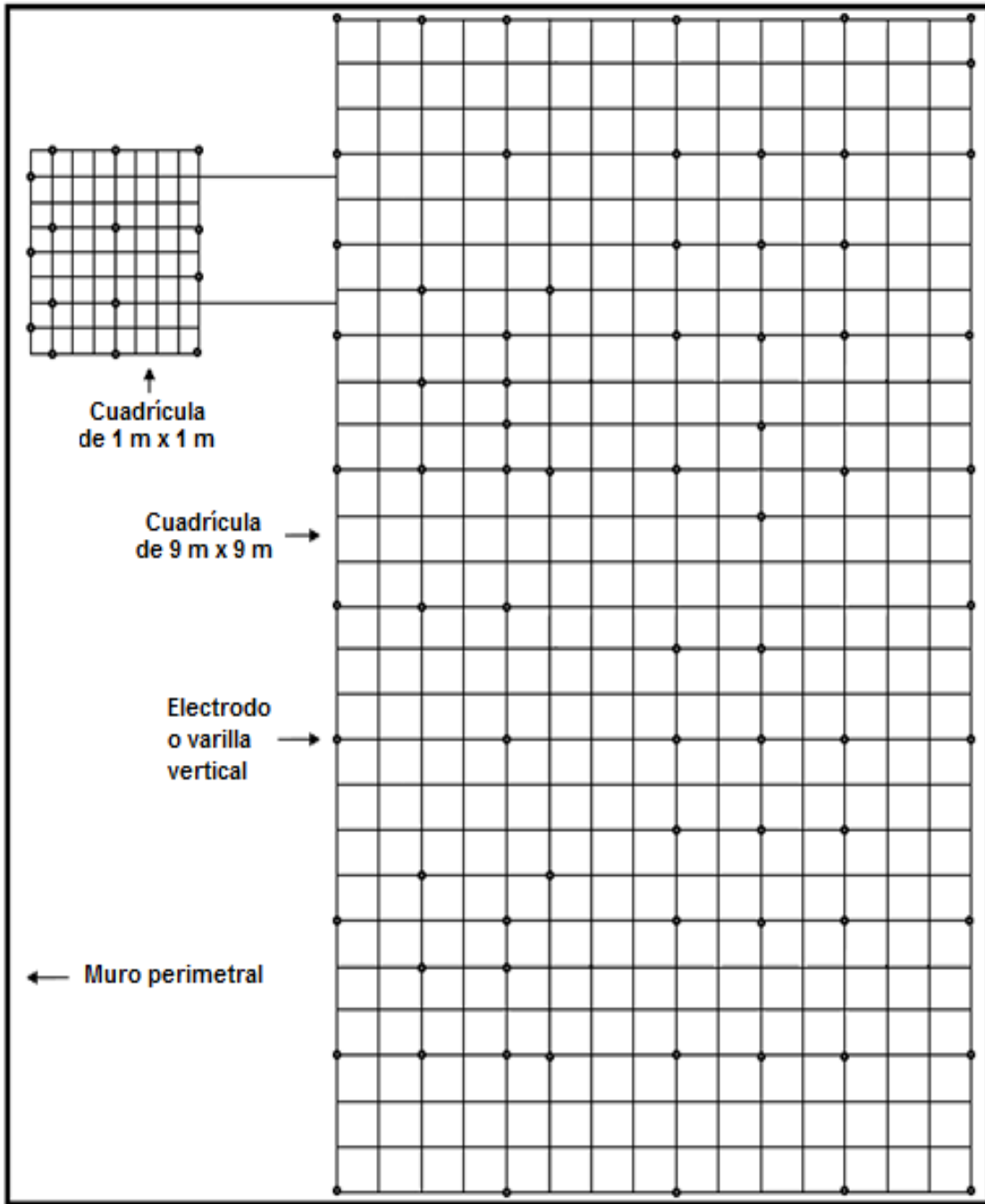
Los resultados del análisis de la malla de la sala de control se presentan a continuación en la tabla XVII. Los valores del voltaje de contacto y de paso se elevan por la alta corriente de cortocircuito y el área ocupada por esta. Lo recomendable es interconectarse con la malla de los equipos para formar un solo sistema de puesta a tierra.

Figura 53. **Dimensiones de la cuadrícula de la malla de tierra**



Fuente: elaboración propia, con base en "NRF-011-2004" Comisión Federal de Electricidad.

Figura 54. Representación de la malla de tierra



Fuente: elaboración propia, con base a "Diseño de Subestaciones Eléctricas. Raúl Martín.

Para calcular el voltaje de contacto y de paso, se toma como $L_T = 357$ m; esto por la suma de los conductores más las 15 varillas de tres metros de longitud.

Tabla XVII. **Análisis para la malla en la sala de control**

Descripción	Valor
Área de la malla de tierra. 12 m x 12 m	144 m ²
Corriente máxima simétrica de falla	17,82 kA
Voltajes de contacto y de paso, permisibles	
Ec para una persona de 50 kg	878 V
Ec para una persona de 70 kg	1188 V
Ep para una persona de 50 kg	2922 V
Ep para una persona de 70 kg	3954 V
Área transversal mínima del conductor	4/0
Conductores longitudinales	13
Conductores transversales	13
Total en metros del conductor	312 m
Total en metros del conductor más las 15 varillas	363,75 m
Resistencia de la malla sin electrodos verticales	1,45 Ω
EPT	25,83 kV
Voltaje de malla	1303 V
Voltaje de paso	5929 V

Fuente: elaboración propia, con base a "Diseño de Subestaciones Eléctricas. Raúl Martín.

6. MANTENIMIENTO Y MEJORAMIENTO

6.1. Mantenimiento y mejoramiento de puestas a tierra

Al construir una subestación se toma en cuenta una adecuada ubicación, derivándose de un estudio de planeación y localización más próxima al centro de carga de la región que se necesite alimentar. Al localizar el terreno, se procede a la obtención de datos climatológicos tales como: temperatura, velocidad del viento, nivel cerámico, sísmico, grado de contaminación y pluviométrico. En el estudio debe tomarse en cuenta una futura ampliación.

Se puede dar el caso que el terreno elegido no sea el mejor, esto por no poder reducir la impedancia o resistencia de la red de tierra por medios físicos, el aumento del diámetro del conductor o por incrustar más varillas verticales; cuando el caso se presenta es necesario recurrir a medios químicos. De acuerdo con la norma ANSI/IEEE Std. 142-1982, la resistencia de una puesta a tierra se podrá reducir con tratamientos, desde el 15 % hasta el 90 %, dependiendo del tipo de textura del suelo artificial utilizado.

6.2. Técnicas de mejoramiento de puesta a tierra en torres de líneas de transmisión

Estas pretenden lograr que un suelo tenga mejor conductividad por la cantidad de humedad del mismo; ahora el problema es cómo retener esas partículas de agua y lograr con ello la dispersión de la corriente de falla.

6.2.1. Instalación de contrapesos

Este dispositivo es utilizado en las torres de líneas de transmisión y su misión es lograr que cada bajante de un sistema de protección contra rayos, llegue a un electrodo, y se debe conservar una proporción mínima entre electrodo y contrapeso de 1:2.

Es mejor construir varios contrapesos cortos que uno largo, pero sin pasar de cinco, y su longitud debe estar entre 15 y 60 m. Están compuestos de un conductor horizontal y un electrodo vertical en el extremo, insertados en el suelo a la distancia que se calcule (ver figura 55).

Para calcular la longitud de un contrapeso para una torre de alta tensión o de comunicaciones, se emplea la siguiente ecuación:

$$L_c = 50 - 2/3 [(H - 15)] \text{ (m)} \quad \text{Ec. 6.1}$$

Donde:

H = altura de la torre

Los contrapesos no requieren longitudes extensas y pueden dispersar hasta el 80 % de la corriente del rayo.

No obstante, los contrapesos dejan de ser efectivos si la verdadera conexión eléctrica con el terreno no es duradera o si son demasiado largos (100 m).

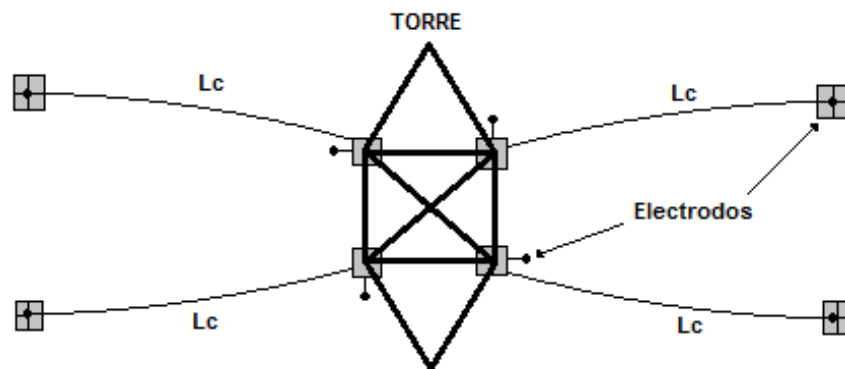
6.2.2. Instalación de anillos alrededor de las torres

Estos anillos de cables se hacen normalmente como complemento a los contrapesos y su efectividad sigue estando unida a la conexión con el suelo. Una práctica muy recomendada por el sector de comunicaciones, solamente que ineficiente ante altas frecuencias. Realizar mallas de tierra, ayuda en caso extremo; lo ineficiente es cuando el costo se eleva.

