



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PROPUESTA DE DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN
CONTRA FALLAS DE ORIGEN ATMOSFÉRICO EN ESTACIONES
DE COMUNICACIONES**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

Jorge Alberto Noé Rondón

ASESOR: Oscar Melgarejo Ponte

Lima, diciembre del 2009

Índice

Resumen	4
Dedicatoria	6
Lista de abreviaturas.....	7
Capítulo I	8
ANTECEDENTES.....	8
1.1 Introducción.....	8
1.2 Objetivos Generales	9
1.3 Objetivos Específicos	9
Capítulo 2	10
SUSTENTO TEÓRICO	10
2.1 Introducción.....	10
2.3 El fenómeno del Rayo	10
2.3.1 Rayo (Lightning)	10
2.3.2 Parámetros de registro del rayo para el diseño de la Protección	10
2.3.3 Dimensionamiento de los conductores.....	15
2.4 Protección Exterior	16
2.4.1 Sistemas de captación	17
2.4.1.1 Método de la esfera rodante para protección contra rayos	17
2.4.1.2 Método de Ángulo de Protección.....	20
2.4.1.3 Método de Enmallado para Protección contra Rayos	21
2.4.2 Sistemas de conductores bajantes	22
2.4.2.1 Construcción de las bajantes.....	24
2.4.3 Sistemas de Puesta a Tierra	25
2.4.3.1 Resistividad aparente y estratificación del terreno	26
2.4.3.2 Requisitos Mínimos	26
2.4.3.3 Funciones.....	26
2.5 Protección Interior	28
2.5.1 Dispositivo contra Sobretensiones (DPS)	29
2.6 Sistemas Equipotenciales.....	29
2.6.1 Aislamiento eléctrico de los sistemas de protección	30
Capítulo 3	31
CONSIDERACIONES, MODELOS Y DISEÑOS.....	31
3.1 Consideraciones.....	31

3.1.1	Consideraciones de Diseño.....	31
3.1.2	Consideraciones Generales de Modelamiento	31
3.2	Diseño del Sistema de Apantallamiento	32
3.2.1	Apantallamientos.....	33
3.2.2	Barrajes y kit de tierras.....	34
3.2.3	Vientos de la Torre	35
3.2.4	Cercos Metálicos.....	36
3.3	Diseño del Sistema de Puesta a Tierra.....	36
3.4	Diseño del Sistema de Protección Eléctrica, Electrónica	40
3.4.1	Subestación tipo.....	40
3.4.2	Protección interior	42
3.4.3	Conexiones a tierra y equipotencialización interior	43
3.4.4	Barrajes de tierra interior	45
3.4.5	Filtros y protecciones.....	45
3.4.6	Requisitos mínimos para la Protección del Transmisor	46
3.4.7	Kit de tierras interior	48
3.5	Energía de Respaldo para el transformador	49
3.5.1	Paneles Solares	49
3.5.2	Baterías.....	49
3.5.3	Generadores	50
Capítulo 4		52
SIMULACION Y DISEÑO DE APLICACIÓN GENERAL		52
4.1	ANÁLISIS DE RESISTIVIDAD	52
4.2	CARACTERIZACIÓN DEL TERRENO.....	53
4.3	DISEÑO DE PUESTA A TIERRA.....	54
4.4	PROTECCIÓN EXTERIOR CONTRA RAYOS.....	55
4.4.1	DISEÑO DE UBICACIÓN DE PARARRAYOS.....	56
4.4.2	DETALLES DE CADA ELEMENTO IMPLEMENTADO	57
4.5	PROTECCIÓN INTERIOR CONTRA RAYOS.....	61
CONCLUSIONES		63
BIBLOGRAFÍA.....		66

Resumen

Los sistemas de protección contra fallas de origen atmosféricos; provocados principalmente por los rayos deben ser diseñados para evitar daños a las personas y sus propiedades.

Estos sistemas de protección también tienen mucha importancia debido al incremento en el uso de equipos que son cada vez más sofisticados, de alto costo y gran valor intrínseco. Equipos de cómputo, sistemas de voz y datos, que no pueden dejar de funcionar porque esto redundaría en grandes pérdidas tanto económicas como de confiabilidad para sus usuarios.

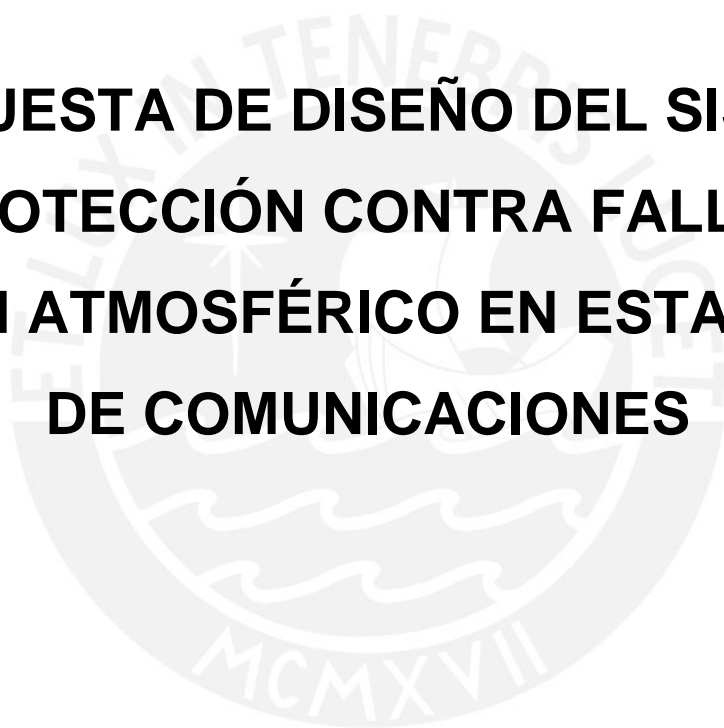
La idea de protección contra fallos de origen atmosférico está comúnmente asociada a colocar un pararrayo con su propia puesta a tierra.

Generalmente la idea de puesta a tierra la asociamos a una barra conductora de la electricidad colocada en un hoyo, a donde se deben conectar las "carcasas" de los equipos a proteger.

Siendo estos sistemas de gran importancia, en muchos casos son implementados sin la realización de los estudios que los justifiquen, razón por la cual cuando deben actuar como protección no lo hacen; produciéndose consecuencias funestas, que no solo traen la falla de equipos, sino también, pérdida de vidas humanas en el peor de los casos.

Estas malas prácticas felizmente ya están cambiando y mejorando, la presente tesis se plantea como objetivo mostrar el diseño y la implementación adecuada de un Sistema de protección contra fallos de origen atmosférico para estaciones de comunicación, basado en la Normatividad Nacional e internacional.

PROPUESTA DE DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA FALLAS DE ORIGEN ATMOSFÉRICO EN ESTACIONES DE COMUNICACIONES

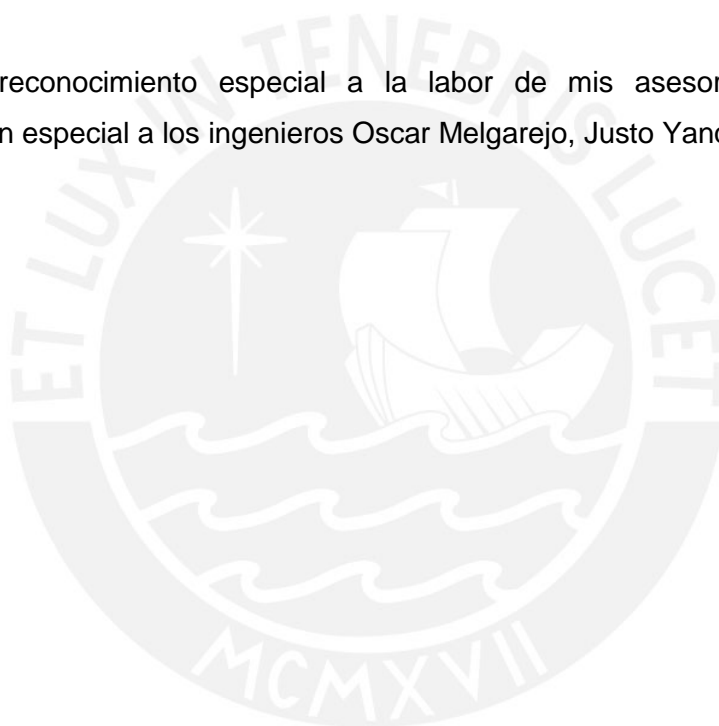


Dedicatoria

Esta tesis la dedico al esfuerzo, fuerza y amor transmitido y bien orientado por mis padres, a mi tierna y extraordinaria mamá doña Amelia Rondón de Noé y a mi papá don Guillermo Armando Noé Campos, así como a todos mis familiares y amigos.

Dedico también este trabajo al amor de mi vida y dulce compañera a Elizabeth Wharton Cruz

Finalmente un reconocimiento especial a la labor de mis asesores, profesores y colaboradores, en especial a los ingenieros Oscar Melgarejo, Justo Yanque y Favio Casas Ospina.



Lista de abreviaturas

BE	Barraje Equipotencial
BIL	Nivel básico al impulso (por sus siglas en ingles)
BN	Barraje de neutro
CPT	Conductor de puesta a tierra para equipos
c.a	Corriente alterna
c.c	Corriente continua
CEM	Compatibilidad electromagnética
CTP	Conductor de tierra paralelo
DPS	Dispositivo de protección contra sobretensiones transitorias
EMC	Compatibilidad electromagnética.
EMI	Interferencia electromagnética
Fem	Fuerza electromotriz
GRP	Máxima elevación del potencial de tierra
I	Corriente
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Engineer electricity and electronic
kV	Kilovoltios
kVA	Kilovoltamperios
LT	Línea de transmisión
MC	Modo común
MD	Modo diferencial
μ	Micro (10^{-6})
NEC	National Electrical Code (NFPA 70).
NESC	National Electrical Safety Code
PE	Perturbación electromagnética.
PN	Punto neutro.
PT	Puesta a Tierra
RPT	Resistencia de puesta a tierra
SIPRA	Sistema Integral de Protección Contra Rayos
S/E	Subestación
SPT	Sistema de Puesta a Tierra
UPS	Sistema de alimentación interrumpida (por sus siglas en inglés)

Capítulo I

ANTECEDENTES

1.1 Introducción

Los Sistemas de Protección contra rayos, han cobrado una mayor relevancia en los últimos años, debido a la utilización de equipos eléctricos y electrónicos, cada vez más sofisticados y sensibles a perturbaciones electromagnéticas.

Los Sistemas de Protección, tienen como objetivo proteger la vida humana y equipos en general, para la cual no se escatima en presupuestos y se busca que cuando los sistemas de protección sean requeridos, protejan adecuadamente, sin lamentar ninguna pérdida humana, pudiendo si, reparar las pérdidas materiales.

Las Puestas a Tierra, cada vez más exigidas ya no son vistas como lo último en un proyecto, hoy hablar de Puestas a Tierra, es tratar un tema prioritario, como parte de los Sistemas de Protección.

Generalmente:

- La idea de Puesta a Tierra la asociamos a:
Una barra colocada en un hoyo con materiales especiales, donde se puede conectar puntos a tierra y de tener varias necesidades de tierra, realizan varios de estos sistemas. Cuando uno de no es suficiente, pues no da el valor correcto, se adicionan tantos más hasta lograr el valor requerido. En el tiempo, si el valor de resistencia se eleva simplemente se le agrega agua y material de mejoramiento hasta lograr el valor solicitado.

- La Idea de Protección contra Rayos esta asociada a:
Colocar un pararrayo con su propia puesta a tierra, en muchos casos, sin los estudios correspondientes y en algunos casos con consecuencias negativas, por consideraciones incorrectas.

Estas ideas ya están cambiando y cada vez más se están mejorando, la presente tesis pretende dar luces al respecto e informar todo lo concerniente a su utilización, manejo e implementación, siempre guiados por las Normas Nacionales e Internacionales, los sustentos teóricos, las investigaciones y la experiencia comprobada, fundamentada y documentada.

1.2 Objetivos Generales

Los Objetivos Generales de la presente tesis son:

- Diseñar un Sistema de Protección **integral**¹ contra rayo que brinde una real y adecuada protección contra impactos directos e indirectos.
- Que el Sistema diseñado sea capaz de neutralizar, al mínimo posible, las **señales nocivas**² o perturbaciones por rayos y sus efectos en todos los equipos de comunicación.
- Que la Puesta a Tierra diseñada brinde una **adecuada y real**³ protección, y una referencia efectiva para lo que fue creada.

1.3 Objetivos Específicos

Los Objetivos Particulares son:

- Aplicar procedimientos adecuados según normas, antes y durante los diseños de Puestas a Tierra.
- Medir correctamente los diferentes parámetros necesarios para diseñar y comprobar los diseños.
- Conocer los principales marcos normativos que sustentan la utilización y aplicación de tecnologías, métodos y principios de la Protección contra Rayos.
- Utilizar con propiedad los términos, en el ámbito profesional y laboral.

1: Integral, Sistema con el que se puede alcanzar un alto grado de seguridad para las personas y los equipos, mediante la combinación de varios subsistemas como la protección externa, la protección interna y las acciones preventivas respecto a las personas. IEC62305, IEC61021-1

2: Señales nocivas, señales afectadas por perturbaciones generando sobretensiones peligrosas para los equipos, MOTOROLA R56

3: Adecuada y real, refiérase a una comprobada solución de protección contra rayos, IEC62305, IEC61021-1

Capítulo 2

SUSTENTO TEÓRICO

2.1 Introducción

El presente Capítulo presenta las diferentes metodologías de análisis, diseño e implementación de los Sistemas de Protección contra rayo y Puestas a Tierra, como fundamento para lo que posteriormente conformarán los algoritmos de simulación, de acuerdo a las Normas: Código Nacional de Electricidad Peruano; IEC 62-305; IEC 6-1021-1; IEC 6-1230; IEC 1100; R 56; IEEE 4048; IEEE 80; NEC2002 y NFPA 77 principalmente.

2.3 El fenómeno del Rayo

2.3.1 Rayo (Lightning)

La descarga eléctrica atmosférica o más comúnmente conocida como rayo, es un fenómeno físico que se caracteriza por una transferencia de carga eléctrica de una nube hacia la tierra, de la tierra hacia la nube, entre dos nubes, al interior de una nube o de la nube hacia la ionosfera.

2.3.2 Parámetros de registro del rayo para el diseño de la Protección

La sierra andina, por su ubicación geográfica, se convierte en una de las zonas con mayor actividad eléctrica atmosférica en el país, lo cual hace que las instalaciones presenten una condición de riesgo alto, tal como lo indican las metodologías de evaluación del grado de riesgo contenida en las normas y en especial, la IEC 61024-1-1 y la IEC 62305-2.

- ***Respecto a los rayos se puede afirmar, que ninguna medida es económica y efectiva para evitarlos, como tampoco para garantizar un 100% de protección, por lo tanto, las precauciones de protección apuntan hacia los efectos secundarios y a las consecuencias de una descarga eléctrica atmosférica.***

El propósito de la protección contra rayos es **controlar (no eliminar)** el fenómeno natural, encausándolo en forma segura. El objetivo de la protección contra rayos es reducir por

debajo del máximo nivel tolerable, el riesgo de daño por un impacto directo a una estructura o a un volumen que se requiere proteger; para ello, se establecen categorías de protección que dependen de la evaluación del nivel de riesgo.

El riesgo para cada estructura depende básicamente de la densidad de rayos a tierra por kilómetro cuadrado al año (**exposición**⁴) y de las pérdidas que se puedan presentar. Estas son determinadas por factores como el uso y contenido del volumen a ser protegido, materiales de construcción y medidas que se tomen para reducir los efectos de los rayos.

Los principales aspectos para valorar un riesgo son básicamente, la severidad o consecuencia que pueda resultar al perderse el control de dicho riesgo y por otra, la probabilidad o esperanza estadística de que esas consecuencias se produzcan.

Sólo cuando se han identificado y evaluado los riesgos, se está en condiciones de tomar decisiones respecto de cada uno de ellos. Naturalmente que, aparte de evaluar un riesgo en cuanto a sus consecuencias y a la probabilidad que se produzcan, se requiere definir las alternativas de solución en cuanto a dos variables importantes:

- El costo que implica la aplicación de la medida propuesta como solución.
- La efectividad o grado de solución que aporta la misma medida.