6.2.3. Utilización de concretos conductivos

El concreto común está elaborado con cemento, arena, grava y agua. Si este es secado en un horno, aumenta su resistividad a un aproximado de $10^9 \Omega$. El gran aumento de la resistividad al quitarle el agua, significa que la corriente eléctrica fluye más rápidamente por el material húmedo y principalmente por medios electrolíticos (los iones que contiene el agua evaporable). A pesar de que la gran mayoría de aditivos no reduce la resistividad del concreto de manera confiable y significativa, existen algunos eficaces para este propósito.

Figura 55. Contrapesos en una estructura de línea de transmisión



Fuente: CASAS, Favio. Tierras soporte de la seguridad eléctrica. P. 237.

6.2.4. Introducción de electrodos al concreto

Esto consiste en introducir alambres largos de cobre (10 m o más) dentro del concreto y unirlos al acero de refuerzo. Debe tenerse en cuenta que hoy se le considera como una técnica complementaria a la de contrapesos.

6.2.5. Utilización de electrodos químicos

Consiste en la introducción de electrodos no comunes, es decir que son tubos perforados rellenos de sales y han demostrado su gran efectividad inicial, necesitando mantenimiento correctivo, o su vida útil será corta. Esta técnica es usada desde 1987 (ver figura 3).

6.2.6. Realización de rellenos

Son técnicas de tratamiento del suelo y su único propósito es hacerlo más conductivo. Algunas de estas técnicas son costosas y de poca durabilidad, por lo que no son utilizadas a menos que la necesidad lo amerite. A continuación se presentan varias de estas técnicas como forma de conocer sus beneficios y debilidades:

- Tratamiento con sales: tiene corta duración por su rápida disolución o por contaminación con otros elementos.
- Tratamiento con carbón vegetal o mineral: no permite reducir la resistividad del suelo sustancialmente, sobre todo por el tamaño de las partículas aplicadas. Un carbón de partículas finas tiene una resistividad de $1,8 \Omega \text{ m}$.

- Tratamiento con grafito: es un relleno con grandes resultados pero con elevado costo.
- Tratamiento con bentonita sódica: los dos mayores inconvenientes lo constituyen la necesidad de hidratarla con agitación mecánica y que después de una falla, esta se seca sin retomar la humedad por sí sola.
- Tratamiento con suelos artificiales: existen varios productos con diferentes nombres comerciales como, Favigel, Gap, Thor-Gel, etc. Estos ofrecen grandes beneficios en conductividad, costo y mantenimiento.

6.3. Características de un suelo artificial

Los factores adecuados para la aplicación de un suelo artificial son importantes por el riesgo que ello implica y la forma de manipular.

Después de un estudio riguroso para determinar que el suelo natural no es apto para soportar un sistema de puesta a tierra o mejorar uno existente, se utiliza un medio artificial, el cual requiere de diversos factores de aprobación; de lo contrario, al solucionar un problema este se incrementaría más adelante.

Algunos factores que se deben tomar en cuenta son: la fácil aplicación, el mayor retenimiento de la humedad el mayor tiempo posible, evitar el daño al suelo a su alrededor, que sea insoluble en el agua, que al prepararlo no sea tóxico en personas o animales y que su costo no sea elevado.

6.3.1. El intensificador Favigel

Es un suelo artificial compuesto, que permite un tratamiento físico químico al terreno circundante al electrodo, logrando un aumento en su conductividad. No es tóxico, no requiere hidratación previa. Su grado de fusión es de 1200 °C; soporta con ello las altas temperaturas que se generan en fallas severas; el pH está entre 7 y 7,5 (para evitar la corrosión alrededor del electrodo).

Otras características que se deben tomar en cuenta son:

- Límite líquido: 78,7 %
- Límite plástico: 56 %
- Densidad: 0,91 gr/cm³
- Calor específico: 1,02096 J/g °C
- Resistividad (producto húmedo): 0,5 Ω m

6.3.2. El intensificador GAP

Es un suelo artificial diseñado como conductor de la electricidad que se utiliza como relleno en los sistemas de tierra, para incrementar y mejorar las propiedades conductivas del terreno.

El GAP fue sometido a pruebas según norma C-109 de ASTM y el resultado fue que al momento de secarse se endurece y no se rompe con las vibraciones del terreno. Tiene una fuerte cohesión (adherencia) molecular entre sus partículas.

Aspectos que se deben considerar:

- Resistividad: 3,4 Ω cm
- Resistencia mecánica: 14,04 kg/cm²

6.3.3. El intensificador Thor-Gel

Es un compuesto químico complejo que se forma cuando se mezclan en el terreno las soluciones acuosas de sus dos componentes; el resultante químico tiene naturaleza coloidal, formando una malla tridimensional; los componentes a los cuales les falte o sobre iones, permitirán el tránsito de corrientes.

El método de aplicación consiste en incorporar al pozo los electrolitos que aglutinados en forma de gel, mejoran la conductividad del suelo y retienen la humedad por un período prolongado. La cantidad de dosis por metro cúbico de tierra del pozo varía de uno a tres, y está en función a la resistividad natural del terreno.

6.4. Plan de mantenimiento en sistemas de puesta a tierra

Al ejecutar labores de mantenimiento en un sistema eléctrico que involucre los diferentes elementos de un sistema de puesta a tierra, debe tenerse cuidado tanto con las zonas de mayor peligro, como de los voltajes involucrados en el lugar que se va manipular en el plan de mejoras.

Deben conocerse registros de actividades anteriores como programas de corrección, para determinar la época de su realización.

Para ello se muestran algunas recomendaciones:

- Antes de comenzar el mantenimiento se debe realizar una inspección ocular para determinar los lugares con mayor riesgo a fallar.
- Cualquier modificación que se realice debe ser aprobada por personal calificado.
- Al realizar limpieza o cambios de piezas en un sistema que involucren voltajes, debe aterrizar la zona que se va trabajar.
- Para cambios de cableado en equipo electrónico de puesta a tierra, esta deberá ser sustituida por cable forrado de color verde, verde/amarillo.
- En ningún sitio se permite que la red equipotencial para los equipos electrónicos pierda continuidad de aislamiento.
- Todo electricista que realice modificaciones al sistema de puesta a tierra deberá informarlo por escrito a su jefatura y así realizar los cambios en los planos de la red.
- Todo aumento de conductores o nuevas conexiones al sistema, deberá realizarse con unión de soldadura exotérmica.
- Cualquier pieza que necesite cambio, deberá ser sustituida por su equivalente tales como: tornillos, conectores, fijadores, etc.

Tabla XVIII. **Plan de mantenimiento de un sistema de puesta a tierra**

Período	Plan de mantenimiento
Seis meses	Revisión: ajuste de tuercas, estructuras, anclajes, conectores
Al año	Medición: de resistencia de la puesta a tierra, y de equipotencialidad
Cinco años	Medición de resistencia de tierra en diferentes puntos del sistema y de equipotencialidad
Diez años	Exploración de conexiones de electrodos a los conductores de la red y soldaduras.
Veinte años	Diagnosticar, evaluar, rediseñar, proyectar acciones correctivas

Fuente: CASAS, Favio. Tierras soporte de la seguridad eléctrica. P. 234.

6.4.1. Aplicaciones particulares para el mantenimiento

A primera impresión se cree que una puesta a tierra debería ser permanente, es decir que después de que se instala no se debe remover del lugar; esto algunas veces no necesariamente es así, por lo que se necesita hacer una descripción de otras alternativas.

6.4.1.1. Puesta a tierra temporal

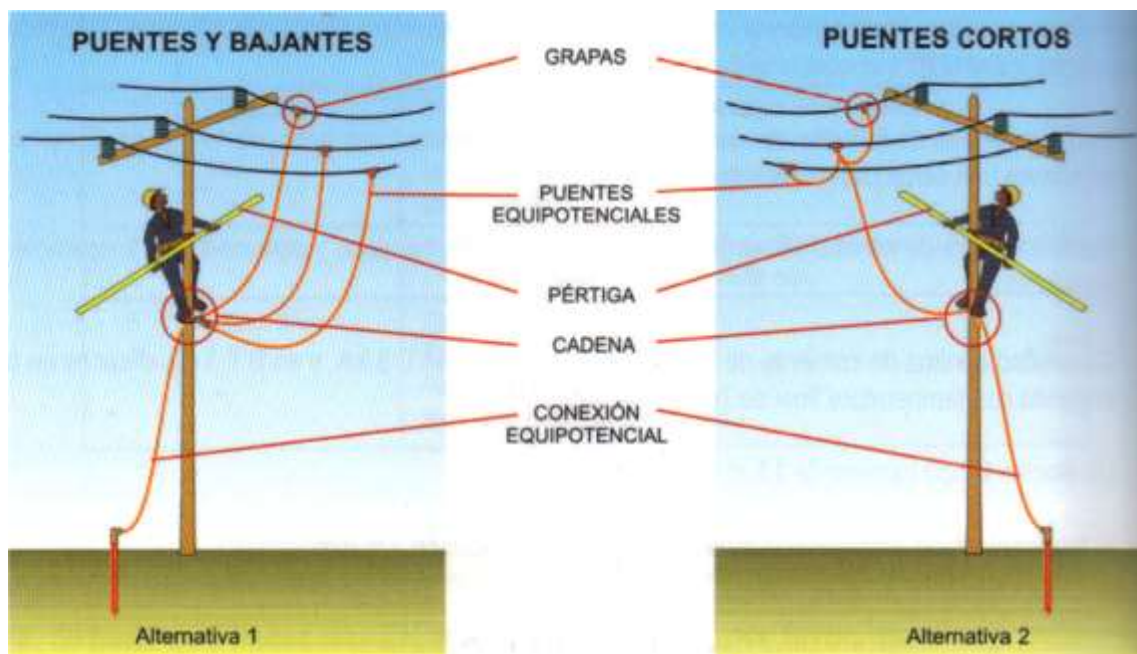
Esta instalación es utilizada por electricistas que trabajan en mantenimiento y reparación, en postes de alta y media tensión. Su función principal es proteger al liniero contra descargas repentinas no controladas, que se forman al cerrar un circuito previamente abierto por desperfecto.

No instalarlas es la mayor causa de electrocución en el área de distribución de energía.

Desafortunadamente o por costumbre se omiten reglas de precaución. Por ejemplo cuando el sitio de trabajo se encuentra entre dos equipos de puesta a tierra se puede creer que se tiene una seguridad absoluta; esto no es cierto del todo, puesto que al presentarse una falla también circulará corriente por las estructuras, dando una descarga a la persona en contacto con ella.

El montaje aconsejado debe hacerse de tal manera que los pies del liniero queden al potencial de tierra, y que los conductores aterrizados que se conecten a las líneas en mantenimiento, tengan la menor longitud posible.

Figura 56. **Puesta a tierra temporal**



Fuente: CASAS, Favio. Tierras soporte de la seguridad eléctrica. P. 236.

6.4.1.2. Puesta a tierra permanente

Se le llama así a toda aquella instalación que por motivos de seguridad no será removida sin causa justificada y que de ser lo contrario, esta sea por causa de reparación, y tomando en consideración que nunca se debe dejar sin continuidad el circuito. En la actualidad se le da mayor importancia a la necesidad de contar con este circuito, el cual soluciona futuras complicaciones.

6.5. Procedimiento general del proceso de soldadura exotérmica

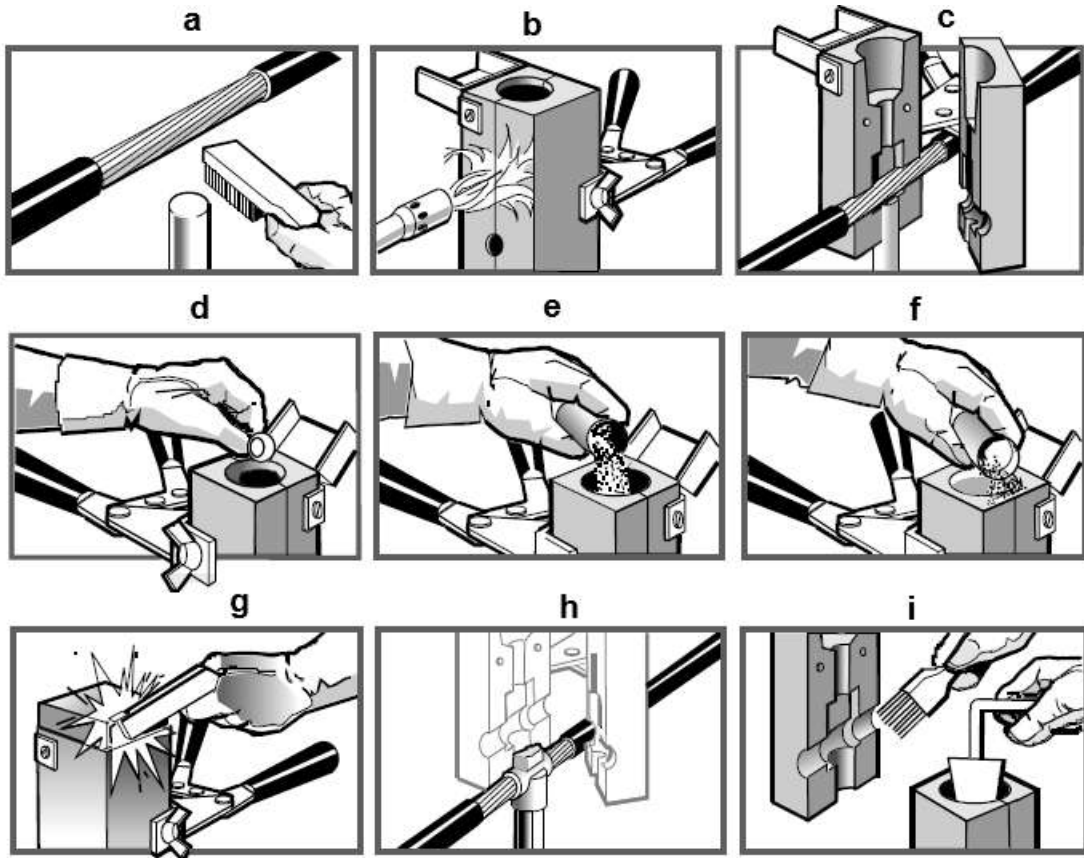
El molde debe estar limpio y seco, el cartucho y el molde deben ser adecuados al tamaño del conductor ubicando los conductores en el lugar correcto del molde. Colocar el disco de acero sobre el hueco, de tal manera que lo tape, destapar el cartucho e insertar la soldadura en la cavidad del molde, aplicando el iniciador o pólvora sobre la soldadura, verificar nuevamente la posición de los conductores antes de cerrar la tapa del molde y accionar el encendedor y esperar 30 segundos.

A continuación se presenta el procedimiento a seguir para una soldadura adecuada (ver figura 57).

- Si el cable dispone de aislamiento o forro, eliminarlo en una longitud de aproximadamente 15 cm;
- Antes de realizar la primera soldadura, es imprescindible precalentar el molde con una fuente de gas, durante unos cinco minutos;
- Abrir el molde, separando los mangos de la tenaza;

- Cerrar la tenaza del molde, bloquearla en dicha posición, para evitar las fugas del metal a fundir;
- Abrir la tapa de color del cartucho y vaciar el polvo de soldadura en la tolva del molde;
- Abrir la tapa negra del cartucho y espolvorear el polvo de ignición sobre el de soldadura y en el borde del molde, bajo la abertura de la tapa, para facilitar su ignición;
- Cerrar la tapa del molde. Crear chispas con la pistola lateralmente, sobre el polvo de ignición para conseguir el encendido;
- Esperar un minuto antes de abrir el molde. Luego abrirla completamente para poder extraer la parte soldada;
- Eliminar la escoria de la tolva, en el orificio de colado y la tapa del molde con el raspador. Si el molde se mantiene todavía caliente, puede hacerse una nueva soldadura sin precalentarse.

Figura 57. El proceso de soldadura exotérmica



Fuente: www.klk.es/.../CATALOGO_SOLDADURA_ALUMINOTERMICA_COBRE. Consulta: 24 de octubre de 2010.

CONCLUSIONES

1. Un sistema de puesta a tierra de una subestación eléctrica mantiene las conexiones a estructuras y equipos por medio de conductores de cobre de forma permanente.
2. En distintos puntos de la subestación Guatemala Este se cuenta con registros de monitoreo para mostrar el deterioro de la malla de cobre. Estos registros también son utilizados para conexiones futuras hacia electrodos verticales o hacia nuevas estructuras.
3. Las mediciones realizadas en el suelo de la subestación Guatemala Este mostraron que la resistividad es homogénea, por lo que el diseño teórico de la puesta a tierra propuesto, es por el método de una capa de tierra.
4. Los cálculos realizados son para subestaciones convencionales y las ecuaciones utilizadas son para áreas cuadradas o rectangulares.
5. Si la cuadrícula de la malla se redujera, el voltaje tolerable es más seguro, pero se convierte en una instalación antieconómica.
6. Si la cuadrícula fuese más grande, por ejemplo quince metros por lado, los valores de voltaje de contacto y de paso no varían significativamente.

RECOMENDACIONES

1. El diseño propuesto con malla de nueve por nueve metros puede cambiarse con separaciones mayores, siempre y cuando estas tengan como base los estándares internacionales como la ANSI/IEEE, ya que no permiten separaciones elevadas.
2. Las mediciones del suelo deben realizarse en la estación seca del año, para obtener valores críticos de resistividad; en Guatemala la estación adecuada es de enero a mayo.
3. Los sistemas de puesta a tierra en las subestaciones nunca deben perder la continuidad, ya sea por mantenimiento o reparación.
4. No es permitido conectar a la misma malla sistemas de tensiones diferentes, salvo que la resistencia de la puesta a tierra de cada malla sea menor o igual a un Ohm.
5. Para reducir el valor de la resistencia y los gradientes de potencial de una malla de tierra, se pueden utilizar alternativas como la de incrustar más electrodos o la de tratar el suelo por medios artificiales. La mejor alternativa a utilizar será la que no deteriore el suelo de la instalación.