La administración de riesgos nos sugiere cuatro alternativas:

- Terminar el riesgo
- Tratar el riesgo
- Tolerar el riesgo
- Transferir el riesgo

4: Exposición, término utilizado para expresar el nivel ceráuneo de la zona, es decir la cantidad de rayos en un área determinada (1 Km.) en un tiempo señalado (1 año), llamada densidad de carga en la IEC 6 1024-1-1.

Principales parámetros del Rayo: (Ver detalle de cada parámetro en el Anexo 3).

Tabla 1
Parámetros del Rayo

Parámetros		Símbolo	Unidad	Nivel de Protección contra Rayo (NPR)			
				I	II	III	IV
Descarga Corta	Corriente Pico	I	kA	200	150	100	
	Carga corta	QCORTA	C	100	75	50	
	Energía específica	W/R	KJ/O	10	5,625	2,5	
	Parámetros de tiempo	T1/T2	μs/μs	10/350			
Descarga corta subsecuente	Corriente Pico	I	kA	50	37.5	25	
	Pendiente promedio	di/dt	kAμs	200	150	100	
	Parámetros de tiempo	T1/T2	μs/μs	0.25/100			
Descarga larga	Carga larga	QLARGA	C	200	150	100	
	Parámetro de tiempo	TLARGO	s	0.5			
Rayo	Carga	QRAYO	C	300	225	150	

FUENTE: IEC 62305-1, página 21, Tabla 3 –Valores máximos de los parámetros del rayo de acuerdo al Sistema de Protección contra Rayo

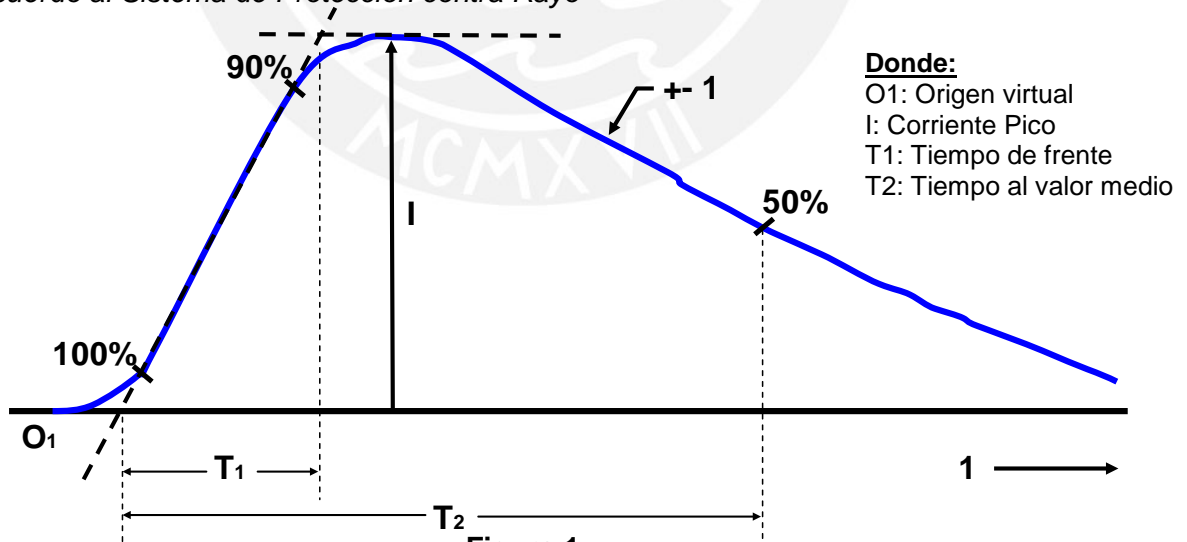


Figura 1
Definiciones de parámetros de impacto corto (Típicamente $T2 < T1$ ms.)

FUENTE: IEC 62305-1, página 31

Tabla 2
Medianas del valor pico de la corriente de retorno del Rayo en diferentes zonas del planeta

País	Mediana (kA)
Yurimaguas, Perú	21.6 ¹
Estados Unidos	23 ²
Suiza	30 ²
Suecia	30 ²
Polonia	31 ²
Malasia	36 ²
Brasil	43 ²
Rodesia	42 ²
Colombia	43 ²

FUENTE:

1. Seminario Internacional de seguridad, riesgo, calidad y protecciones eléctricas – Medellín 5,6 y 7 de Julio del 2006 Norma Técnica Colombiana de protección contra rayos, Filosofía y resultados, Horacio Torres Sánchez, Zonas con mayor alta densidad de rayos en Sudamérica, diapositiva 34.
2. Publicación en Internet, del Centro de Procesos, laboratorio de alta tensión de la Universidad Nacional experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” Vicerrectorado Barquisimeto EFECTOS DE LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS ADMOSFÉRICAS, página 40.

Tabla 3
Tensión de Impulso que deben soportar los equipos

Niveles de tensión de operación de los equipos (V)	Tensión Impulso (BIL) (kV)			
	Contadores	Tableros interruptores, cables, etc.	Electrodomésticos, herramientas portátiles	Equipo electrónico
	Categoría IV	Categoría III	Categoría II	Categoría I
120 - 240; 120 / 208	4	2.5	1.5	0.8
254 / 440; 277 / 480	6	4	2.5	1.5

FUENTE: IEC 62305

Tabla 4
Relación entre la clase de SIPRA y los niveles de Protección contra Rayos

Nivel de Protección contra Rayos	Clase de SIPRA
I	I
II	II
III	III
IV	IV

FUENTE: IEC 62305-3, página 23, Tabla 1.

Cada Clase de SIPRA esta caracterizado por:

a) Datos que dependen de la clase del SIPRA

- Parámetros del Rayo
- Radio de la esfera rodante, tamaño de la malla y ángulo de protección
- Distancias típicas entre bajantes y anillos conductores
- Distancias de separación contra chispas peligrosas
- Longitud mínima de los electrodos a tierra

Nota:

SIPRA Sistema Integral de Protección Contra Rayos

b) Datos que no dependen de la clase del SIPRA

- Unión del equipotencial del Rayo
- Espesores mínimos para los sistemas de captación
- Materiales para el SIPRA y condiciones de uso
- Materiales, configuración y dimensiones mínimas para el sistema de captación, las bajantes y los sistemas de Puesta a Tierra.

Los sistemas en general siguen las siguientes Normas

Tabla 5
Factores de Riesgo y las Normas en las que encontramos como tratarlos

Factor de Riesgo	Baja frecuencia	Alta frecuencia
Fallas a tierra	IEEE 80 NEC 2002	
Rayos		IEC 62 305 IEC 6 1021-1, R56
Electricidad estática	NFPA 77	NFPA 77
Corrientes por tierra	NEC 2002 IEEE 1100	
Contactos	IEC 6 1230 IEEE 1048	

FUENTE: Cuadro extraído de la Exposición del Ingeniero Alan Duque Henao, Lima Perú 2004

2.3.3 Dimensionamiento de los conductores

Tabla 6

Nivel de Protección	Material	Sección mínima bajante [mm ²]	Sección mínima Terminación aérea [mm ²]	Sección mínima terminación a tierra [mm ²]
I - IV	Cobre	35	16	50
	Aluminio	70	25	-
	Fierro	50	50	80

FUENTE: Cuadro extraído de la Norma IEC 61024-1, Tabla 5, página 41.

Para los conductores que **transportarán** gran parte de la corriente del rayo, tendremos:

Tabla 7

Nivel de Protección	Material	Sección mínima de cruce [mm ²]
I - IV	Cobre	16
	Aluminio	25
	Fierro	50

FUENTE: Cuadro extraído de la Norma IEC 61024-1, Tabla 6, página 41.

Para los conductores que **no transportarán** gran parte de la corriente del rayo, tendremos

Tabla 8

Nivel de Protección	Material	Sección mínima de cruce [mm ²]
I - IV	Cobre	6
	Aluminio	10
	Fierro	16

FUENTE: Cuadro extraído de la Norma IEC 61024-1, Tabla 7, página 41.

2.4 Protección Exterior

Su principal función es proteger de impactos directos e indirectos de los rayos que se dirigen a la estructura incluyendo a los que impactan al costado de esta, para conducir de manera segura la corriente de rayo desde el punto de impacto a tierra.

También tiene como función dispersar dicha corriente a tierra sin causar daños térmicos, mecánicos o chispas peligrosas que puedan dar inicio a incendios o explosiones.

Tipos:

- a) Aislado eléctricamente de la estructura.
- b) Unido directamente a la estructura.

Sobre que tipo utilizar, dependerá de los riesgos de efectos térmicos o explosivos en el punto de impacto del rayo y del tipo de elementos almacenados en la estructura. Algunos ejemplos típicos para usar una protección aislada son estructuras con paredes combustibles y en áreas con peligro de explosión.

Componentes:

- Sistemas de Captación
- Sistemas de conductores bajantes
- Sistemas de Puesta a Tierra

2.4.1 Sistemas de captación

La interceptación de rayos se hace con un elemento conductor o grupo de elementos conductores en contacto eléctrico con las bajantes, cuya función es la de interceptar los rayos que pueden impactar en cercanías o directamente sobre la instalación a proteger.

Un sistema de captación puede estar compuesto por:

- Varillas tipo Franklin (incluyendo los mástiles)
- Cables colgantes
- Mallas de conductores

Se determina la posición de acuerdo a los siguientes métodos:

2.4.1.1 Método de la esfera rodante para protección contra rayos

Aplicable para estructuras con altura menor a 60 m.

Aplicando este método, la colocación de un sistema de **terminación aérea**⁵ es adecuada si no hay punto del espacio que se protegerá en contacto con una esfera rodante de radio R en la tierra, alrededor de la estructura en todas las direcciones posibles. Por lo tanto la esfera tocará solamente la tierra y/o el sistema de terminaciones aéreas.

El radio de la esfera debe conformarse con el nivel seleccionado de la protección:

Tabla 9
Radio de la Esfera Rodante

Circuito de Interceptación			Nivel de Protección contra Rayo (NPR)			
Parámetro	Símbolo	Unidad	I	II	III	IV
Corriente pico mínima	I	kA	3	5	10	16
Radio de la esfera rodante	R	M	20	30	45	60

FUENTE: Cuadro extraído de I a la Norma IEC 62305-1, Tabla 4, página 21

Estos niveles de corriente están dados para que con el radio escogido cualquier corriente igual o superior a la escogida sea interceptada por el sistema de protección externo y no impacte directamente a la estructura.

Una muestra gráfica de la utilización de este método es el siguiente:

5: Terminación aérea, término utilizado para señalar los sistemas de captación tipo bayoneta.

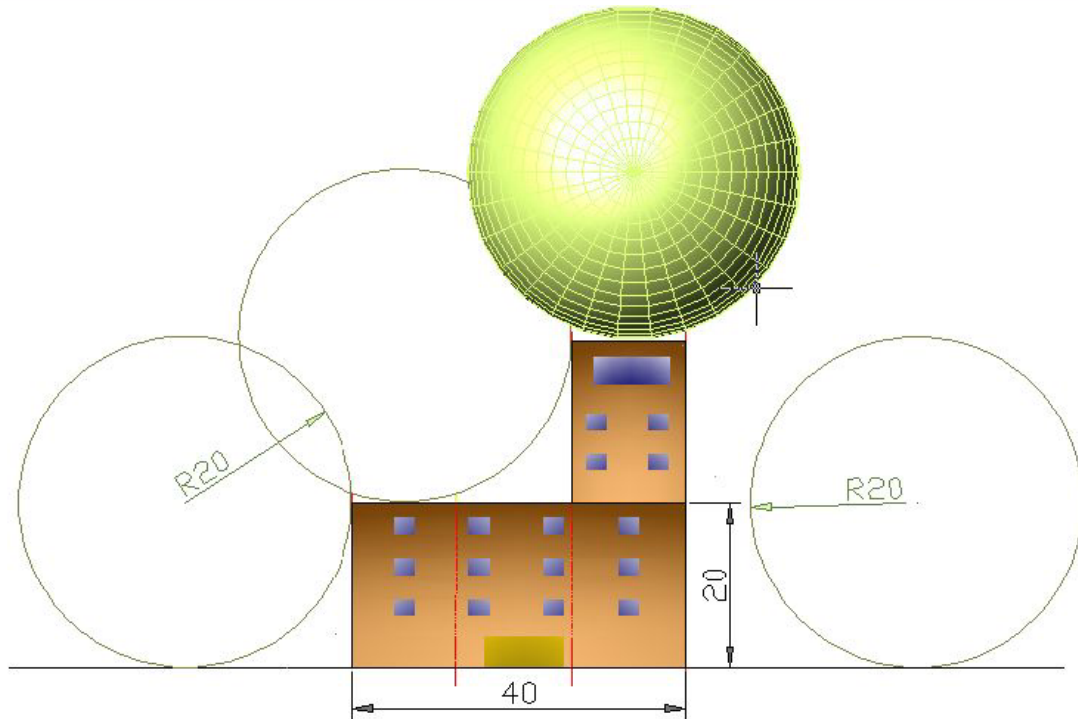


Figura 2
Aplicación del Método de la Esfera

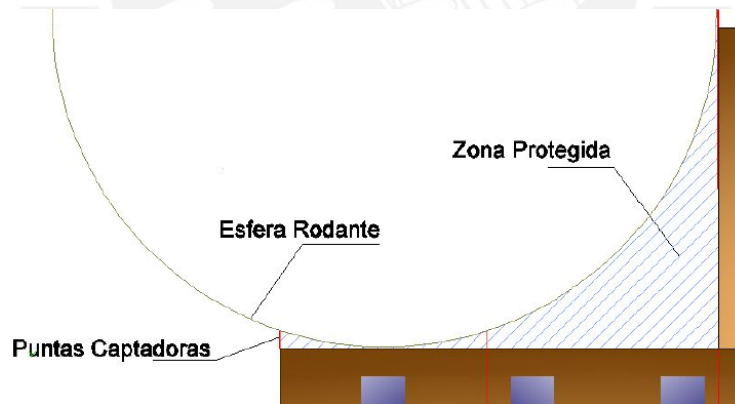
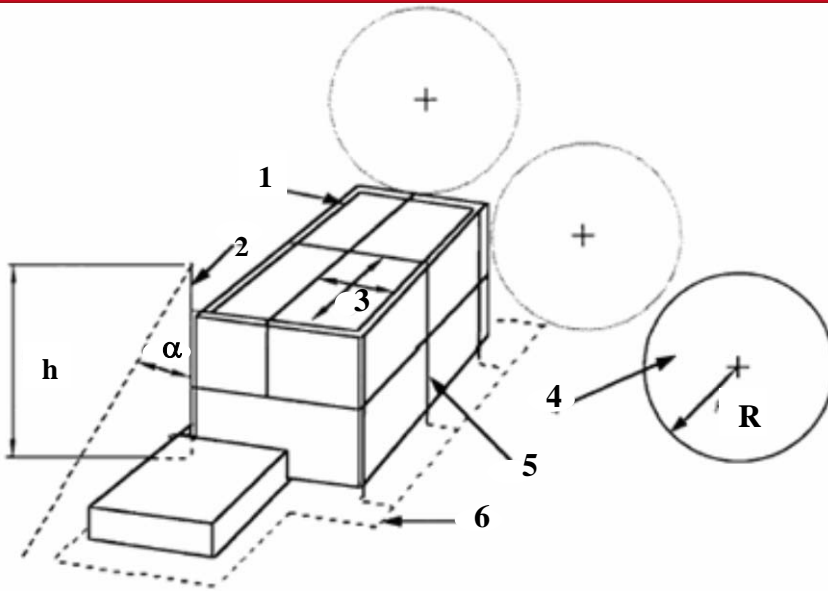


Figura 3
Zona Protegida

En estructuras más altas que el radio de la esfera rodante pueden existir rayos que impacten los costados de éstas.

Cada punto lateral de la estructura tocado por la esfera rodante es un punto factible a ser impactado. Sin embargo, la posibilidad que el rayo impacte los costados es prácticamente despreciable para estructuras menores a 60 m.