BIBLIOGRAFÍA

1. ÁVILA, Javier; GENESCÁ, Joan. *Más allá de la herrumbre II: la lucha contra la corrosión*. [en línea] www.bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/masalla2.htm. [Consulta: 5 de mayo de 2010].
2. COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. *Sistemas de tierra para plantas y subestaciones eléctricas*. [en línea] www.ruelsa.com/.../tierras/pea0NRF_011_Sistema_de_Tierra_Plantas. [Consulta: 15 de enero de 2010].
3. CHANG, Raymond. *Química*. 4a. ed. Estados Unidos: McGraw-Hill, 1991. 1064 p.
4. DE LA VEGA ORTEGA, Miguel. *Problemas de ingeniería de puesta a tierra*. 3a ed. México: LIMUSA, 2006. 445 p.
5. DÍAZ, Pablo. *Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución*. 2a ed. México: McGraw-Hill, 2001. 325 p.
6. Electricasas. *Tabla de conversión AWG a mm²*. [en línea] www.electricasas.com/electricidad/circuitos/tablas-circuitos-electricida. [Consulta: 12 de agosto de 2010].

7. FONDONORMA 200. *Código Eléctrico Nacional*. [en línea] www.docstoc.com/docs/31622100/Codigo-Electrico-Nacional-CODELECTRA-2004#. [Consulta: 20 de agosto de 2010].
8. FUENTES, Flavio. *Sistemas de puesta a tierra*. [en línea] www.es.scribd.com/doc/36564595/Sistemas-Puesta-a-Tierra. [Consulta: 09 de noviembre de 2010].
9. HARPER, Enríquez. *Fundamentos de instalaciones eléctricas de mediana y alta tensión*. 2a ed. México: LIMUSA, 2000. 509 p.
10. KLK Weld. *Soldadura aluminotérmica del cobre*. [en línea] www.klk.es/.../CATALOGO_SOLDADURA_ALUMINOTERMICA_COBRE. [Consulta: 11 de octubre de 2010].
11. LAZAR, Irwin. *Análisis y diseño de sistemas eléctricos para plantas industriales*. 2a ed. México: LIMUSA, 1998. 255 p.
12. MARTÍN, José Raúll. *Diseño de subestaciones eléctricas*. 2a ed. México: McGraw-Hill, 1992. 556 p.
13. MAZÁ GUERRA, Reyes B. *Análisis de la coordinación de aislamiento por sobretensiones externas en las líneas de 138 kV del área oriental del INDE*. Trabajo de graduación de Ing. Eléctrica. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 2006. 111 p.
14. MÉNDEZ NÁJERA, Jorge Mario. *Programa para el mantenimiento preventivo y diagnóstico en las subestaciones eléctricas Guatemala Norte, Guatemala Sur, Guatemala Este del INDE*. Trabajo de

graduación de Ing. Eléctrica. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1998. 148 p.

15. NTP 567. *Protección frente a cargas electrostáticas*. [en línea]
www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/.
[Consulta: 22 de abril de 2010].
16. OSPINA CASAS, Favio. *Tierras soporte de la seguridad eléctrica*. 4a ed.
Colombia: Seguridad Eléctrica, 2008. 278 p.
17. SAUCEDO Zavala, Roberto. *Introducción a las instalaciones eléctricas*.
[en línea]
www.books.google.com/.../Introducción_a_las_instalaciones_eléct.html?id. [Consulta: 02 de septiembre de 2010].

APÉNDICES


Apéndice 1. Carta de acceso a la subestación Guatemala Este



Fuente: Departamento de subestaciones Eléctricas. Guatemala Sur, INDE.

Apéndice 2. Carta al centro de investigaciones de ingeniería, USAC

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

Guatemala, 26 de abril de 2011

Ingeniera
Telma Marisela Cano Morales
Directora del Centro de Investigaciones
Facultad de Ingeniería, USAC.


Estimada Ingeniera Cano:

Reciba un cordial saludo deseando que sus actividades se desarrollen con éxito.

Por medio de la presente se le solicita su colaboración hacia el estudiante universitario de la carrera de Ingeniería Eléctrica, MIGUEL ANGEL AJÍN MONROY, con número de carné 199312983, tiene asignado como tema de Trabajo de graduación: ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN GUATEMALA ESTE, por lo cual requiere medir la resistividad del terreno en los alrededores de la subestación como parámetro de comparación, requiriendo como soporte la asesoría y acompañamiento técnico en el medio del departamento de METROLOGÍA, y tomando en cuenta todas las medidas de seguridad correspondientes. Agradeciendo de antemano el apoyo hacia los estudiantes de la carrera de Ingeniería Eléctrica.

Sin otro particular aprovecho para saludarle.



Atentamente,



Ing. Guillermo Antonio Puentes Romero
Director de la Escuela de Ingeniería
Mecánica Eléctrica, USAC.

AUTORIZADO
Ing. Telma Marisela Cano Morales
Directora CII / USAC

*Realización de OBDEU
DE TRABAJO NO COBRABLE
27/04/2011*



Escuelas: Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, Escuela de Ciencias, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hídricos (ERIS), Posgrado Maestría en Sistemas Mención Construcción y Mención Ingeniería Vial. Carreras: Ingeniería Mecánica, Ingenierías Electrónica, Ingeniería en Ciencias y Sistemas, Licenciatura en Matemática, Licenciatura en Física. Centros: de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESM), Guatemala, Ciudad Universitaria zona 12, Guatemala, Centro América

Fuente: Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, USAC.

Apéndice 3. Placa de un transformador, 230/69 kV

ANSALDO
ANSALDO COEMSA S.A.
TRANSFORMADOR

Nº DE SERIE: MANUAL DE INSTRUCCIONES: AÑO: Nº DE FASES:

TPO: NORMA: FRECUENCIA: Hz LÍQUIDO AISLANTE:

ELEVACIÓN MEDIA DE LA TEMPERATURA EN LOS DEVANADOS EN RÉGIMEN CONTINUO EN DA Y FA SOBRE MAJADA AMBIENTE DE 45°C °C
 ELEVACIÓN MÁXIMA DE LA TEMPERATURA DEL ACEITE EN RÉGIMEN CONTINUO EN DA Y FA SOBRE MAJADA AMBIENTE DE 45°C °C

TERMINALES	CLASE DE ENFRIAMIENTO	
	DA	FA
ALTA TENSIÓN	2800	8000
BAJA TENSIÓN	3000	6500
TERCIARIO	1300	2250

230/√3 ± 10x1,5% - 69/√3 - 13,8	
--	--

REPOSICIÓN	RELACION (kV)	BASE (MVA)
11.91	230/√3 - 69/√3	8000
21.12	230/√3 - 13,8	6000
7.39	69/√3 - 13,8	6000

	H1	H2	X1	X2	Y1	Y2
IMPULSO ONDA COMPLETA (kV)	1000	200	300	150	100	
TENSIÓN APLICADA (kV)	70	70	55	55	55	
TENSIÓN REDUCIDA 7200 CICLOS 0,00	400	70	140	50	50	
FRENTE DE ONDA	-	-	180	-	280	

* Volajes a 1700 metros sobre el nivel del mar.

DIAGRAMA DE CONEXIONES DEL BANCO Y_NWBT1

CAMBIO DE BAJA CARGA

MODELO	15	30	150	300
FABRICANTE	MAUCHENFELDER	MAUCHENFELDER	MAUCHENFELDER	MAUCHENFELDER

RELACION	LINEA
230 - SA	21 - 22
CLASE	0.38T B
EMPLEO	MEJICION

RELACION	LINEA
69 - SA	17 - 18
CLASE	C.280
EMPLEO	PROTECCION

RELACION	LINEA
230 - SA	17 - 18
CLASE	1.08T B
EMPLEO	MEJICION

RELACION	LINEA
230 - SA	17 - 18
CLASE	1.38T B
EMPLEO	PROTECCION

RELACION	LINEA
230 - SA	17 - 18
CLASE	1.38T B
EMPLEO	M. TERCIARIO

RELACION	LINEA
230 - SA	17 - 18
CLASE	1.38T B
EMPLEO	M. TERCIARIO

RELACION	LINEA
230 - SA	17 - 18
CLASE	1.38T B
EMPLEO	CCC

RELACION	LINEA
230 - SA	17 - 18
CLASE	1.38T B
EMPLEO	M. TERCIARIO

	AF	BF	F
ASIMÉTRICA (2 MEDIOSES) mA	5.1	14.5	52.2
ASIMÉTRICA (3 CICLOS) mA	2.8	26.2	133.0

LINEA EN HT	NEUTRO EN HT	TENSIÓN (kV)	CORRIENTE (A)	SEÑALA (SEÑALA)
10	+	264000/√3	261.4	435.4
11	+	261180/√3	258.8	431.2
12	+	257360/√3	256.2	427.0
13	+	253540/√3	253.6	422.8
14	+	249720/√3	251.0	418.6
15	+	245900/√3	248.4	414.4
16	+	242080/√3	245.8	410.2
17	+	238260/√3	243.2	406.0
18	+	234440/√3	240.6	401.8
19	+	230620/√3	238.0	397.6
20	+	226800/√3	235.4	393.4
21	+	222980/√3	232.8	389.2
22	+	219160/√3	230.2	385.0
23	+	215340/√3	227.6	380.8
24	+	211520/√3	225.0	376.6
25	+	207700/√3	222.4	372.4
26	+	203880/√3	219.8	368.2
27	+	200060/√3	217.2	364.0
28	+	196240/√3	214.6	359.8
29	+	192420/√3	212.0	355.6
30	+	188600/√3	209.4	351.4
31	+	184780/√3	206.8	347.2
32	+	180960/√3	204.2	343.0
33	+	177140/√3	201.6	338.8
34	+	173320/√3	199.0	334.6
35	+	169500/√3	196.4	330.4
36	+	165680/√3	193.8	326.2
37	+	161860/√3	191.2	322.0
38	+	158040/√3	188.6	317.8
39	+	154220/√3	186.0	313.6
40	+	150400/√3	183.4	309.4