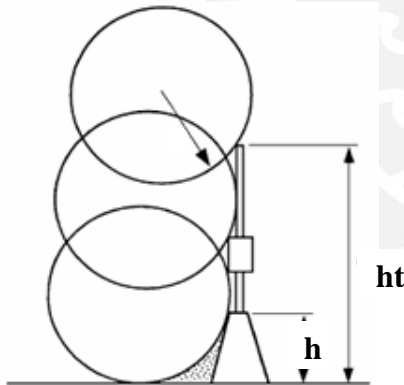


- 1 Cable de interceptación
- 2 Punta captadora o bayoneta
- 3 Medida de la malla
- 4 Esfera rodante
- 5 Bajante
- 6 Electrodo de tierra
- h Altura del terminal aéreo sobre el nivel de tierra
- α Angulo de protección
- R Radio de la esfera rodante de acuerdo a la Tabla 1 de la IEC 61024-1

Figura 4
Descripción de los elementos de protección

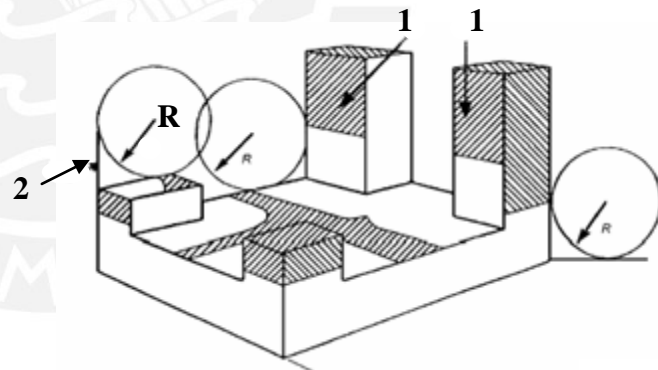
FUENTE: IEC 61024-1, Figura 11b, página 111.

En las figuras 5; 6 y 7, podremos observar la aplicación directa del método enunciado, donde la parte a proteger de los posibles impactos directos de rayo son recorridos por una esfera de radio calculado según la tabla 9.



- R Radio de la esfera rodante de acuerdo a la Tabla 1 IEC 61024-1
- h_t Altura física de la torre, mástil y Terminal aéreo
- h Altura de terminación aérea como el usado en la tabla 1 IEC61024-1

Figura 5



- 1 Área sombreada, son zonas de la interceptación de rayos y protección de acuerdo a la tabla 1 de la IEC 61024-1
- 2 Mástil o punta captadora en la estructura

Figura 6

FUENTE: IEC 61024-1, Figuras 12 y 13, página 116.

2.4.1.2 Método de Ángulo de Protección

Útil para edificaciones con formas simples, pero esta limitado a la altura de los mismos y al tamaño del terminal aéreo.

Es la simplificación del método de la esfera rodante, en donde para una altura relativa existe un ángulo de protección de la punta captadora o cable aéreo de protección de la punta captadora o cable aéreo de protección, el cual puede determinarse mediante la siguiente grafica:

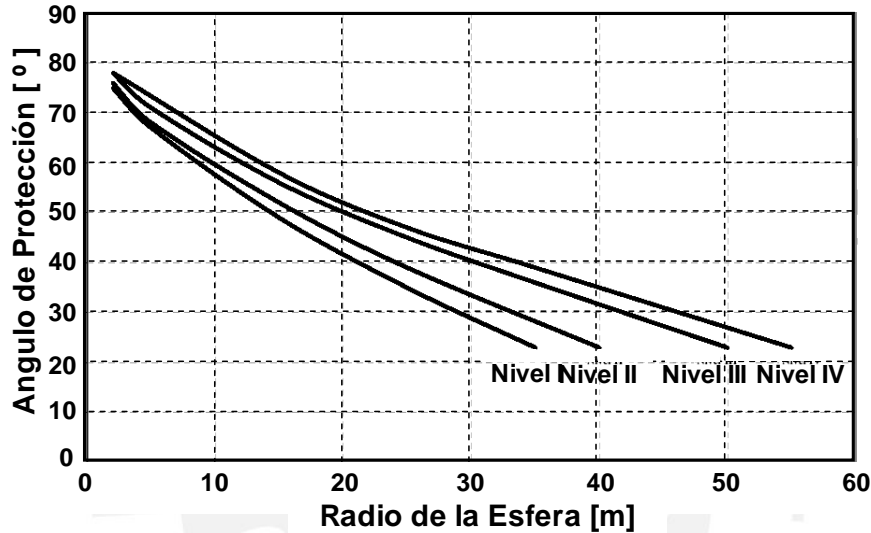
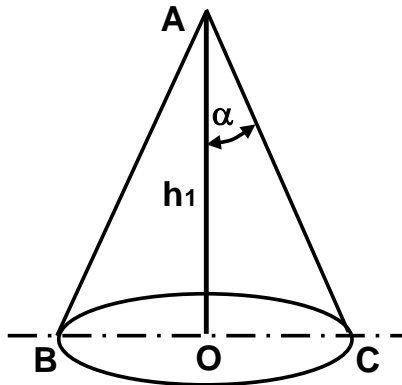


Figura 7

FUENTE: IEC 62305-3, Gráfico de la Tabla 2, página 24

Se considera que la ubicación del sistema de captación es adecuada, si la estructura completa a ser protegida esta dentro del volumen de protección.

La altura se escoge a partir de la altura relativa que tiene el elemento con la superficie a proteger. Un solo punto genera un cono, el espacio protegido es generado por los diversos conductores de terminación aérea.



- A** Tipo de una terminación aérea
- B** Plano de referencia
- OC** Radio de Protección aérea
- h_1 Altura de la terminación aérea, sobre la referencia del plano
- α Ángulo de protección, cumpliendo con el valor de protección de la tabla 1 de la IEC 61024-1

Figura 8

FUENTE: IEC 61024-1, Figura 2, página 101

2.4.1.3 Método de Enmallado para Protección contra Rayos

Útil para proteger superficies planas, como techos y terrazas.

Los conductores externos son colocados sobre los bordes de techos, terrazas y voladizos.

Se diseña de tal manera que la corriente de rayo siempre encuentre al menos dos vías de evacuación de la corriente.

Las dimensiones del enmallado para los diferentes niveles de protección son:

Tabla 10

Nivel de Protección contra Rayos	Malla (m)
I	5 x 5
II	10 x 10
III	15 x 15
IV	20 x 20

FUENTE: IEC 62305-3, Tabla 2, páginas 105-113.

Para el caso de estructuras metálicas grandes que cumplan con las siguientes tablas:

Tabla 11

Mínimo espesor para estructuras en sistemas de captación aérea

Clase de Nivel de Protección	Material	Grosor [a] (mm)	Grosor [b] (mm)
I, II, III, IV	Plomo	-	2
	Acero (Inoxidable galvanizado)	4	0.5
	Titanio	4	0.5
	Cobre	5	0.5
	Aluminio	7	0.65
	Zinc	-	0.7

Donde:

[a]: Previene perforaciones, puntos calientes o ignición

[b]: Solo para láminas metálicas si no es importante prevenir perforaciones, puntos calientes o ignición.

Tabla 12-a

Mínimo espesor para estructuras en sistemas de captación aérea

Material	Configuración	Mínima área (mm ²) [8]	Comentarios
Cobre	Cinta sólida	50	2 mm mínimo de grosor
	Alambre [7]	50	8 mm de grosor
	Trenzado	50	1.7 mm mínimo de diámetro por hilo
	Alambre [3] y [4]	200	16 mm de diámetro
Cobre recubierto de plata [1]	Cinta sólida	50	2 mm mínimo de grosor
	Alambre	50	8 mm de grosor
	Trenzado	50	1.7 mm mínimo de diámetro por hilo

FUENTE: IEC 62305-3, Tablas: 6, 7,8 y 9, páginas 26-30

Tabla 12-b
Mínimo espesor para estructuras en sistemas de captación aérea

Material	Configuración	Mínima área (mm ²) [8]	Comentarios
Aluminio	Cinta sólida	70	3 mm mínimo de grosor
	Alambre	50	8 mm de grosor
	Trenzado	50	1.7 mm mínimo de diámetro por hilo
Aleación de Aluminio	Cinta sólida	50	2.5 mm mínimo de grosor
	Alambre	50	8 mm de grosor
	Trenzado	50	1.7 mm mínimo de diámetro por hilo
	Alambre [3]	200	16 mm de diámetro
Acero galvanizado en caliente [2]	Cinta sólida	50	2.5 mm mínimo de grosor
	Alambre	50	8 mm de grosor
	Trenzado	50	1.7 mm mínimo de diámetro por hilo
	Alambre [3]	200	16 mm de diámetro
Acero inoxidable [5]	Cinta sólida [5]	50	2.5 mm mínimo de grosor
	Alambre [5]	50	8 mm de grosor
	Trenzado	70	1.7 mm mínimo de diámetro por hilo
	Alambre [3] y [4]	200	16 mm de diámetro

FUENTE: IEC 62305-3, Tablas: 6, 7,8 y 9, páginas 26-30

Los terminales de captación a utilizar, son las mismas estructuras metálicas, los cuales cumplen con las disposiciones de la norma IEC 61024-1 e IEC 62305-3; dicha norma indica que cualquier elemento metálico que se encuentre expuesto al impacto del rayo, debe ser tratado como un terminal de captación y por tanto debe ser equipotencializado.

2.4.2 Sistemas de conductores bajantes

Las bajantes son un grupo de conductores sin fusibles ni interrupciones, en contacto eléctrico con los elementos de interceptación de rayos y en lo posible, que lleguen directamente y sin curvas a la puesta a tierra; su función es encaminar las corrientes de rayo y disminuir los efectos a nivel interno del campo magnético que pueden incidir sobre la instalación a proteger, en forma segura a tierra.

Las bajantes deben ser ubicadas de tal manera que a partir del punto de impacto hasta la tierra se cumplan los siguientes requisitos:

- Existencia de varios caminos paralelos para la corriente.
- La longitud de los caminos de corriente sea mínima
- Equipotencialización de todas las partes conductoras

Se deben instalar tantas bajantes como sea posible, igualmente espaciadas alrededor del perímetro interconectado por el anillo conductor lo cual reduce la posibilidad de chispas peligrosas y facilita un sistema de protección interno.

Ubicación

En la siguiente tabla se muestran las características de las bajantes según su ubicación:

Tabla 13
Cuadro de Ubicación de bajantes

Ubicación en sistemas:	Características		Nº de bajantes
Aislados	Sistema de captación tipo varillas	Montadas en postes o mástiles no metálicos o de madera sin refuerzo en acero interconectado	Al menos una por cada estructura
		Montados en postes o mástiles metálicos o con material con acero interconectado	No es necesario bajantes
	Sistema de captación tipo Cables colgantes		Es necesario al menos una bajante en cada soporte de los cables
	Sistema de captación tipo Red de conductores		Es necesario al menos una bajante en cada soporte del terminal
No aislados	Sistema de Protección externo	Para cada sistema no debe ser menor a 2 y debe estar distribuido por el perímetro de la estructura a proteger sujeto a restricciones prácticas y arquitectónicas (las distancias de separación se especifican de acuerdo a la tabla 15)	

FUENTE: IEC 62305-3

La distancia de separación entre bajantes se determina según la tabla siguiente:

Tabla 14
Distancia de separación promedio para las bajantes de acuerdo con el nivel de protección

Nivel de Protección contra Rayos	Distancia típica promedio (m)
I	10
II	10
III	15
IV	20

FUENTE: IEC 62305-3

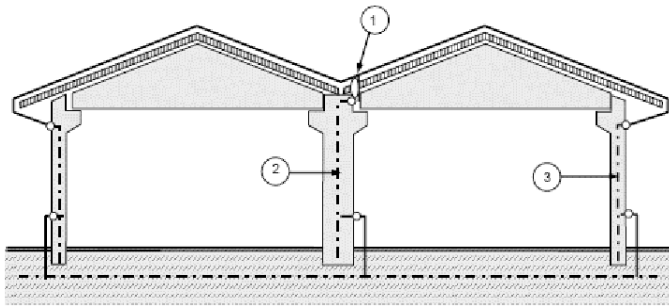


Figura 9
Esquema para colocar las bajantes

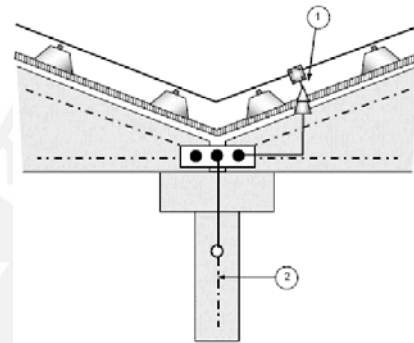


Figura 10
Detalle de bajante

FUENTE: IEC 62305-3, Figura 7, página 105

2.4.2.1 Construcción de las bajantes

La longitud de las bajantes debe de ser lo menor posible, evitando la formación de lazos o curvaturas en su trayectoria, si esto no es posible, tener en cuenta las recomendaciones de la NFPA – 780 en las siguientes figuras:

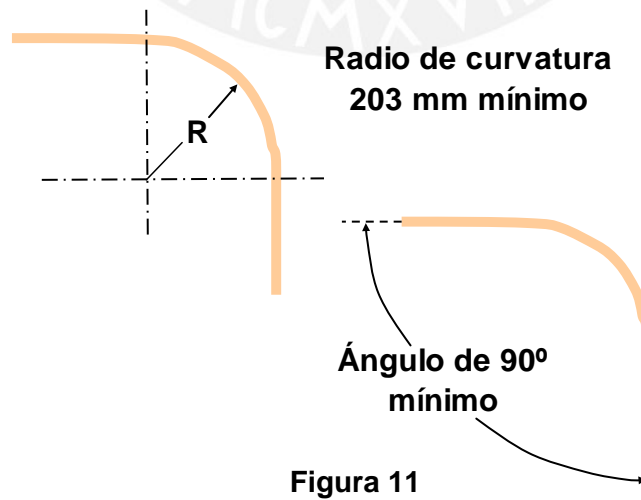


Figura 11
Curva de conductores

FUENTE: NFPA – 780

Pueden ser consideradas bajantes naturales:

- a) Estructuras metálicas que garanticen una continuidad eléctrica durable entre sus partes (Ejemplos: grapas, soldaduras, abrazaderas, etc.) y sus especificaciones sean al menos igual a las mostradas en las tablas 12-a y 12-b
- b) Los marcos metálicos de la estructura
- c) Los elementos de fachada, de perfiles o rieles metálicos, garantizando que sus dimensiones cumplan con los requisitos para los conductores bajantes, en tuberías o láminas metálicas, su espesor no debe de ser menor a 0.5mm. y debe cumplir con la continuidad eléctrica vertical.

2.4.3 Sistemas de Puesta a Tierra

La puesta a tierra es una parte fundamental del sistema de protección contra rayos que contribuye de forma sustancial a la seguridad del personal y de los equipos en caso de la incidencia de un rayo, puesto que provee una equipotencialidad a los equipos y estructuras y ofrece una trayectoria de baja resistencia a la corriente del rayo, permitiendo su dispersión y disipación en el terreno sin causar daño.

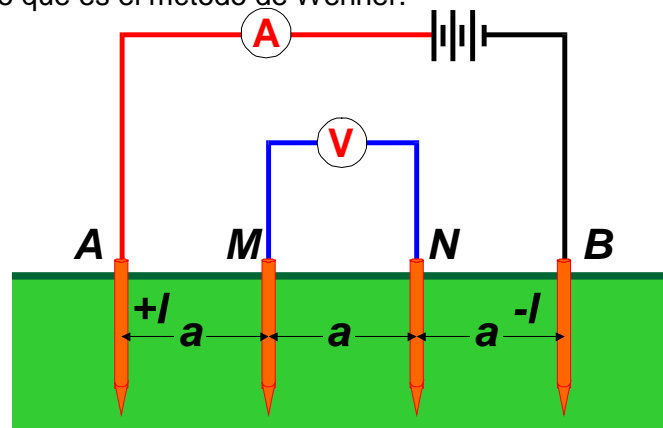
Una puesta a tierra además de resistencia, presenta una capacitancia e inductancia debido a su configuración; cada uno de estos parámetros R,L,C, influyen en la capacidad de conducción de corriente en el suelo. Dicha situación se valora en el diseño de la puesta a tierra ya que cuando se inyecta una corriente tipo rayo, ésta sufre la oposición de la impedancia característica de la puesta a tierra.

Todo terreno tiene características inherentes a él, por ejemplo las capas que la conforman, el PH, humedad, etc., las cuales hacen que cada lugar sea distinto a otro. Alguna de las características que nos interesan para poder diseñar una puesta a tierra son las siguientes:

- Resistividad
- Humedad
- PH
- Características físicas y topología general del suelo.

2.4.3.1 Resistividad aparente y estratificación del terreno

Existen varios métodos para medir la resistividad del terreno en análisis, de las cuales se describe el más usado que es el método de Wenner.



$$\rho = 2\pi a R$$

Figura 12
Medición de Resistividad por el método de Wenner:

2.4.3.2 Requisitos Mínimos

Los requisitos mínimos a considerar en una Puesta a Tierra son:

- Cumplir los requerimientos de las normas y especificaciones.
- Un adecuado valor de la resistencia para cada tipo de instalación (de acuerdo a normas).
- Mínima variación de resistencia a cambios climáticos.
- Resistente a la corrosión.
- Costos razonables, sin comprometer la seguridad.
- Permitir su mantenimiento periódico.

2.4.3.3 Funciones

Las principales funciones que debe tener una puesta a tierra son:

- Garantizar condiciones de seguridad a los seres vivos.
- Permitir a los equipos de protección despejar rápidamente las fallas.

- Servir de referencia al sistema eléctrico.
- Conducir y disipar las corrientes de falla.
- Eliminar ruidos eléctricos.
- En algunos casos, servir como conductor de retorno.
- Transmitir señales de RF en onda media.

De acuerdo con IEC 61000-5-2/1997, todas las puestas a tierra deben estar interconectadas a través de bajas impedancias. En las siguientes figuras se aprecia la disposición normativa.

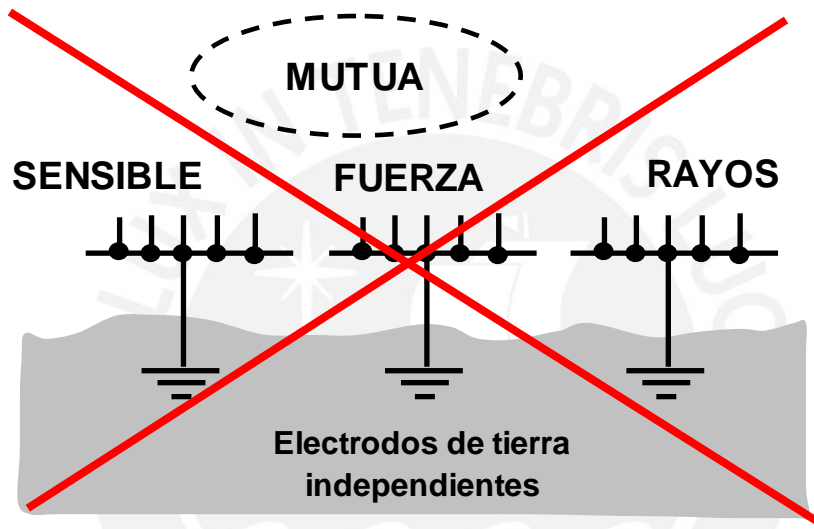


Figura 13

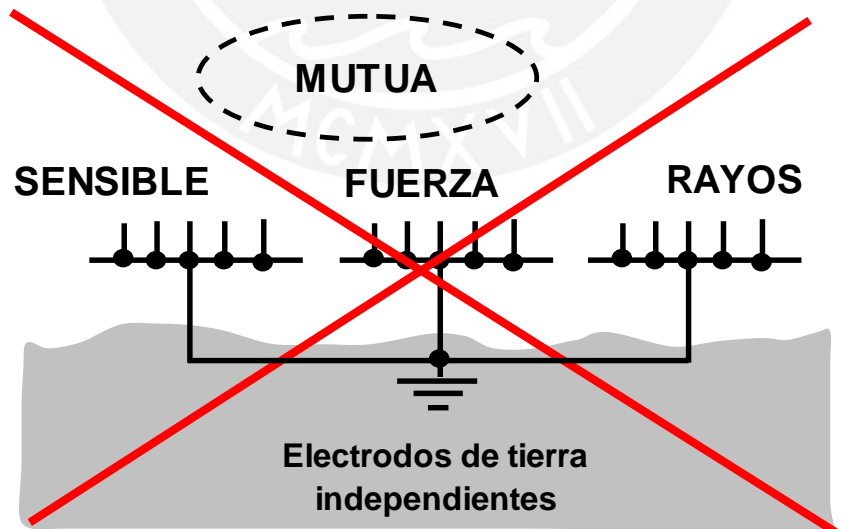


Figura 14

En la figura 13 y 14 se muestran los esquemas **no aceptados** por las normas y en la **figura 15 se expone la disposición recomendada.**

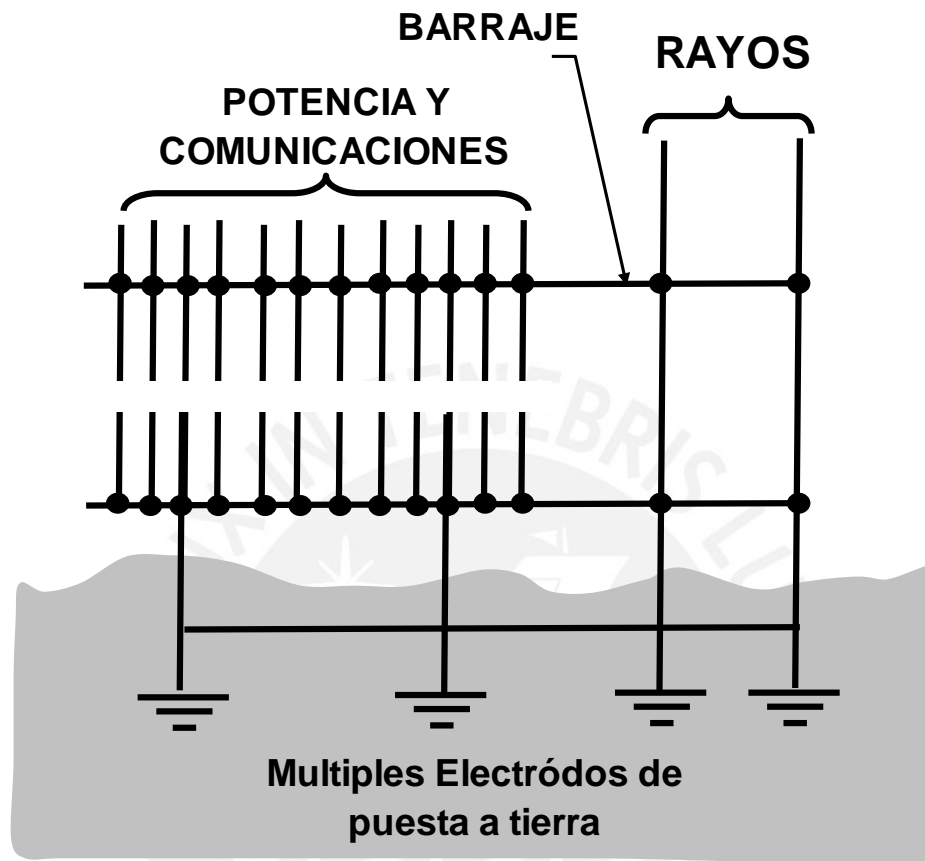


Figura 15

2.5 Protección Interior

La protección interior es un tema que muy poco se trata en nuestro país, debido a que la mayoría de diseñadores y especialistas asumen que con una protección exterior es suficiente (“Un buen pararrayos”), sin embargo cuando los componentes más sensibles fallan o se “queman” recién pensamos en colocar algún “filtro” y si con ello no se arregla el problema entonces definitivamente la culpa es de la puesta a tierra”. Para que las instalaciones tengan una efectiva protección integral debemos considerar cada parte involucrada (Protección interior, exterior, bajantes, puesta a tierra, etc.), de lo contrario el sistema no cumplirá con su labor de protección.

El sistema de Protección interior evita que ocurran descargas eléctricas peligrosas que podrían presentarse en el interior de la estructura a causa de la circulación de corrientes de rayo en el sistema de protección interno o en otras partes conductoras de la estructura.

Para evitar estas descargas peligrosas hacemos uso de los sistemas equipotenciales y aislamiento eléctrico entre las partes.

Alguno de los medios de utilización para dicho fin son:

2.5.1 Dispositivo contra Sobretensiones (DPS)

Un Dispositivo contra Sobretensiones, tal como se indica en las definiciones, limita el nivel de la sobretensión, mediante la absorción de la mayor parte de la energía transitoria, minimizando la transmitida a los equipos y reflejando la otra parte hacia la red.

La acción de este dispositivo se muestra en el siguiente esquema :

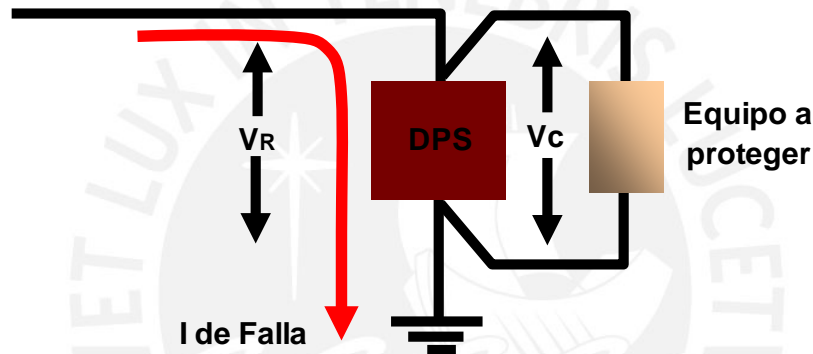


Figura 16

Se utilizan cuando la unión con conductores equipotenciales no es conveniente, estos se deben colocar de tal manera que puedan ser inspeccionados

2.6 Sistemas Equipotenciales

De acuerdo con el artículo 250-75 de la NFPA 70 y la API 2003 – 1998 Protection Against Ignitions Arising Out of Static, las canalizaciones metálicas, bandejas porta cables, blindajes de cables, armaduras de cables, encerramientos, marcos, herrajes y otras partes metálicas no portadoras de corriente, se deben conectar equipotencialmente y en forma efectiva, para asegurar la continuidad eléctrica y la capacidad de conducir en forma segura cualquier corriente de falla que sea impuesta. Se deben quitar de las roscas, puntos y superficies de contacto todas las pinturas, barnices o recubrimientos similares no conductores o bien conectarlos por medio de accesorios diseñados de tal manera que hagan innecesario dicho proceso.

Los puentes de conexión equipotencial deben ser de cobre u otro material resistente a la corrosión.

2.6.1 Aislamiento eléctrico de los sistemas de protección

El aislamiento eléctrico respecto a partes metálicas internas, sistemas eléctricos, líneas de telecomunicaciones protegidas, puede ser logrado mediante la separación “S” de las partes:

$$S > k_i \frac{k_c}{k_m} l \quad (m)$$

K_i Nivel de protección del sistema contra rayos

K_c Depende del flujo de corriente por los conductores bajantes

K_m Depende del aislamiento entre las partes

l Longitud en metros a lo largo del Terminal captador, o del conductor bajante, medido desde el punto de distancia de separación bajo consideración y la unión equipotencial más cercana.

En el caso de líneas o partes conductoras externas conectadas a la estructura, es siempre necesario asegurar la unión equipotencial (por conexión directa o por medio de DPS) en el punto más cercano del ingreso a la estructura

En estructuras metálicas conectadas a estructuras de concreto reforzados con continuidad eléctrica interrumpida, las distancias de separación no son necesarias

Clase de SIPRA	K_i
I	0.08
II	0.06
III	0.04
IV	0.04

Tabla 15

Material	K_m
Aire	1
Concreto	0.5

Tabla 16

FUENTE: IEC 62305-3, tablas: 10 y 12, página: 30.

Capítulo 3

CONSIDERACIONES, MODELOS Y DISEÑOS

El presente capítulo se encuentra enmarcado en la experiencia de trabajo, investigaciones y la normatividad nacional e internacional

3.1 Consideraciones

Existen muchas normas que especifican los diseños de Puestas a Tierra, centraremos el análisis en aquellas que se refieran a los sistemas de comunicaciones.

3.1.1 Consideraciones de Diseño

El diseño de las puestas a tierra se realiza de acuerdo con las especificaciones técnicas de las siguientes normas:

- **IEC 61024-1** Protection of structures against lightning Part 1 General principles.
- **IEC 61024-1-2** Protection of structures against lightning Part 1-2 General principles – Guide B – Design, installation, maintenance and inspection of lightning protection system.
- **NFPA 780 – 2000** Standard for lightning protection system y API 2003 – 1998 Protection Against Ignitions Arising Out of Static, Lightning and Stray Currents.
- **NEC 2002** National Electrical Code®
- Norma **Motorola R56**, Standards and Guidelines for Communication Sites

3.1.2 Consideraciones Generales de Modelamiento

El modelamiento se realiza de acuerdo con las especificaciones técnicas de la norma:

IEC 61024-1-2

Para el cálculo del conductor se sigue la siguiente ecuación, asumiendo que se utilizarán conexiones exotérmicas:

$$A_{mm^2} = \frac{3 * I_0 * K_f * \sqrt{t_c}}{1,9740} \text{ (mm}^2\text{)} \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

A_{mm^2} = Sección transversal del conductor a utilizar en mm²

- I_o = Corriente de falla monofásica en el secundario (A).
- K_f = Constante para diferentes materiales a diferentes temperaturas de fusión T_m y Zna temperatura ambiente de 40°C. (Ver Anexo 15)
- t_c = Tiempo de duración de la falla (s). Para cálculo del conductor se utilizó un tiempo de despeje de falla de 10 s.

3.2 Diseño del Sistema de Apantallamiento

Se debe asegurar una unión eléctrica entre todas las partes metálicas de las estructuras involucradas, por ejemplo los cercos, la torre, etc.

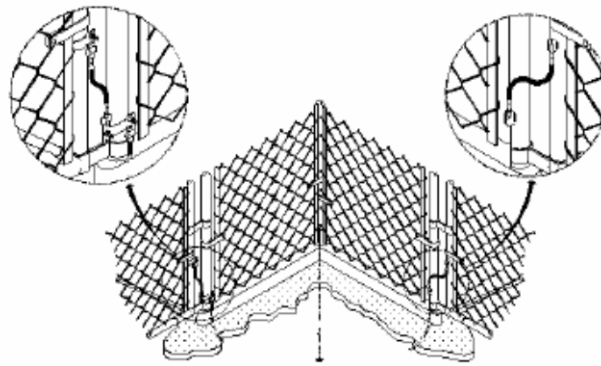


Figura 17
Equipotencialización del cerco metálico:

FUENTE: Motorola R56



Figura 18
Ejemplo fotográfico de la equipotencialización del cerco

FUENTE: Motorola R56

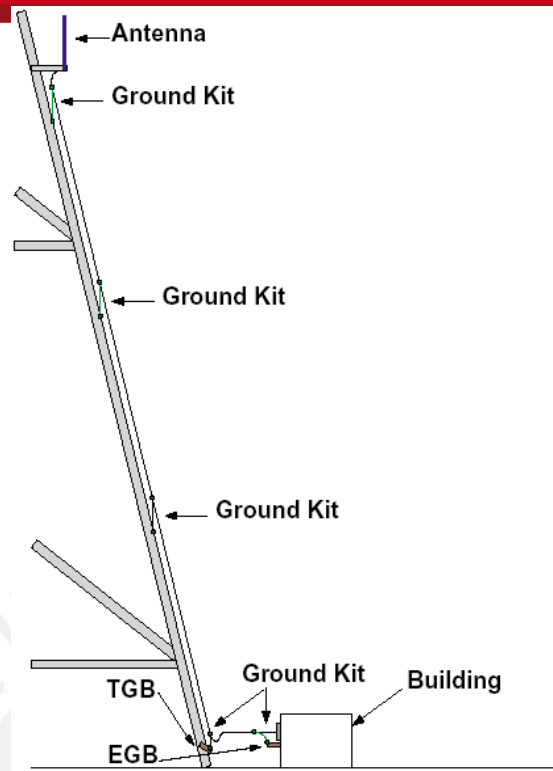


Figura 19

Equipotencialización de todas las partes metálicas de torre de comunicaciones

FUENTE: Motorola R56

3.2.1 Apantallamientos

Los apantallamientos (Elementos metálicos que se instalan alrededor de los dispositivos que se desean proteger contra los efectos de una perturbación), normalmente no son implementados en estas aplicaciones, sin embargo dependiendo de utilización del lugar por las personas y de la zona dentro de un ámbito mayor, llamase campamento, ciudad u otro lugar donde este de por medio la protección que un pararrayos convencional no satisface implementamos lo desarrollado en la parte teórica, teniendo en cuenta el nivel de protección y haciendo uso del método más conveniente para la aplicación en específico, por ejemplo, por el Método de la Esfera Rodante, podemos apantallar una caseta de equipos, que esta alejado de la acción de protección del pararrayos en la figura 28, donde observamos los puntos en donde se deberían colocar **puntas captadoras**⁴ y cables de apantallamiento.

Nota:

[6]: **Puntas captadoras**, son elementos de captación de impactos directos de rayos, tienen un diámetro de 5/8" ó 3/4 " y una longitud de entre 30 a 100 cm.