LINEA EN BT	NEUTRO EN BT	TENSIÓN (V)	CORRIENTE (A)
10000/√3	979.8	1671.9	

LINEA EN VT Y2	CORRIENTE (A)
1300	883.1 / 1640.8

MATERIAL DE LOS CONDUCTORES DE LOS DEVANADOS: COBRE

ANSALDO COEMSA S.A.

CARGAS - RS CCG NO. 803928 / 881 - 38

INDUSTRIA BRABLERA

Fuente: placa de un transformador. Subestación Guatemala Este, INDE.

Apéndice 4. Conexiones de puesta a tierra en estructuras de acero



Conexión a una estructura de acero circular



Conexión a estructura de acero angular



Conexión en la pata de estructura de acero



Fosa de registro o monitoreo



Conexión en la puerta de acero



Canaleta de concreto

Fuente: subestación Guatemala Este, finca San Vicente km 18.5 a Santa Catarina Pínula.

Apéndice 5. **Equipo de una subestación eléctrica, lado de 230 kV**



INTERRUPTOR DE POTENCIA



SECCIONADOR TIPO PANTOGRAFO



PARARRAYOS



SECCIONADOR DE PUESTA A TIERRA

Fuente: subestación Guatemala Este, finca San Vicente km 18.5 a Santa Catarina Pinula.

ANEXOS

Anexo 1. Propiedades de los conductores eléctricos

Calibre (AWG ó kcmil)	Área		Conductores								Resistencia c.c. a 75° C (167° F)					
			Trenzado		Total		Cobre		Aluminio							
			Número de Hilos	Diámetro		Diámetro		Área (Sección)		No Recubiertos		Recubiertos				
				mm	polgadas	mm	polg.	mm ²	polg. ²	ohm/km	ohm/kpie	ohm/km	ohm/kpie			
18	0.823	1620	1	-	-	1.02	0.040	0.823	0.001	25.5	7.77	26.5	8.08	42.0	12.8	
18	0.823	1620	7	0.39	0.015	1.16	0.046	1.06	0.002	26.1	7.95	27.7	8.45	42.8	13.1	
16	1.31	2580	1	-	-	1.29	0.051	1.31	0.002	16.0	4.89	16.7	5.08	26.4	8.05	
16	1.31	2580	7	0.49	0.019	1.46	0.058	1.68	0.003	16.4	4.99	17.3	5.29	26.9	8.21	
14	2.08	4110	1	-	-	1.63	0.064	2.08	0.003	10.1	3.07	10.4	3.19	16.6	5.06	
14	2.08	4110	7	0.62	0.024	1.85	0.073	2.68	0.004	10.3	3.14	10.7	3.26	16.9	5.17	
12	3.31	6530	1	-	-	2.05	0.081	3.31	0.005	6.34	1.95	6.57	2.01	10.45	3.18	
12	3.31	6530	7	0.78	0.030	2.32	0.092	4.25	0.006	6.50	1.98	6.73	2.05	10.69	3.25	
10	5.261	10380	1	-	-	2.588	0.102	5.26	0.008	3.984	1.21	4.148	1.26	6.561	2.00	
10	5.261	10380	7	0.98	0.038	2.95	0.116	6.76	0.011	4.070	1.24	4.226	1.29	6.679	2.04	
8	8.367	16510	1	-	-	3.264	0.128	8.37	0.013	2.506	0.764	2.579	0.786	4.125	1.26	
8	8.367	16510	7	1.23	0.048	3.71	0.146	10.76	0.017	2.551	0.778	2.653	0.809	4.204	1.28	
6	13.30	26240	7	1.56	0.061	4.67	0.184	17.09	0.027	1.608	0.491	1.671	0.510	2.652	0.808	
4	21.15	41740	7	1.96	0.077	5.89	0.232	27.19	0.042	1.010	0.308	1.053	0.321	1.666	0.508	
3	26.67	52620	7	2.20	0.087	6.60	0.260	34.28	0.053	0.802	0.245	0.833	0.254	1.320	0.403	
2	33.62	66360	7	2.47	0.097	7.42	0.292	43.23	0.067	0.634	0.194	0.661	0.201	1.045	0.319	
1	42.41	83690	19	1.69	0.066	8.43	0.332	55.80	0.087	0.505	0.154	0.524	0.160	0.829	0.253	
10	55.49	105600	19	1.89	0.074	9.45	0.372	70.41	0.109	0.399	0.122	0.145	0.127	0.660	0.201	
20	67.43	133100	19	2.13	0.084	10.62	0.418	88.74	0.137	0.3170	0.0967	0.329	0.101	0.523	0.159	
30	85.01	167800	19	2.39	0.094	11.94	0.470	111.9	0.173	0.2512	0.0766	0.2610	0.0797	0.413	0.126	
40	107.2	211600	19	2.68	0.106	13.41	0.528	141.1	0.219	0.1996	0.0608	0.2050	0.0626	0.328	0.100	
250	--	--	37	2.09	0.082	14.61	0.575	168	0.260	0.1687	0.0515	0.1753	0.0535	0.2778	0.0847	
300	--	--	37	2.29	0.090	16.00	0.630	201	0.312	0.1409	0.0429	0.1463	0.0446	0.2318	0.0707	
350	--	--	37	2.47	0.097	17.30	0.681	235	0.364	0.1205	0.0367	0.1252	0.0382	0.1984	0.0605	

Calibre (AWG ó kcmil)	Área		Conductores								Resistencia c.c. a 75° C (167° F)					
			Trenzado		Total		Cobre		Aluminio							
			Número de Hilos	Diámetro		Diámetro		Área (Sección)		No Recubiertos		Recubiertos				
				mm	polgadas	mm	polg.	mm ²	polg. ²	ohm/km	ohm/kpie	ohm/km	ohm/kpie			
400	--	--	37	2.64	0.104	18.49	0.738	268	0.416	0.1053	0.0321	0.1084	0.0331	0.1737	0.0529	
500	--	--	37	2.95	0.116	20.65	0.813	336	0.510	0.0845	0.0258	0.0869	0.0265	0.1391	0.0424	
600	--	--	61	2.52	0.099	22.68	0.893	404	0.626	0.0704	0.0214	0.0732	0.0223	0.1159	0.0353	
700	--	--	61	2.72	0.107	24.49	0.964	471	0.730	0.0603	0.0184	0.0622	0.0189	0.0994	0.0303	
750	--	--	61	2.82	0.111	25.33	0.998	503	0.782	0.0563	0.0171	0.0579	0.0176	0.0927	0.0282	
800	--	--	61	2.91	0.114	26.16	1.030	538	0.834	0.0528	0.0161	0.0544	0.0166	0.0868	0.0265	
900	--	--	61	3.09	0.122	27.79	1.094	606	0.940	0.0470	0.0143	0.0481	0.0147	0.0770	0.0235	
1000	--	--	61	3.25	0.128	29.26	1.152	673	1.042	0.0423	0.0129	0.0434	0.0132	0.0695	0.0212	
1250	--	--	91	2.98	0.117	32.74	1.289	842	1.305	0.0338	0.0103	0.0347	0.0106	0.0554	0.0169	
1500	--	--	91	3.26	0.128	35.86	1.412	1011	1.566	0.02814	0.00858	0.02814	0.00883	0.0464	0.0141	
1750	--	--	127	2.98	0.117	38.76	1.526	1180	1.829	0.02410	0.00735	0.02410	0.00756	0.0397	0.0121	
2000	--	--	127	3.19	0.126	41.43	1.632	1349	2.092	0.02109	0.00643	0.02109	0.00662	0.0348	0.0106	

Fuente: FONDONORMA 200. Código Eléctrico Nacional. P. 705 y 706.

Notas:

- Estos valores de resistencia son válidos solamente para los parámetros indicados. Cuando se utilizan conductores de trenzados revestidos, tipo de trenzado diferente y, sobre todo, otras temperaturas, los valores de resistencia cambian.
- La fórmula para el cambio de temperaturas es: $R_2 = R_1 [1 + \alpha (T_2 - 75)]$, donde $\alpha = 0,00323$ para el cobre y $0,00330$ para el aluminio, ambos a 75°C .
- Los conductores con trenzado compacto y comprimido tienen aproximadamente un 9% y un 3% respectivamente, los diámetros por debajo de los conductores desnudos que aparecen en la tabla.
- Conductividad aplicada, según IACS: cobre desnudo = 100%, aluminio = 61%.
- EL trenzado de clase B está listado también como sólido para algunos calibres. Su diámetro total y su sección se refieren a la circunferencia circunscrita.