Figura 20
La estructura o torre a tierra

FUENTE: Motorola R56

3.2.2 Barrajes y kit de tierras

Los barrajes son suma importancia en las conexiones de todo el sistema equipotencial tanto exterior como interiormente, la Norma Motorola muestra los siguientes esquemas y fotos:

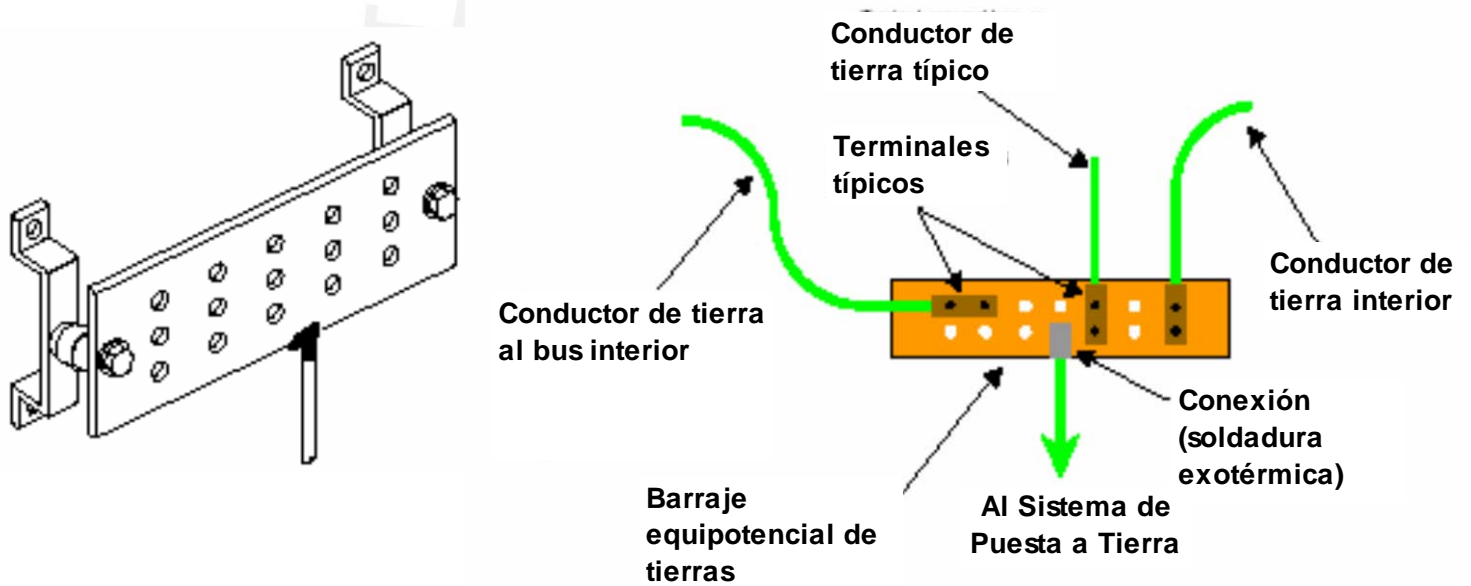


Figura 21
Esquema y foto de aplicación de un Barraje de tierras

FUENTE: Motorola R56

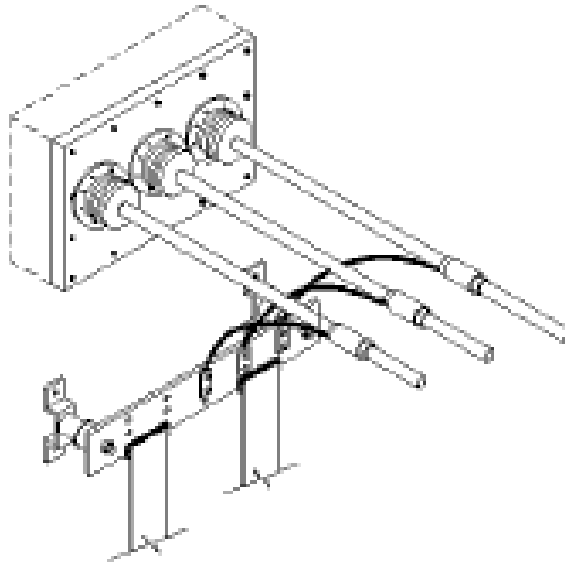


Figura 22
Kit de tierras al barraje de tierras

FUENTE: Motorola R56

Nota:

Un **Kit de tierras** es un arreglo que permite colocar las pantallas de los cables a tierra

3.2.3 Vientos de la Torre

Los vientos en la Torre deben colocarse a tierra, tal como lo sugiere la Norma Motorola, en la que podemos encontrar los siguientes esquemas:

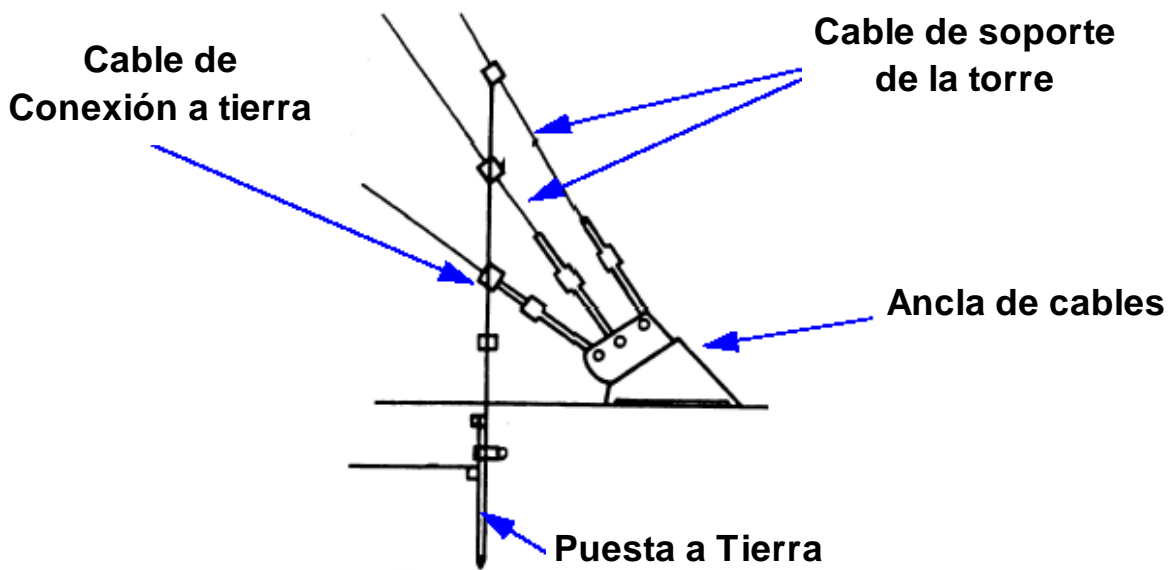


Figura 23
Detalle de consideraciones en Vientos

3.2.4 Cercos Metálicos

Los cercos metálicos deben colocarse a tierra, una forma es la que se muestra en la figura 46.



Figura 24
Cercos metálicos

3.3 Diseño del Sistema de Puesta a Tierra

Basados en las recomendaciones de la Norma Motorola R56, podemos definir un **modelo general** de diseño para proteger una caseta de comunicaciones con los siguientes elementos:

- Caseta de equipos (Donde encontraremos los equipos propiamente dichos y los sistemas de respaldo)
- Estructura o torre en la que se colocan antenas, equipos, etc de comunicaciones, así como elementos de protección contra rayos como pararrayos, barrajes, bajantes, etc.
- Vientos de la estructura o torre.
- Cerco metálico alrededor de la zona
- Equipotencialización de todos los elementos metálicos

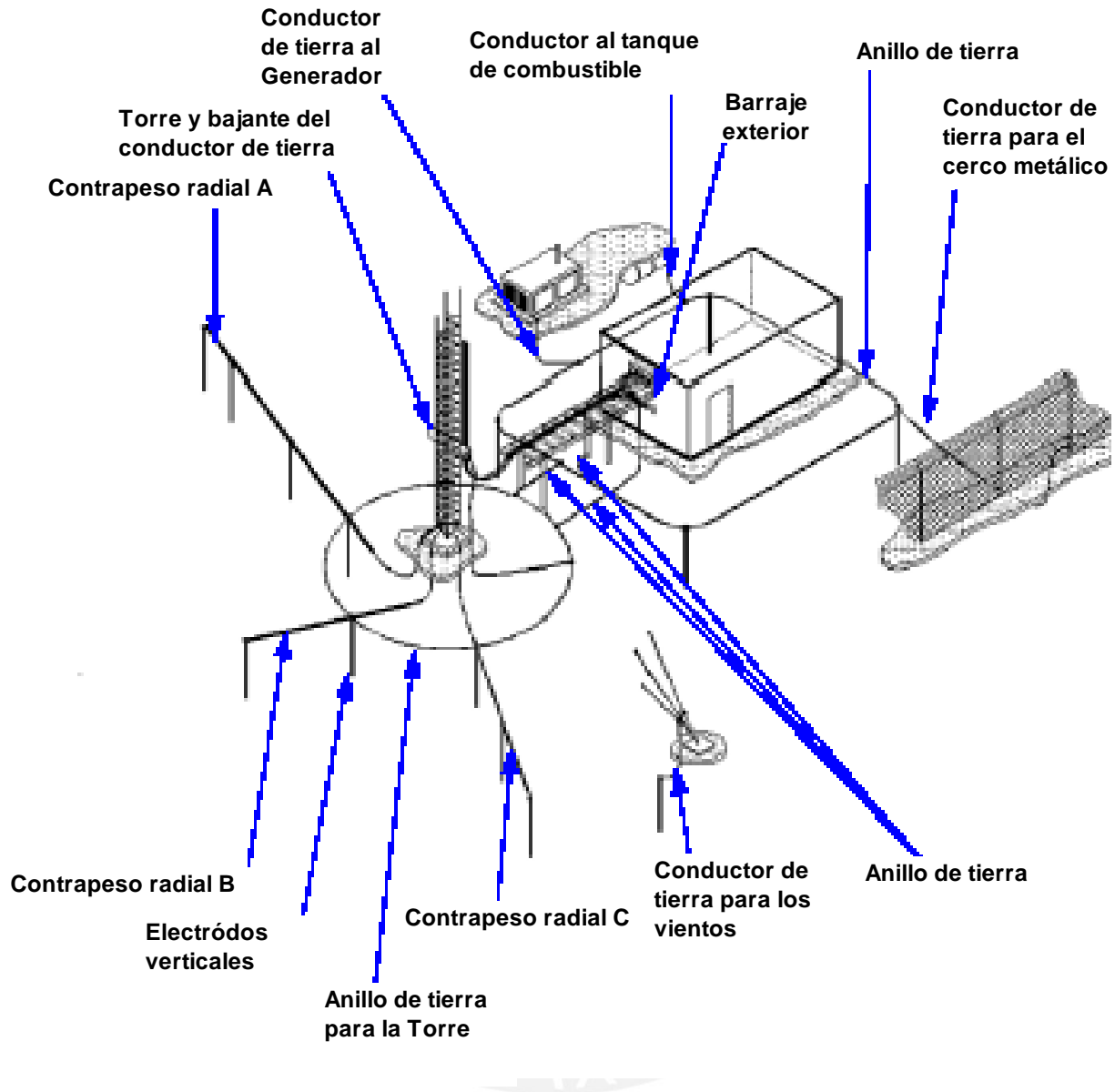


Figura 25-a
Diseño General de Sistema de Protección contra rayos para casetas de comunicaciones según la norma Motorola R56

En la Figura 25-a, podemos observar el criterio general sugerido por la Norma Motorola R56 en relación a los criterios de las mallas de tierras y de las consideraciones sobre los elementos involucrados en la estación de comunicaciones (Torre, caseta, cercos, vientos de la torre, bandeja de cables, barrajes, etc.)

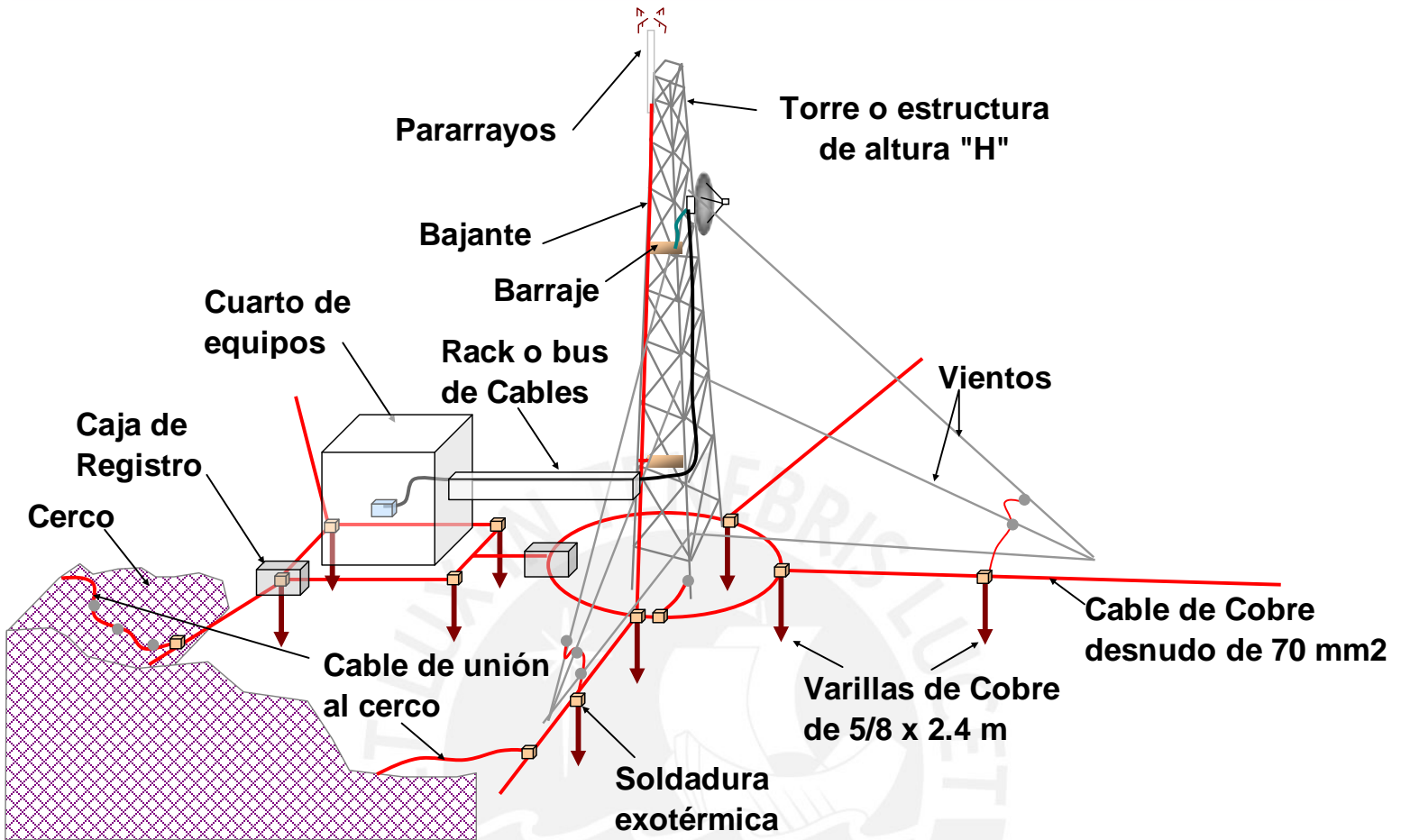


Figura 25-b
Diseño General de Sistema de Protección contra rayos para casetas de comunicaciones según la norma Motorola R56

En la Figura 25-b, podemos observar en “rojo” la malla de Puesta a Tierra y la bajante desde el pararrayos hasta el equipo de comunicaciones, en la caseta de equipos.