Los datos sobre construcción de los cables proceden de NEMA WC8-1992 o ANSI/UL 1581-1998. La resistencia se calcula según el *Handbook 100* de la *National Bureau of Standards* (1966) y el *Handbook 109* (1972).

Anexo 2. Resistencia y reactancia de corriente alterna para cables de 600 V, 3 fases, 60 Hz, 75 °C (167 °F)

Calibre (AWG ó kcmil)	Omnios al Neutro por EM Omnios al Neutro por 1000 pies														Calibre (AWG ó kcmil)		
	X_L Reactancia de Conductores	Resistencia ca de Conductores de Cobre Sin Recubrir						Resistencia de ca de Conductores de Aluminio			Impedancia Z Eficaz a FF = 0,85 de Conductores de Cobre Sin Recubrir			Impedancia (Z) Eficaz a FF = 0,85 para Conductores de Aluminio			
		Ductos de PVC y Aluminio		Ductos de PVC		Ductos de Acero		Ductos de PVC	Ductos de Aluminio	Ductos de Acero	Ductos de PVC	Ductos de Aluminio	Ductos de Acero	Ductos de PVC		Ductos de Aluminio	Ductos de Acero
14	0.180	0.240	10.2	10.2	10.2	-	-	-	8.9	8.9	8.9	-	-	-	14		
	0.058	0.073	3.1	3.1	3.1	-	-	-	2.7	2.7	2.7	-	-	-			
12	0.177	0.223	6.6	6.6	6.6	10.5	10.5	10.5	5.6	5.6	5.6	9.3	9.2	9.2	12		
	0.054	0.068	2.0	2.0	2.0	3.2	3.2	3.2	1.7	1.7	1.7	2.8	2.8	2.8			
10	0.164	0.207	3.9	3.9	3.9	6.6	6.6	6.6	3.6	3.6	3.6	5.9	5.9	5.9	10		
	0.050	0.063	1.2	1.2	1.2	2.0	2.0	2.0	1.1	1.1	1.1	1.8	1.8	1.8			
8	0.171	0.213	2.56	2.56	2.56	4.3	4.3	4.3	2.26	2.26	2.30	3.6	3.6	3.6	8		
	0.052	0.065	0.78	0.78	0.78	1.3	1.3	1.3	0.69	0.69	0.70	1.1	1.1	1.1			
6	0.167	0.210	1.61	1.61	1.61	2.66	2.66	2.66	1.44	1.48	1.48	2.33	2.36	2.36	6		
	0.051	0.064	0.49	0.49	0.49	0.81	0.81	0.81	0.44	0.45	0.45	0.71	0.72	0.72			
4	0.137	0.197	1.02	1.02	1.02	1.67	1.67	1.67	0.95	0.95	0.98	1.51	1.51	1.51	4		
	0.048	0.060	0.31	0.31	0.31	0.51	0.51	0.51	0.29	0.29	0.30	0.46	0.46	0.46			
3	0.154	0.194	0.82	0.82	0.82	1.31	1.35	1.31	0.75	0.79	0.79	1.21	1.21	1.21	3		
	0.047	0.059	0.25	0.25	0.25	0.40	0.41	0.40	0.23	0.24	0.24	0.37	0.37	0.37			
2	0.148	0.187	0.62	0.66	0.66	1.05	1.05	1.05	0.62	0.62	0.66	0.98	0.98	0.98	2		
	0.045	0.057	0.19	0.20	0.20	0.32	0.32	0.32	0.19	0.19	0.20	0.30	0.30	0.30			
1	0.151	0.187	0.49	0.52	0.52	0.82	0.85	0.82	0.52	0.52	0.52	0.79	0.79	0.82	1		
	0.046	0.057	0.15	0.16	0.16	0.25	0.26	0.25	0.16	0.16	0.16	0.24	0.24	0.25			
1/0	0.144	0.180	0.39	0.43	0.39	0.66	0.69	0.66	0.43	0.43	0.43	0.62	0.66	0.66	1/0		
	0.044	0.055	0.12	0.13	0.12	0.20	0.21	0.20	0.13	0.13	0.13	0.19	0.20	0.20			
	0.141	0.177	0.33	0.33	0.33	0.52	0.52	0.52	0.36	0.36	0.36	0.52	0.52	0.52	2/0		

Fuente: FONDONORMA 200. Código Eléctrico Nacional. P. 708.

Anexo 3. **Continuación: resistencia y reactancia de corriente alterna para cables de 600 V, 3 fases, 60 Hz, 75 °C (167 °F)**

Calibre (AWG o kcmil)	Ohmios al Neutro por Kilometro Ohmios al Neutro por 1000 pies															Calibre (AWG o kcmil)				
	X _L Reactancia de Conductores	Resistencia de Conductores de Cobre Sin Recubrir					Resistencia de ca de Conductores de Aluminio					Impedancia Z Eficaz a FP = 0,85 de Conductores de Cobre Sin Recubrir			Impedancia (Z) Eficaz a FP = 0,85 para Conductores de Aluminio					
		Ductos de PVC y Aluminio		Ductos de PVC		Ductos de Aluminio		Ductos de PVC		Ductos de Aluminio		Ductos de PVC		Ductos de Aluminio			Ductos de PVC		Ductos de Aluminio	
		Ductos de PVC y Aluminio	Ductos de PVC	Ductos de Aluminio	Ductos de PVC	Ductos de Aluminio	Ductos de PVC	Ductos de Aluminio	Ductos de PVC	Ductos de Aluminio	Ductos de PVC	Ductos de Aluminio	Ductos de PVC	Ductos de Aluminio	Ductos de PVC		Ductos de Aluminio			
30	0,138 0,042	0,171 0,052	0,253 0,077	0,269 0,082	0,259 0,079	0,43 0,13	0,43 0,13	0,43 0,13	0,289 0,088	0,302 0,092	0,308 0,094	0,43 0,13	0,43 0,13	0,46 0,14	30					
40	0,135 0,041	0,167 0,051	0,203 0,062	0,220 0,067	0,207 0,063	0,33 0,10	0,36 0,11	0,33 0,10	0,243 0,074	0,256 0,078	0,262 0,080	0,36 0,11	0,36 0,11	0,36 0,11	40					
250	0,135 0,041	0,171 0,052	0,171 0,052	0,187 0,057	0,177 0,054	0,279 0,085	0,295 0,090	0,282 0,086	0,217 0,066	0,230 0,070	0,240 0,073	0,308 0,094	0,322 0,098	0,33 0,10	250					
300	0,135 0,041	0,167 0,051	0,144 0,044	0,161 0,049	0,148 0,045	0,233 0,071	0,249 0,076	0,236 0,072	0,194 0,059	0,207 0,063	0,215 0,065	0,269 0,082	0,282 0,086	0,289 0,088	300					
350	0,131 0,040	0,164 0,050	0,125 0,038	0,141 0,043	0,128 0,039	0,200 0,061	0,217 0,066	0,207 0,063	0,174 0,053	0,190 0,058	0,197 0,060	0,240 0,073	0,253 0,077	0,262 0,080	350					
400	0,131 0,040	0,161 0,049	0,108 0,033	0,125 0,038	0,115 0,035	0,177 0,054	0,194 0,059	0,180 0,055	0,161 0,049	0,174 0,053	0,184 0,056	0,217 0,066	0,233 0,071	0,240 0,073	400					
500	0,128 0,039	0,157 0,048	0,089 0,027	0,105 0,032	0,095 0,029	0,141 0,043	0,157 0,048	0,148 0,045	0,141 0,043	0,157 0,048	0,164 0,050	0,187 0,057	0,200 0,061	0,210 0,064	500					
600	0,128 0,039	0,157 0,048	0,075 0,023	0,092 0,028	0,082 0,025	0,118 0,036	0,135 0,041	0,125 0,038	0,131 0,040	0,144 0,044	0,154 0,047	0,167 0,051	0,180 0,055	0,190 0,058	600					
750	0,125 0,038	0,157 0,048	0,062 0,019	0,079 0,024	0,069 0,021	0,095 0,029	0,112 0,034	0,102 0,031	0,118 0,036	0,131 0,040	0,141 0,043	0,148 0,045	0,161 0,049	0,171 0,052	750					
	0,121	0,151	0,049	0,062	0,059	0,075	0,089	0,082	0,105	0,118	0,131	0,128	0,138	0,151						

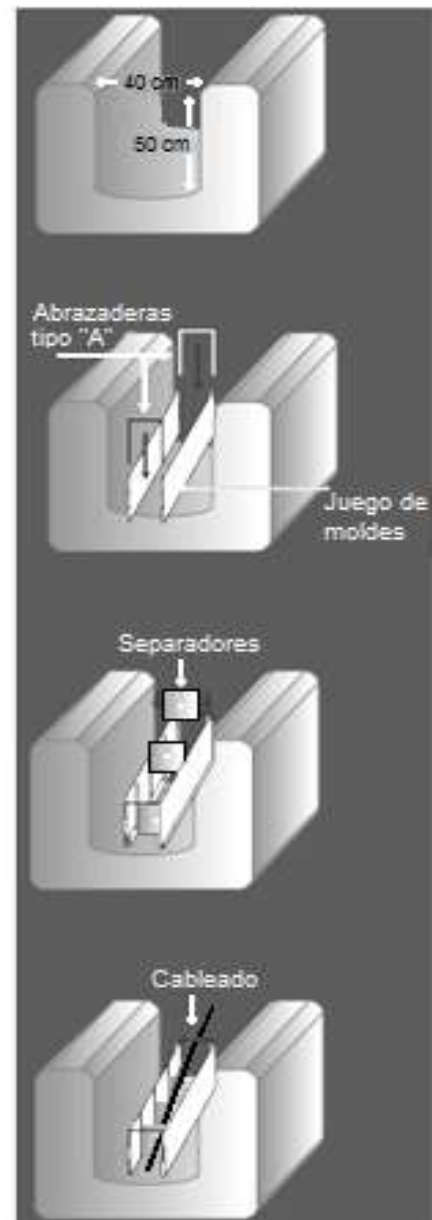
Fuente: FONDONORMA 200. Código Eléctrico Nacional. P. 709.

Anexo 4. **Constantes de los materiales**

Descripción	Conductividad del material (%)	Factor α a 20 °C	K _α al 0 °C [0 °C]	Temperatura de fusión T _m (°C)	ρ _v 20 °C (μΩ cm)	Factor de capacidad térmica por unidad de volumen [d] TCAP [J/(cm ³ ·°C)]
Cobre recocido suave – inmersión	100,0	0,00393	234	1083	1,72	3,42
Cobre comercial inmersión – dura	97,0	0,00361	242	1084	1,78	3,42
Cobre revestido alambre de acero	40,0	0,00376	245	1084	4,40	3,85
Cable revestido alambre de acero	30,0	0,00378	245	1084	5,86	3,85
Cable revestido barra de acero	20,0	0,00378	245	1084	8,62	3,85
Acero 1020	10,0	0,00160	605	1510	15,90	3,26
Acero revestido barra de acero	9,8	0,00160	605	1400	17,50	4,44
Zinc bañado barra de acero	8,6	0,00320	293	419	20,10	3,93
Acero inoxidable 304	2,4	0,00130	749	1400	72,00	4,03

Fuente: www.ruelsa.com/.../tierras/pea0NRF_011_Sistema_de_Tierra_Plantas...

Anexo 5. **Muestra representativa de la forma de intensificar un suelo**



Fuente: http://www.altaconductividad2000.com.mx/ver_gap/cable.php. Consulta: 25 marzo de 2011.

Pasos a seguir al momento de instalar un cable horizontal:

- Excavar una zanja de 30 a 40 cm de ancho por 50 cm, de profundidad.
- Colocar los moldes guía.
- Instalar los soportes separadores del cable.
- Mezclar el intensificador con agua al 80% y rellenar con tierra a los costados del molde.

Para la varilla vertical o electrodo:

- Excavar un pozo cilíndrico de 1,60 m de profundidad y un diámetro de 40 a 45 cm, aproximadamente.
- Clavar la varilla al centro de la perforación, hasta llegar a 30 o 40 cm, abajo del nivel del terreno.
- Vaciar la mezcla en el contenedor y luego rellenar el hueco entre el contenedor y la perforación con la misma tierra que se extrajo.

Anexo 6. Valores de k en función de μ , para el método de la pendiente

μ	k	μ	k	μ	k	μ	k	μ	k
0,01	0,6932	0,39	0,6446	0,77	0,5856	1,15	0,5071	1,53	0,3740
0,02	0,6921	0,40	0,6432	0,78	0,5838	1,16	0,5046	1,54	0,3688
0,03	0,6909	0,41	0,6418	0,79	0,5821	1,17	0,5020	1,55	0,3635
0,04	0,6898	0,42	0,6404	0,80	0,5803	1,18	0,4994	1,56	0,3580
0,05	0,6886	0,43	0,6390	0,81	0,5785	1,19	0,4968	1,57	0,3523
0,06	0,6874	0,44	0,6375	0,82	0,5767	1,20	0,4941	1,58	0,3465
0,07	0,6862	0,45	0,6361	0,83	0,5749	1,21	0,4914	1,59	0,3404
0,08	0,6850	0,46	0,6346	0,84	0,5731	1,22	0,4887	1,60	0,3342
0,09	0,6838	0,47	0,6331	0,85	0,5712	1,23	0,4859	1,61	0,3278
0,10	0,6826	0,48	0,6317	0,86	0,5693	1,24	0,4831	1,62	0,3211
0,11	0,6814	0,49	0,6302	0,87	0,5675	1,25	0,4802	1,63	0,3143
0,12	0,6801	0,50	0,6287	0,88	0,5656	1,26	0,4773	1,64	0,3071
0,13	0,6789	0,51	0,6272	0,89	0,5637	1,27	0,4743	1,65	0,2997
0,14	0,6777	0,52	0,6258	0,90	0,5618	1,28	0,4713	1,66	0,2920
0,15	0,6764	0,53	0,6243	0,91	0,5598	1,29	0,4683	1,67	0,2840
0,16	0,6752	0,54	0,6228	0,92	0,5579	1,30	0,4652	1,68	0,2758
0,17	0,6739	0,55	0,6212	0,93	0,5559	1,31	0,4620	1,69	0,2669
0,18	0,6727	0,56	0,6197	0,94	0,5539	1,32	0,4588	1,70	0,2578
0,19	0,6714	0,57	0,6182	0,95	0,5519	1,33	0,4556	1,71	0,2483
0,20	0,6701	0,58	0,6167	0,96	0,5499	1,34	0,4522	1,72	0,2383
0,21	0,6688	0,59	0,6151	0,97	0,5479	1,35	0,4489	1,73	0,2278
0,22	0,6675	0,60	0,6136	0,98	0,5458	1,36	0,4454	1,74	0,2167
0,23	0,6662	0,61	0,6120	0,99	0,5437	1,37	0,4419	1,75	0,2051
0,24	0,6649	0,62	0,6104	1,00	0,5416	1,38	0,4383	1,76	0,1928
0,25	0,6636	0,63	0,6088	1,01	0,5395	1,39	0,4346	1,77	0,1797
0,26	0,6623	0,64	0,6072	1,02	0,5373	1,40	0,4309	1,78	0,1658
0,27	0,6610	0,65	0,6056	1,03	0,5352	1,41	0,4271	1,79	0,1511
0,28	0,6597	0,66	0,6040	1,04	0,5330	1,42	0,4232	1,80	0,1352
0,29	0,6583	0,67	0,6024	1,05	0,5307	1,43	0,4192	1,81	0,1183
0,30	0,6570	0,68	0,6008	1,06	0,5285	1,44	0,4152	1,82	0,1000
0,31	0,6556	0,69	0,5991	1,07	0,5262	1,45	0,4111	1,83	0,0803
0,32	0,6543	0,70	0,5975	1,08	0,5239	1,46	0,4068	1,84	0,0588
0,33	0,6529	0,71	0,5958	1,09	0,5216	1,47	0,4025	1,85	0,0353
0,34	0,6516	0,72	0,5941	1,10	0,5193	1,48	0,3980		
0,35	0,6502	0,73	0,5924	1,11	0,5169	1,49	0,3935		
0,36	0,6488	0,74	0,5907	1,12	0,5144	1,50	0,3888		
0,37	0,6474	0,75	0,5890	1,13	0,5121	1,51	0,3840		
0,38	0,6460	0,76	0,5873	1,14	0,5096	1,52	0,3791		

Por ejemplo, para $\mu = 1,158$ corresponde un valor de $k = 0,5051$

Fuente: CASAS, Favio. Tierras soporte de la seguridad eléctrica. P. 216.