El esquema de Puesta a Tierra General es:

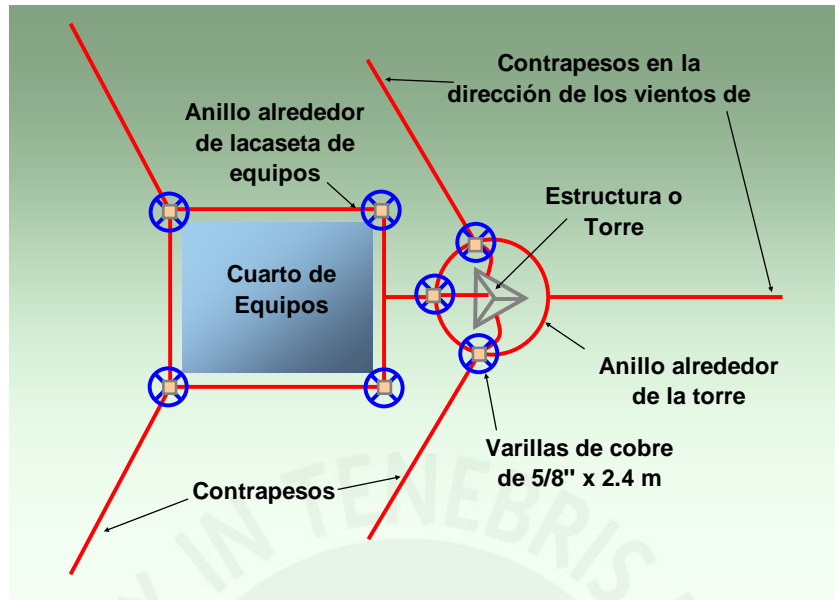


Figura 26

Esquema General de Sistema de Puesta a Tierra para un sistema de comunicaciones típico en presencia de Rayos

En la Figura 40, podemos observar elementos bien definidos, como son:

- **Varillas**, se sugiere uso de cobre, enmarcado a las dimensiones mínimas a cumplir, según las especificaciones normativas, por ejemplo: varilla de cobre 5/8" x 2.4 m de largo
- **Cables desnudos**, los cables utilizados deben cumplir con las especificaciones normativas antes descritas, una buena opción son los cables de cobre desnudos de 70 mm², pudiendo ser también de 50 mm², por un tema de corrosión se prefiere el uso de 70 mm² de sección como mínimo.

Los cables instalados en zanjas lineales son llamados "**contrapesos**", las longitudes de estos contrapesos dependerá de los diseños realizados. Se suele aprovechar los contrapeso, para guiarlos en dirección de los vientos y de esta manera poder hacer que tengan una conexión directa a la malla de tierra.

- **Anillos**, van alrededor tanto de la torre como de la caseta de equipos y varían según las dimensiones que estos tengan.

- **Soldadura exotérmica**, tal como ya se describió, su rol es suma importancia, pues en presencia de rayos los esfuerzos mecánicos a los que se someten las uniones son altos, por tanto es recomendable asegurar estas uniones ya que si estas dejan de unir las mallas entonces tendríamos una configuración distinta a la diseñada inicialmente con resultados que podrían ser perjudiciales. También existen en el mercado una serie de elementos denominados “**conectores certificados**”, los cuales cumplen el mismo rol.
- **Conectores Doble ojo**, no aparecen en el esquema, pero son elementos que sirven de unión entre los cables de la malla y las estructuras o de unión a los **barrajes**⁷.

Condiciones de construcción

- Los conductores horizontales deben quedar a 50 cm. bajo la superficie.
- Las cabezas de los electrodos tipo varilla deben quedar a una profundidad mínima de 40 cm.
- Para las conexiones se debe emplear soldadura exotérmica o conectores que cumplen con las recomendaciones de las normas IEC 60364-5-54 / 542.3.2 o la IEEE-837, con el objeto de reducir las resistencias de contacto.

3.4 Diseño del Sistema de Protección Eléctrica, Electrónica

3.4.1 Subestación tipo

Definición:

Aquella cuyo objetivo primordial es el de suministrar energía en un sistema con un nivel de tensión diferente. Se denomina de elevación cuando la tensión de salida es mayor que la de entrada, lo contrario es denominado reductor.

FUENTE: *Subestaciones de alta y extra alta tensión, segunda edición, Mejía Villegas S.A.Colombia. Capítulo 2, página 42, ítem 2.6.2.2.3*

7: Barraje, Conductor de tierra colectiva, usualmente una barra de cobre o un cable que permite la unión de dos o más conductores y garantiza el mismo potencial

Recomendaciones:

- Colocar los elementos de seguridad “DPS” o mal llamados pararrayos de línea, siguiendo la disposición mostrada en la figura 42
- Los cables de unión por cada metro genera una auto inductancia del orden de $1 \mu\text{H}$, por tanto deben ser lo más cortos posibles

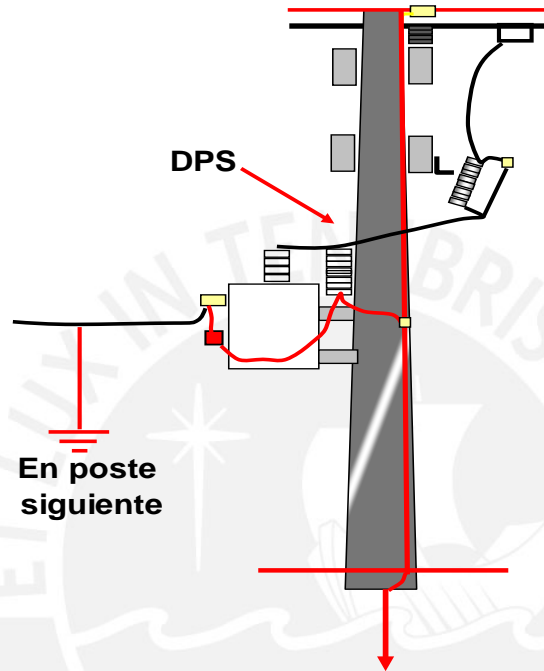


Figura 27

Correcta disposición de los elementos en un transformador en poste

Para colocar correctamente el dispositivo contra sobre tensiones (DPS), se debe seguir el esquema de la figura 16, del punto 2.5.1 ya definido.

3.4.2 Protección interior

La Protección interior normalmente es obviada o se ve resumida a conectar a tierra los equipos que así lo dispongan y aún tengamos un sistema de protección exterior muy bueno los equipos podrían sufrir daño, debido a las peligrosas tensiones que se generan.

La Norma Motorola nos brinda imágenes de ejemplos de una buena implementación de las protecciones interiores, tal como lo observamos en la figura 28.

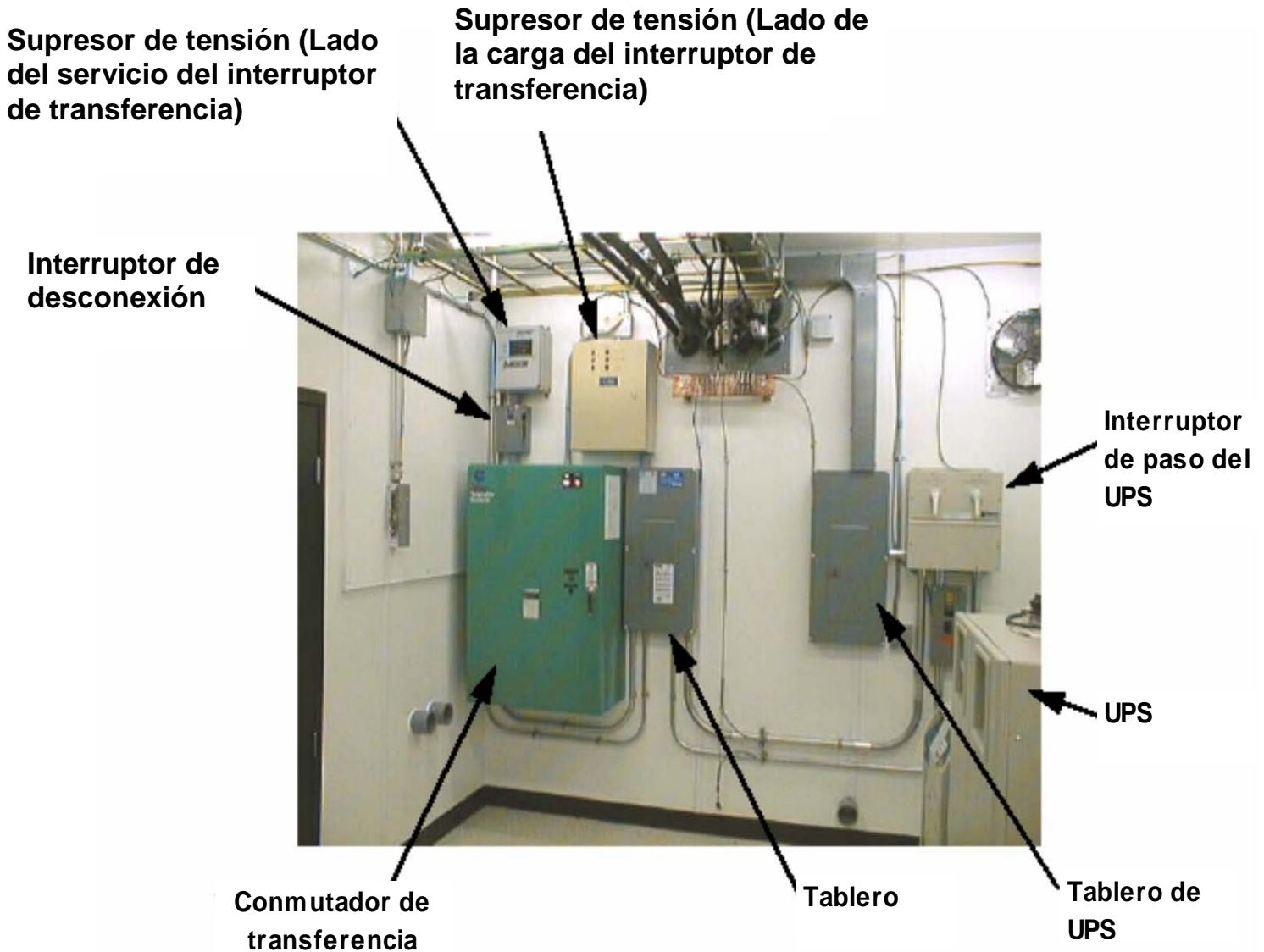


Figura 28
Correcta disposición de los elementos en el interior del cuarto de equipos

FUENTE: Motorola R56

A continuación detallaremos las principales consideraciones a tener en cuenta para tener una efectiva protección interior.

3.4.3 Conexiones a tierra y equipotencialización interior

Observemos los esquemas de las figuras 29, en la que se puede ver la manera sugerida de colocar los conductores a tierra.

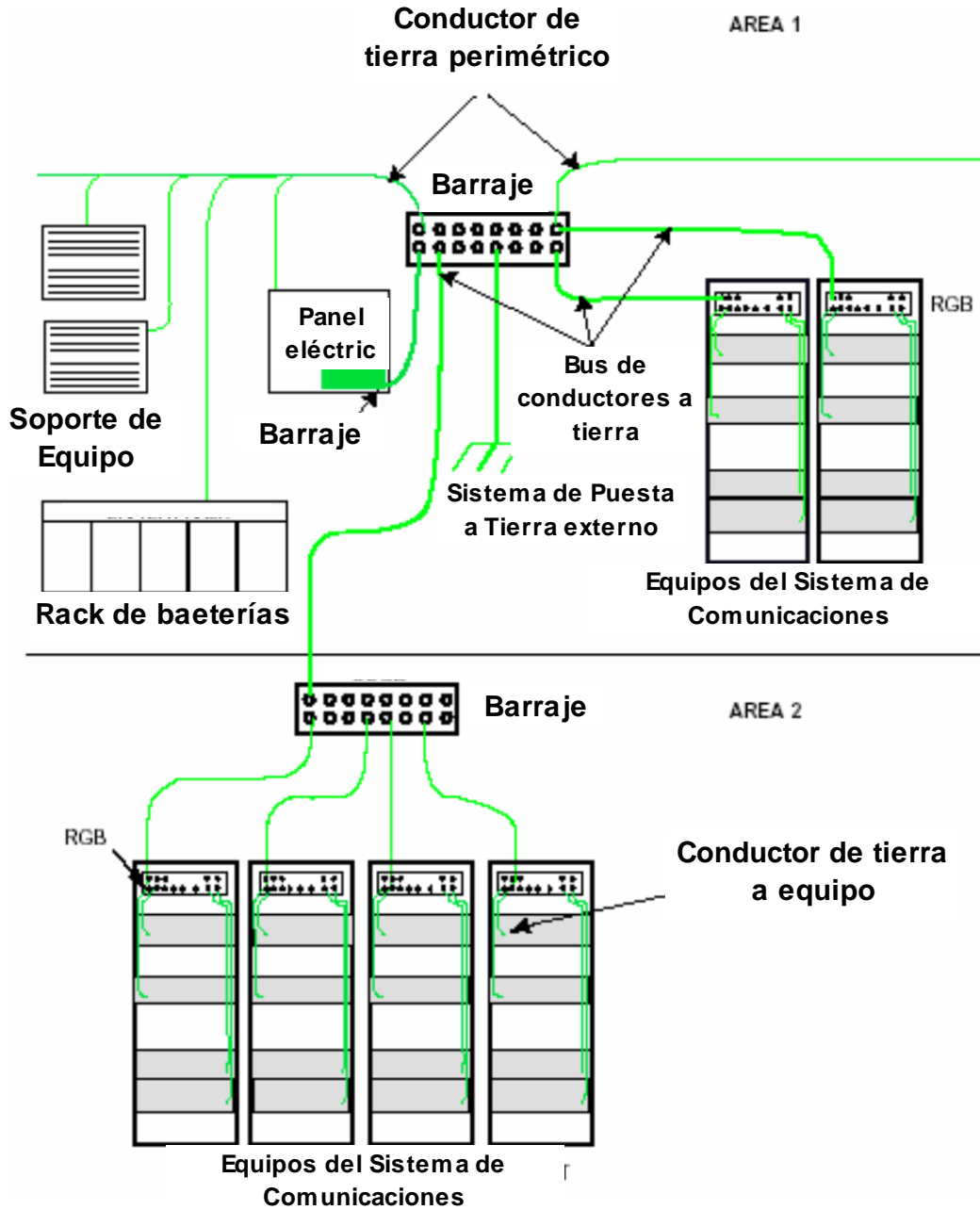


Figura 29
Conexión típica de tierras

FUENTE: Motorola R56

Se debe tener cuidado en conectar las estructuras a tierra, observando la figura 30, podemos tener un mejor criterio al respecto

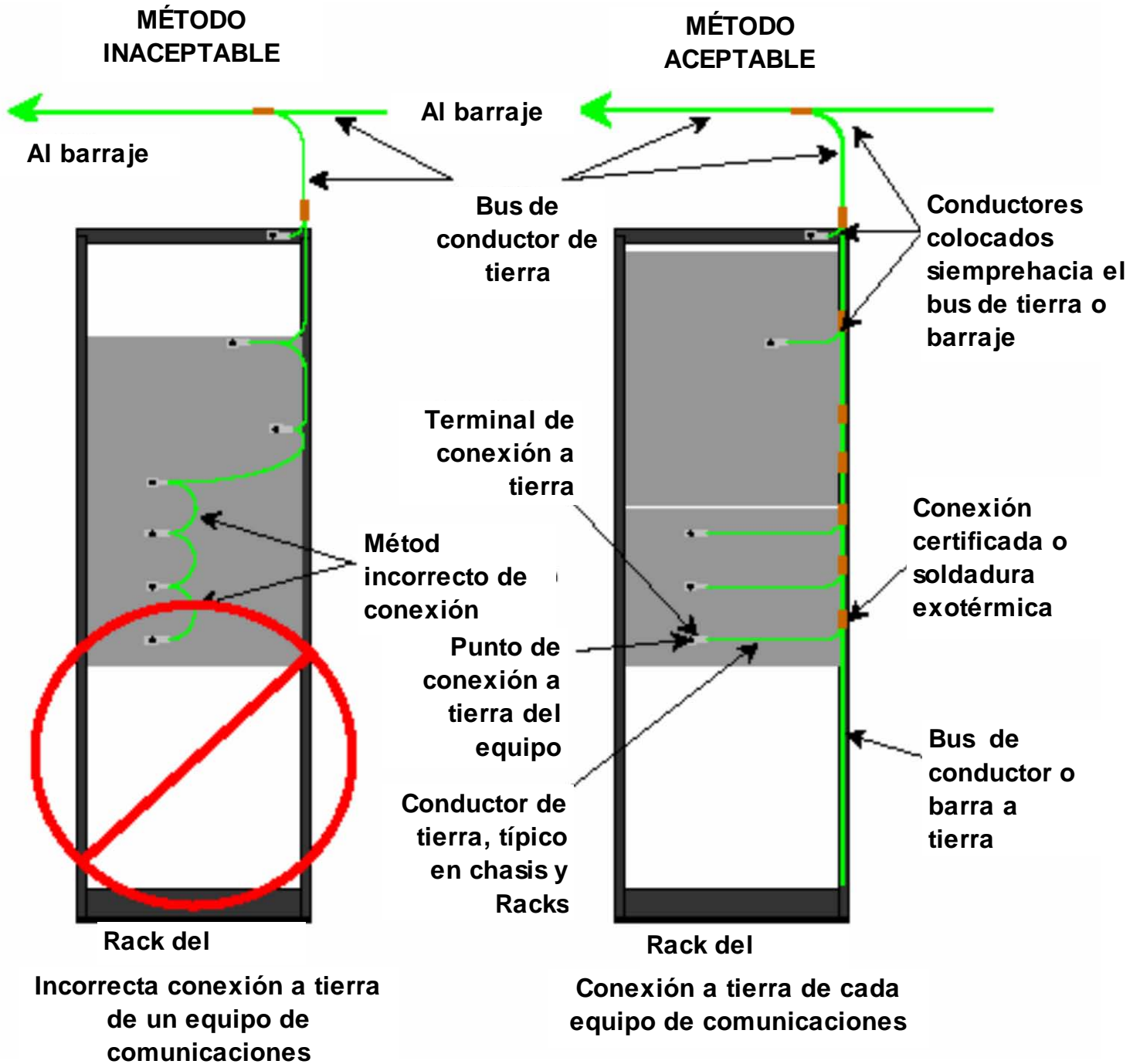


Figura 30
Forma incorrecta y correcta de conexiones

FUENTE: Motorola R56

3.4.4 Barrajes de tierra interior

Los barrajes deben colocarse adecuadamente, por ejemplo podemos observar los esquemas siguientes:

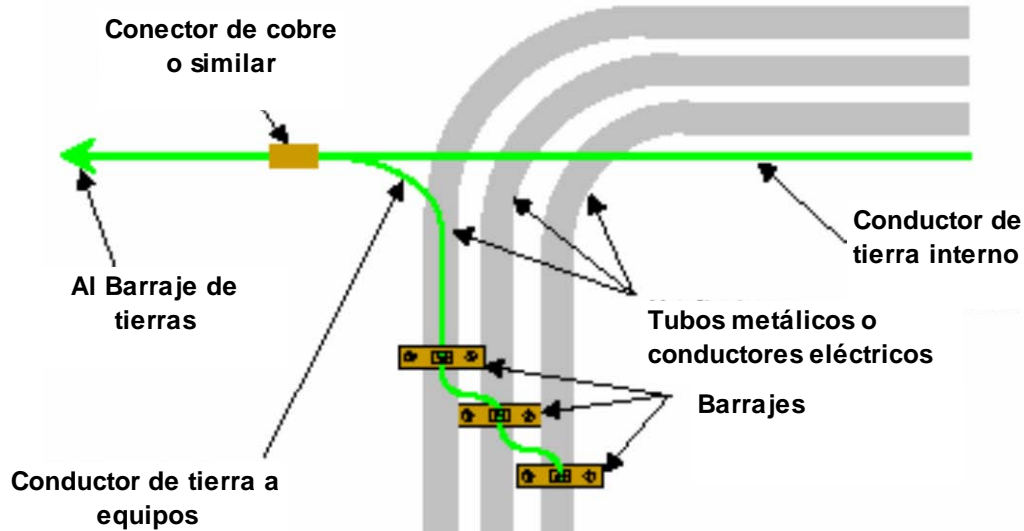


Figura 31
Barrajes correctamente instalados

FUENTE: Motorola R56

3.4.5 Filtros y protecciones

TVSS, de sus siglas en inglés: **T**ransient **V**oltaje **S**urge **S**upressours, son los supresores de transitorios de voltaje que son instalados en la red eléctrica, siguiendo el esquema enunciado en la Norma Motorola R56:

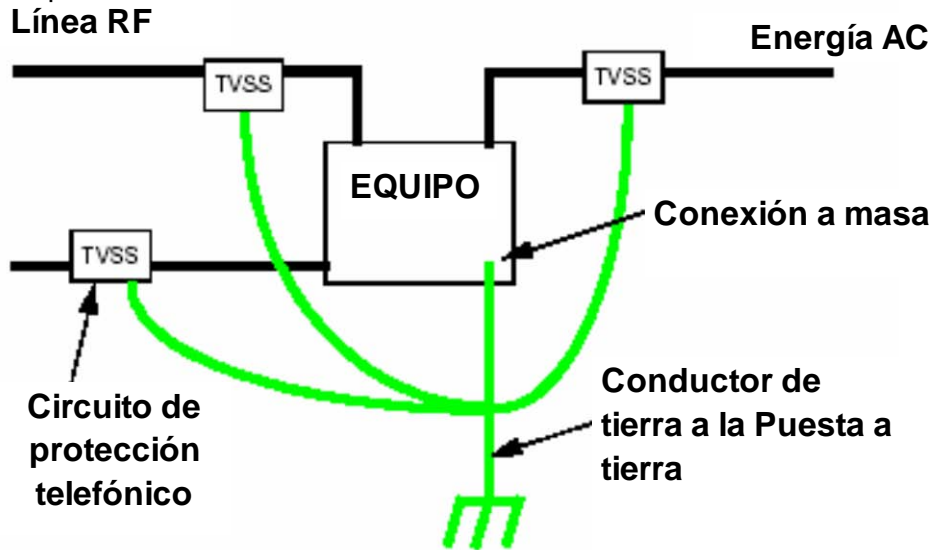


Figura 32
Supresores de transitorios de Voltaje: TVSS y su conexión a tierra

FUENTE: Motorola R56

Un típico TVSS, presenta el siguiente esquema de conexión:

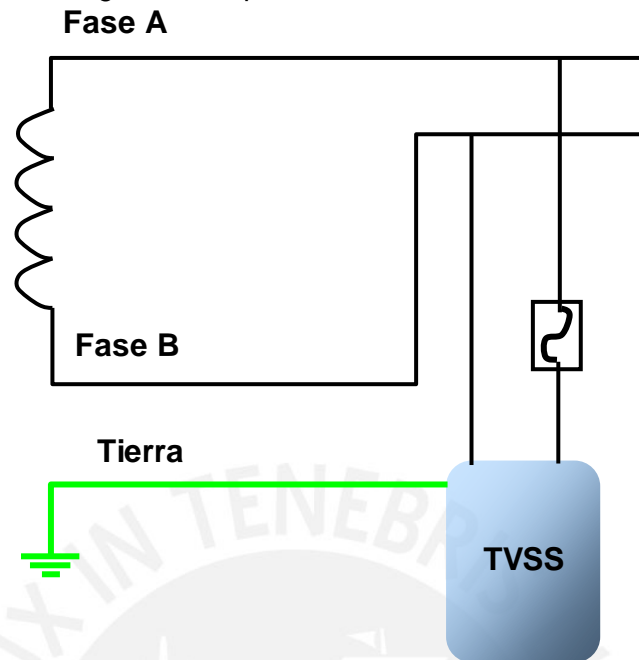


Figura 33
Circuito típico de un TVSS

Dispositivos de Protección en HF

Existe una gran variedad de filtros, dependiendo de la aplicación se puede elegir el más adecuado.

Halo de repartición de tierras

Elemento con el que se distribuye tierras a los equipos que lo requieran.

DPS, Los dispositivos contra sobre corrientes, se instalan en el tablero eléctrico de acuerdo a los requerimientos eléctrico del sistema.

3.4.6 Requisitos mínimos para la Protección del Transmisor

Un sistema correctamente diseñado incorporará varias técnicas para reducir la probabilidad de los transmisores que causan interferencia a una señal del receptor.

Cada transmisor debe tener un aislador, un filtro pasa bajos y pasa bandas, en cantidad necesaria para que un transmisor alcance la filtración apropiada, dependiendo del equipo y las frecuencias del transmisor y del lugar así como de los demás equipos de transmisión.

Un aislador se utiliza en un transmisor para reducir la cantidad de energía de ruido, que se está volviendo en la etapa final del amplificador del sistema de la antena. Esta acción reduce alternadamente los niveles indeseables de la señal de otras señales de ruido que se vuelven en la etapa final del amplificador y ayuda a prevenir mezclarse de frecuencias dentro del dispositivo no lineal. El proceso de mezcla se llama intermodulación del transmisor y puede generar las frecuencias que interfieren para los receptores. En algunas situaciones, el aislador puede producir las emisiones falsas en segundo lugar armónicas, que son también dañinas a la recepción del receptor. Para proteger contra esto se utiliza un filtro pasa bajos entre la etapa del aislador y el sistema de la antena.

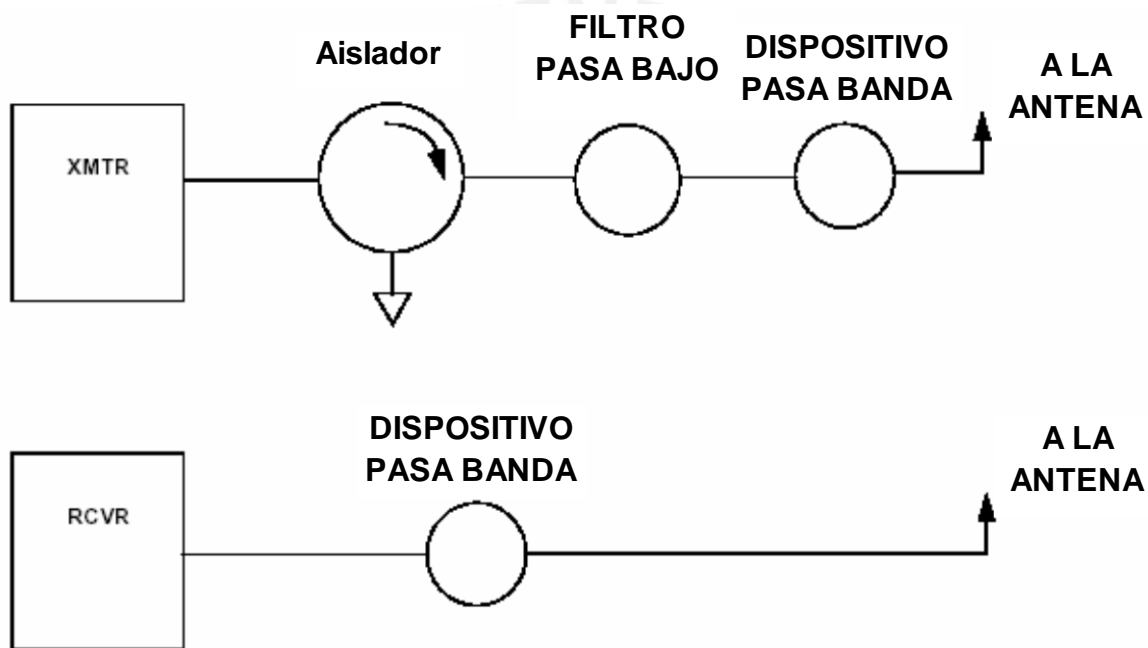


Figura 34
Configuración y disposición de los Filtros Pasa Bajos y Pasa Banda

Un filtro pasa banda es un circuito resonante de Q, que se diseña para pasar una banda estrecha de frecuencias con pérdida de energía muy pequeña mientras que atenúa el resto de las frecuencias non-resonante. Estos filtros se deben instalar entre el transmisor y el sistema de la antena para reducir señales falsas y ruido de la banda lateral del transmisor, que pudo ser irradiado del transmisor y degradar el funcionamiento de receptores próximos. El uso de estos filtros también reducirá al mínimo la intermodulación del transmisor puesto que todas las señales de otros transmisores próximos serán atenuadas en la acción del filtro.

A continuación una referencia de las frecuencias a trabajar de acuerdo dispositivos a proteger:

Tabla 17
Frecuencias de trabajo

Frecuencia [MHz]	Aislamiento reverso mínimo [dB]	Filtro Pasa Bajo y Pasa Banda [dB]	Observaciones
25 - 54	20	20	Los dB de los Filtros son referenciados a un Megaciclo de la frecuencia a transmitir
66 - 88	25	20	
130 - 225	50	25	
276 - 284	50	25	
400 - 512	50	15	
806 - 960	50	15	

FUENTE: Trabajos de Protección integral contra descargas atmosféricas en Colombia, FAVIO CASAS OSPINA

3.4.7 Kit de tierras interior

Al igual que los kit de tierras exteriores, los interiores cumplen la misma función de llevar a tierra las pantallas de los cables, tal como se muestra en la figura 54, en la figura 55, se muestra un detalle de conexión.

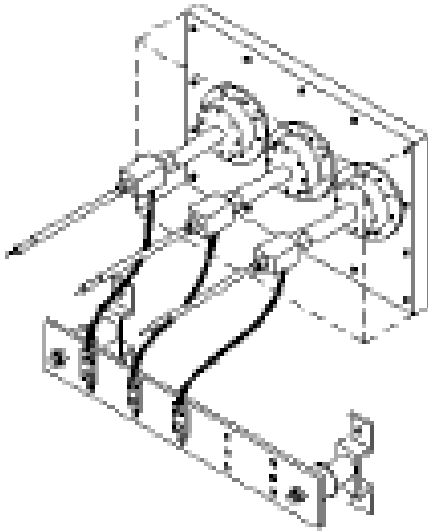


Figura 35
Kit de tierras interior

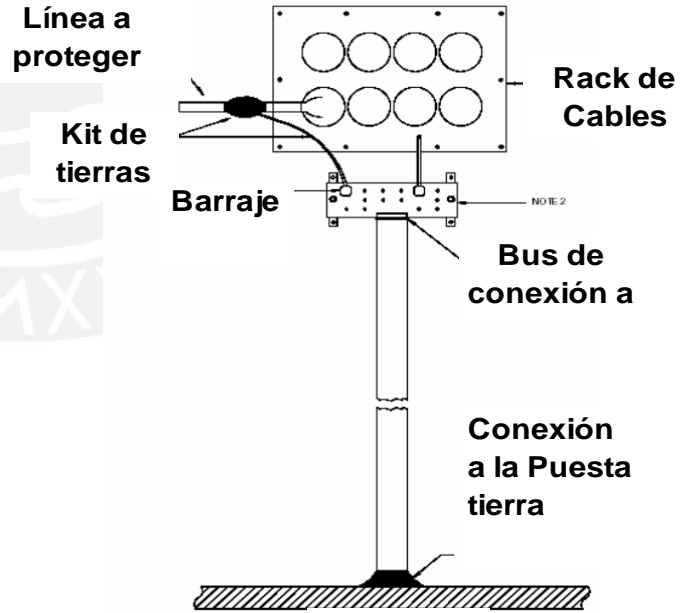


Figura 36
Detalle de aplicación del Kit de tierras

FUENTE: Motorola R56

3.5 Energía de Respaldo para el transformador

3.5.1 Paneles Solares

Los paneles solares son una buena alternativa como respaldo de la energía suministrada al cuarto de equipos, en la Norma Motorola encontramos los siguientes ejemplos:



Figura 37

Aplicaciones típicas de paneles solares:

FUENTE: Motorola R56

Se debe observar como detalle las alturas que ocupan, pues podrían ser puntos de impactos directos, de ser necesario se tendrían que apantallar.

3.5.2 Baterías

El arreglo de las baterías puede ser simple o bastante complejo, dependiendo de las características de la carga que es sostenida, se clasifica sobre Amperio-Horas (AH). Una duración de ocho horas representa un amperaje clasificado.



Figura 38

Arreglo típico de baterías

FUENTE: Motorola R56

Para realizar con seguridad el mantenimiento de la batería, lo mejor es hacer una desconexión individual, para cada cadena de baterías para aislar una secuencia del resto del sistema. Evitar la formación de arcos sobre el circuito, y prevenir cualquier conductor vivo expuesto.

3.5.3 Generadores

Los generadores son otra opción de respaldo de energía, también suelen ser usados como fuente primaria de energía en lugares muy apartados o donde no es posible tener energía eléctrica vía una línea de transmisión o similar.

Como en los demás casos, se tiene que asegurar la conexión de todas las partes metálicas a tierra y sus elementos de protección deben estar en perfectas condiciones.