Anexo 7. Potenciales estándar de reducción a 25 °C*

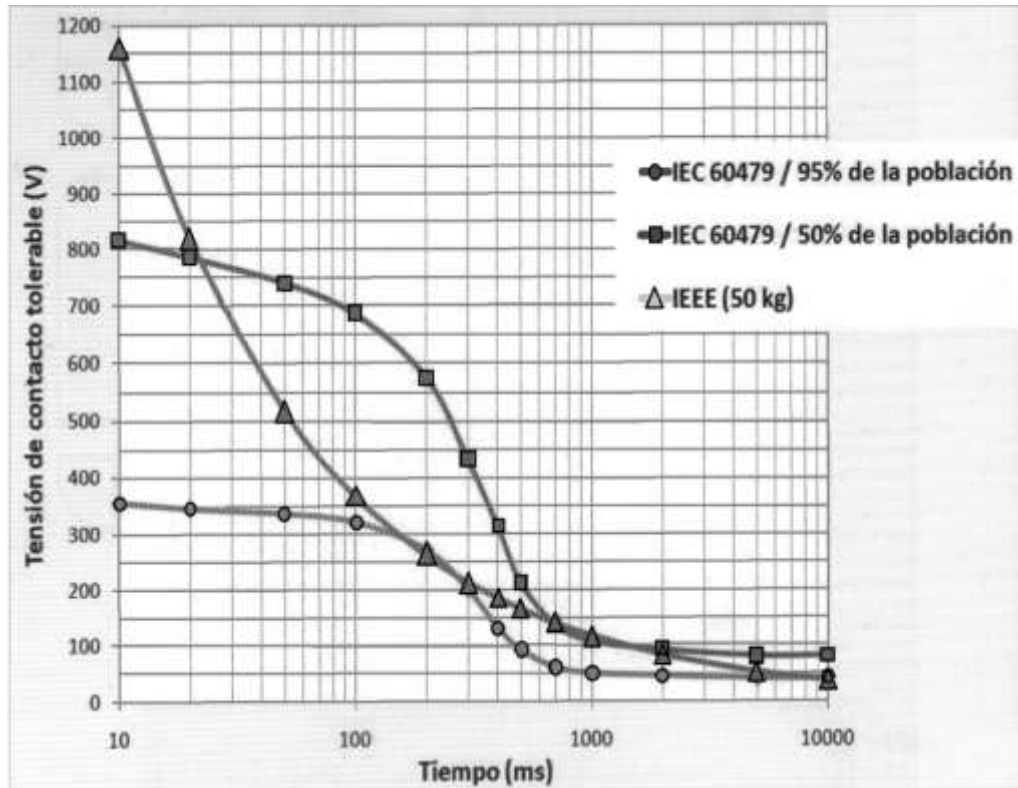
Semirreacción	\mathcal{E}° (v)
$\text{Li}^+(ac) + e^- \longrightarrow \text{Li}(s)$	-3.05
$\text{K}^+(ac) + e^- \longrightarrow \text{K}(s)$	-2.93
$\text{Ba}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Ba}(s)$	-2.90
$\text{Sr}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Sr}(s)$	-2.89
$\text{Ca}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Ca}(s)$	-2.87
$\text{Na}^+(ac) + e^- \longrightarrow \text{Na}(s)$	-2.71
$\text{Mg}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Mg}(s)$	-2.37
$\text{Be}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Be}(s)$	-1.85
$\text{Al}^{3+}(ac) + 3e^- \longrightarrow \text{Al}(s)$	-1.66
$\text{Mn}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Mn}(s)$	-1.18
$2\text{H}_2\text{O} + 2e^- \longrightarrow \text{H}_2(g) + 2\text{OH}^-(ac)$	-0.83
$\text{Zn}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Zn}(s)$	-0.76
$\text{Cr}^{3+}(ac) + 3e^- \longrightarrow \text{Cr}(s)$	-0.74
$\text{Fe}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Fe}(s)$	-0.44
$\text{Cd}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Cd}(s)$	-0.40
$\text{PbSO}_4(s) + 2e^- \longrightarrow \text{Pb}(s) + \text{SO}_4^{2-}(ac)$	-0.31
$\text{Co}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Co}(s)$	-0.28
$\text{Ni}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Ni}(s)$	-0.25
$\text{Sn}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Sn}(s)$	-0.14
$\text{Pb}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Pb}(s)$	-0.13
$2\text{H}^+(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{H}_2(g)$	0.00
$\text{Sn}^{4+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Sn}^{2+}(ac)$	+0.13
$\text{Cu}^{2+}(ac) + e^- \longrightarrow \text{Cu}^+(ac)$	+0.15
$\text{SO}_4^{2-}(ac) + 4\text{H}^+(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{SO}_2(g) + 2\text{H}_2\text{O}$	+0.20
$\text{AgCl}(s) + e^- \longrightarrow \text{Ag}(s) + \text{Cl}^-(ac)$	+0.22
$\text{Cu}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Cu}(s)$	+0.34
$\text{O}_2(g) + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^- \longrightarrow 4\text{OH}^-(ac)$	+0.40
$\text{I}_2(s) + 2e^- \longrightarrow 2\text{I}^-(ac)$	+0.53
$\text{MnO}_4^-(ac) + 2\text{H}_2\text{O} + 3e^- \longrightarrow \text{MnO}_2(s) + 4\text{OH}^-(ac)$	+0.59
$\text{O}_2(g) + 2\text{H}^+(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O}_2(ac)$	+0.68
$\text{Fe}^{3+}(ac) + e^- \longrightarrow \text{Fe}^{2+}(ac)$	+0.77
$\text{Ag}^+(ac) + e^- \longrightarrow \text{Ag}(s)$	+0.80
$\text{Hg}_2^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow 2\text{Hg}(l)$	+0.85
$2\text{Hg}^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Hg}_2^{2+}(ac)$	+0.92
$\text{NO}_3^-(ac) + 4\text{H}^+(ac) + 3e^- \longrightarrow \text{NO}(g) + 2\text{H}_2\text{O}$	+0.96
$\text{Br}_2(l) + 2e^- \longrightarrow 2\text{Br}^-(ac)$	+1.07
$\text{O}_2(g) + 4\text{H}^+(ac) + 4e^- \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	+1.23
$\text{MnO}_2(s) + 4\text{H}^+(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{Mn}^{2+}(ac) + 2\text{H}_2\text{O}$	+1.23
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}(ac) + 14\text{H}^+(ac) + 6e^- \longrightarrow 2\text{Cr}^{3+}(ac) + 7\text{H}_2\text{O}$	+1.33
$\text{Cl}_2(g) + 2e^- \longrightarrow 2\text{Cl}^-(ac)$	+1.36
$\text{Au}^{3+}(ac) + 3e^- \longrightarrow \text{Au}(s)$	+1.50
$\text{MnO}_4^-(ac) + 8\text{H}^+(ac) + 5e^- \longrightarrow \text{Mn}^{2+}(ac) + 4\text{H}_2\text{O}$	+1.51
$\text{Ce}^{4+}(ac) + e^- \longrightarrow \text{Ce}^{3+}(ac)$	+1.61
$\text{PbO}_2(s) + 4\text{H}^+(ac) + \text{SO}_4^{2-}(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{PbSO}_4(s) + 2\text{H}_2\text{O}$	+1.70
$\text{H}_2\text{O}_2(ac) + 2\text{H}^+(ac) + 2e^- \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	+1.77
$\text{Co}^{3+}(ac) + e^- \longrightarrow \text{Co}^{2+}(ac)$	+1.82
$\text{O}_3(g) + 2\text{H}^+(ac) + 2e^- \longrightarrow \text{O}_2(g) + \text{H}_2\text{O}(l)$	+2.07
$\text{F}_2(g) + 2e^- \longrightarrow 2\text{F}^-(ac)$	+2.87

Poder oxidante creciente
Poder reductor creciente

*Para todas las semirreacciones la concentración de las especies disueltas es 1 M y la presión es 1 atm para los gases.
 \mathcal{E}° , son los electrón volts.

Fuente: CHANG, Raymond. Química. P. 783.

Anexo 8. Valores máximos normalizados de tensión de contacto



Fuente: CASAS, Favio. Tierras soporte de la seguridad eléctrica. P. 52.

La máxima tensión de contacto para un ser humano se muestra en el anexo 9:

- La segunda columna, aplica a sitios con acceso al público en general y fue obtenida a partir de la norma IEC 60479.
- La columna tres, aplica para instalaciones de media, alta y extra alta tensión, donde se tenga la presencia de personal que conoce el riesgo y está dotado de elementos de protección personal.

- Para el cálculo se toman en cuenta los criterios establecidos en la IEEEE 80, tomando como base la ecuación, para un ser humano de 50 kilos.

Anexo 9. **Máxima tensión de contacto para un ser humano**

Tiempo de despeje de la falla	Máxima tensión de contacto admisible (rms c.a) según IEC para el 95% de la población. (Público en general)	Máxima tensión de contacto admisible (rms c.a) según IEEEE 50 kg (Ocupacional)
Mayor a dos segundos	50 V	82 V
Un segundo	55 V	116 V
700 milisegundos	70 V	138 V
500 milisegundos	80 V	164 V
400 milisegundos	130 V	183 V
300 milisegundos	200 V	211 V
200 milisegundos	270 V	259 V
150 milisegundos	300 V	299 V
100 milisegundos	320 V	366 V
50 milisegundos	345 V	518 V

Fuente: www.portalelectricos.com/retie/cap2art15.php. Consulta: 06 de julio de 2011.

Niveles isoceráunicos nacionales: un parámetro de medida que está expresado en “días de tormenta por año” en una región determinada. Estas gráficas de niveles se obtienen en las estaciones meteorológicas que llevan un registro diario y horario de valores de los fenómenos de tormentas en las diferentes regiones en estudio. El Instituto de Sismología Vulcanología, Meteorología e Hidrología “INSIVUMEH”, es el encargado en Guatemala, de llevar esos registros.

El período de mayor actividad eléctrica es entre mayo y septiembre. La región más afectada es la costa sur, Huehuetenango y parte del Quiché, con un promedio de 116, 97 y 92 tormentas por año (ver anexo 10).

Anexo 10. Mapa isoceráunico del territorio de Guatemala



Fuente: www.insivumeh.gob.gt/.../Atlas_Clima.htm. [Consulta: julio de 2011].