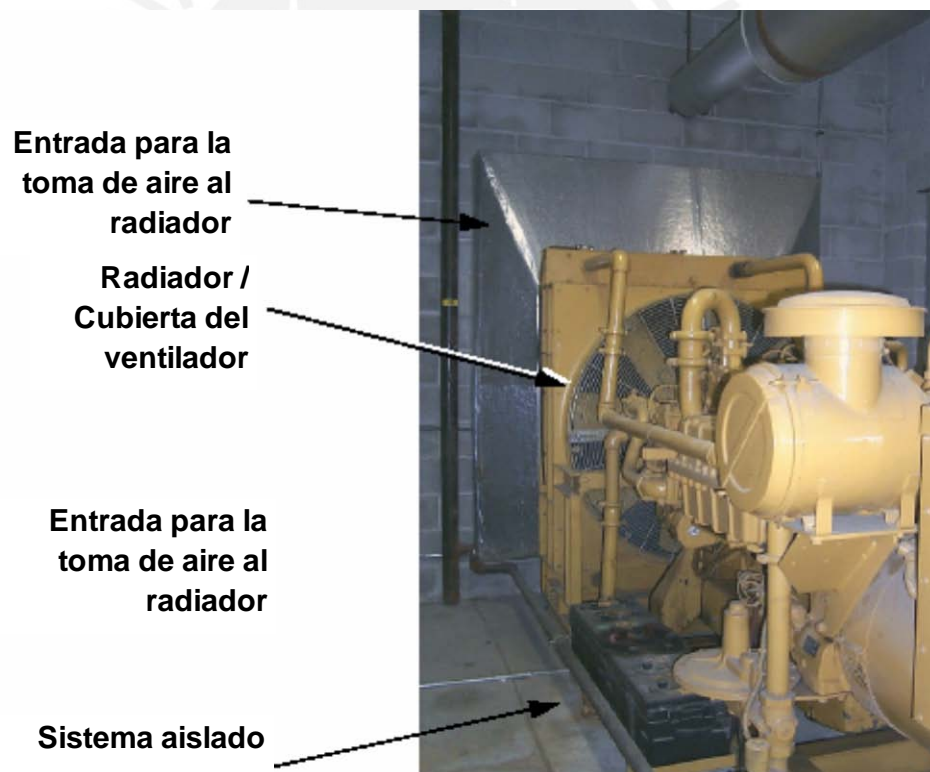


Figura 39
Instalación típica de un generador

FUENTE: Motorola R56

CASO 1. CON CONMUTACIÓN DEL NEUTRO

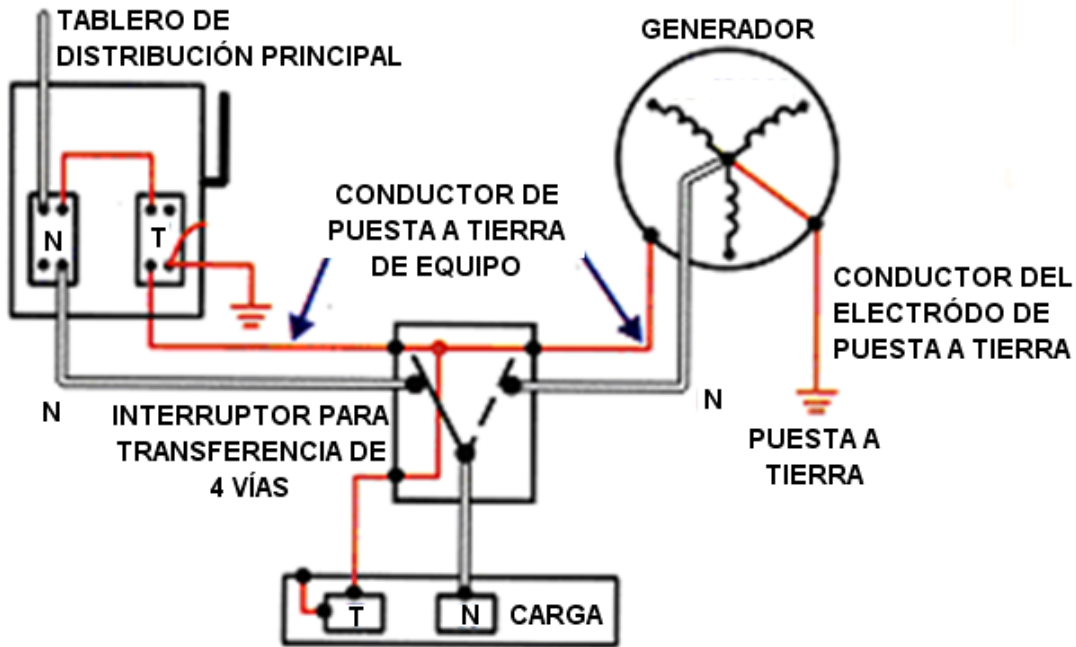


Figura 40-a

Instalación con fuente de respaldo

FUENTE: Libro Tierras, Favio Casas Ospina, Bogotá Colombia

CASO 2. SIN CONMUTACIÓN DEL NEUTRO

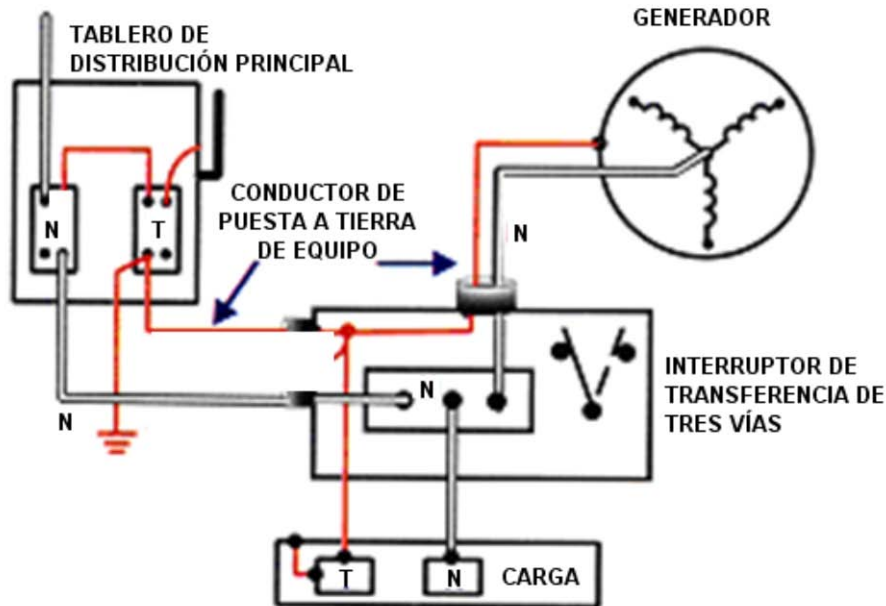


Figura 40-B

Instalación con fuente de respaldo

FUENTE: Libro Tierras, Favio Casas Ospina, Bogotá Colombia

Capítulo 4

SIMULACION Y DISEÑO DE APLICACIÓN GENERAL

Se detalla a continuación un diseño general sobre la base de una estación real de comunicaciones en la ciudad de Cerro de Pasco

4.1 ANÁLISIS DE RESISTIVIDAD

Las mediciones de resistividad, utilizando el método de Wenner descrito en el punto 2.4.3.1, son:

Tabla 18
Datos de campo y cálculo de resistividad según método de Wenner

a [m]	R [Ω]	Rho_a [Ω -m]
1	38,20	240
2	39,79	500
3	31,83	600
4	25,86	650
5	21,49	675
6	18,04	680
7	15,64	688
8	13,73	690

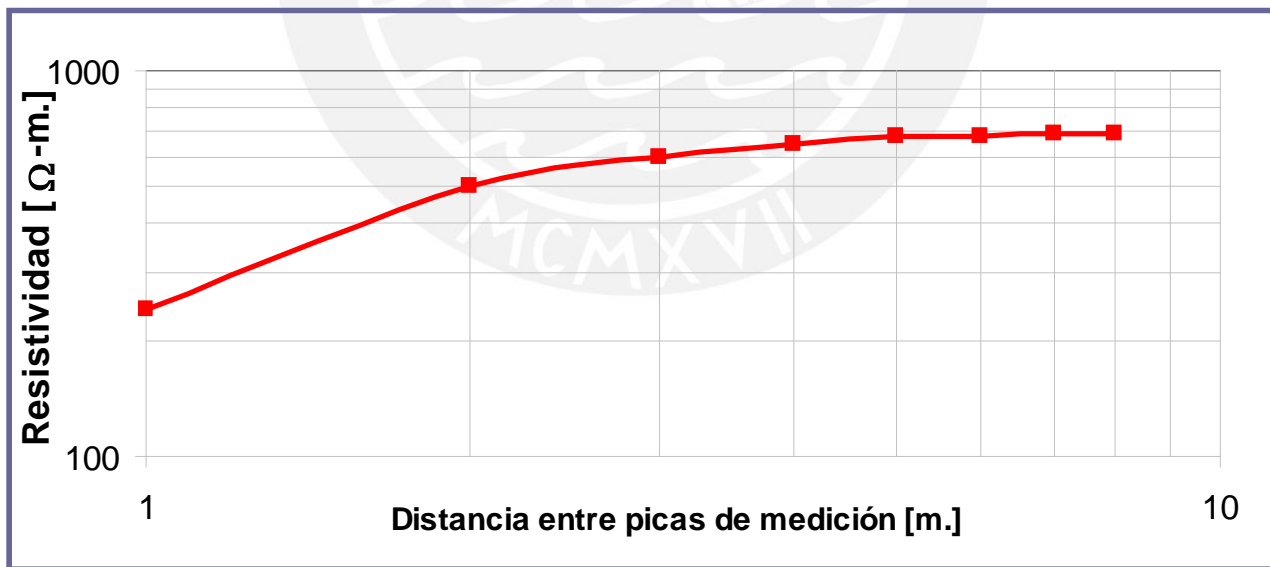


Figura 42
Gráfica de la resistividad de la zona de trabajo

Para facilitar los cálculos de caracterización (estratificación del terreno) y diseño de la puesta a tierra, se ha trabajado una hoja de cálculo, el cual se muestra a continuación

4.2 CARACTERIZACIÓN DEL TERRENO

DIANNE JN/EW

PROYECTO	ESTACIÓN DE COMUNICACIONES				
Lugar				Ciudad	CERRO DE PASCO
Fecha				R.V.	JN/MW

1. ESTRATIFICACIÓN DEL TERRENO

Datos de entrada

a [m]	A	B	C	D	E	F
	Rho [Ohms-m]	R [Ohms]	R [Ohms]	R [Ohms]	R [Ohms]	R [Ohms]
1,0	240,00					
2,0	500,00					
3,0	600,00					
4,0	650,00					
5,0	675,00					
6,0	680,00					
7,0	688,00					
8,0	690,00					

Procesando

a [m]	R [Ohms]	Rho Medido [Ohms-m]	Rho Calculado [Ohms-m] Mediante Una ecuación cuadrática $a_0 + a_1 X + a_2 X^2$	% Error	Rho Calculado [Ohms-m] Mediante una ecuación exponencial $m X^a$	% Error
1,0	38,20	240,0	293,6	22%	303,6	27%
2,0	39,79	500,0	444,3	-11%	419,6	-16%
3,0	31,83	600,0	562,0	-6%	507,0	-15%
4,0	25,86	650,0	646,8	0%	579,9	-11%
5,0	21,49	675,0	698,6	4%	643,6	-5%
6,0	18,04	680,0	717,6	6%	700,8	3%
7,0	15,64	688,0	703,5	2%	753,1	9%
8,0	13,73	690,0	656,5	-5%	801,5	16%

RESULTADOS

Mediante Curva cuadrática			Mediante Curva Exponencial		
Rho_1 [Ohms-m]	Rho_2 [Ohms-m]	h1 [m]	Rho_1 [Ohms-m]	Rho_2 [Ohms-m]	h1 [m]
226,6	571,7	0,61	226,6	3.258,9	0,53

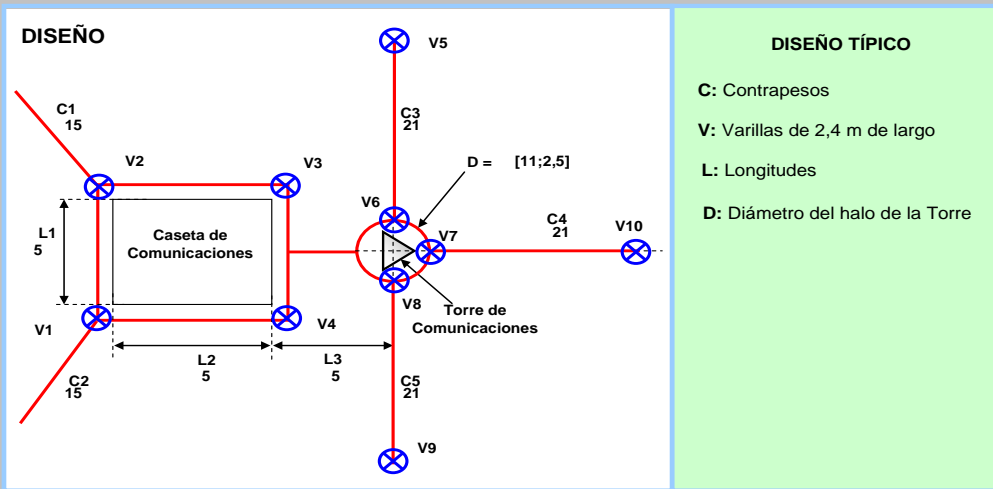
ITERACIÓN Y ERROR

>1	<input type="text" value="0"/>	ERROR	<input type="text" value="0,0001%"/>	>1	<input type="text" value="1"/>	ERROR	<input type="text" value="0,0015%"/>
◀			▶	◀			▶
◀			▶	◀			▶
CONSTANTES				CONSTANTES			
<input type="text" value="1,06"/>	<input type="text" value="1,06"/>			<input type="text" value="1,06"/>	<input type="text" value="1,06"/>		
<input type="text" value="18.404"/>	<input type="text" value="0"/>			<input type="text" value="176"/>	<input type="text" value="16.026"/>		

4.3 DISEÑO DE PUESTA A TIERRA

2. DISEÑO DE PUESTA A TIERRA

FIGURA Nº 1



DISEÑO TÍPICO

- C: Contrapesos
- V: Varillas de 2,4 m de largo
- L: Longitudes
- D: Diámetro del halo de la Torre

DATOS GENERALES

Dv	0,02	m	Diámetro de la varilla (5/8" = 0.015875 m; 3/4" = 0.01905 m)
H	30,00	m	Altura de la Torre
z	0,60	m	Profundidad de los electrodos horizontales
u	1		Indica la ubicación, 1: si esta fuera de la caseta, 0 si esta sobre la caseta
S	50	mm ²	Área de la sección del cable a utilizar
he	0,50	m	Profundidad para enterrar electrodos

DATOS DE MALLA DE PUESTA A TIERRA SEGÚN FIG. 1

Variable	Valor	Und	Significado
L1	5	m	Ancho de la caseta
L2	5	m	Largo de la caseta
L3	5	m	Distancia de la caseta al centro de la Torre
C1	15	m	Contrapeso de la esquina de la caseta
C2	15	m	Contrapeso de la esquina de la caseta
C3	21	m	Contrapeso en dirección del viento de la torre
C4	21	m	Contrapeso en dirección del viento de la torre
C5	21	m	Contrapeso en dirección del viento de la torre
V1	1	Ok	Varilla en la esquina de la caseta
V2	0	No va	Varilla en la esquina de la caseta
V3	0	No va	Varilla en la esquina de la caseta
V4	0	No va	Varilla en la esquina de la caseta
V5	0	No va	Varilla en el contrapeso de la Torre
V6	0	No va	Varilla en el contrapeso de la Torre
V7	0	No va	Varilla en el contrapeso de la Torre
V8	0	No va	Varilla en el contrapeso de la Torre
V9	1	Ok	Varilla en el contrapeso de la Torre
V10	1	Ok	Varilla en el contrapeso de la Torre
D	1	m	Diámetro del anillo alrededor de la torre

3. RESULTADOS DE ESTIMAR LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

Resistencia de Puesta a Tierra sin tratamiento	14,1	Ω
Eficiencia de tratamiento	70%	
Resistencia Final estimada	4,2	Ω

Observaciones

- 1.- Una eficiencia de 0%, significa que no hay ningún tratamiento de terreno o no se ha utilizado ningún potencializador (Elemento de mejoramiento de la eficiencia de la puesta a tierra)
- 2.- Los valores señalados son referenciales, teóricos, por tanto se debe aplicar factores de seguridad que van del +- 10%
- 3.- Aplicando el factor de seguridad máximo, tendremos:

Resistencia Final estimada 4,6 Ω

Todas la ecuaciones utilizadas se basan en:

Caracterización del terreno:

Ecuación de **TAGG**:

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + 4 \sum^n K^n \left[\frac{1}{\text{Raiz}(1+2na/h1)} - \frac{1}{\text{Raiz}(4+2na/h1)} \right] \dots(1)$$

4.4 PROTECCIÓN EXTERIOR CONTRA RAYOS

Una estación típica de comunicaciones, tiene la disposición física exterior siguiente:

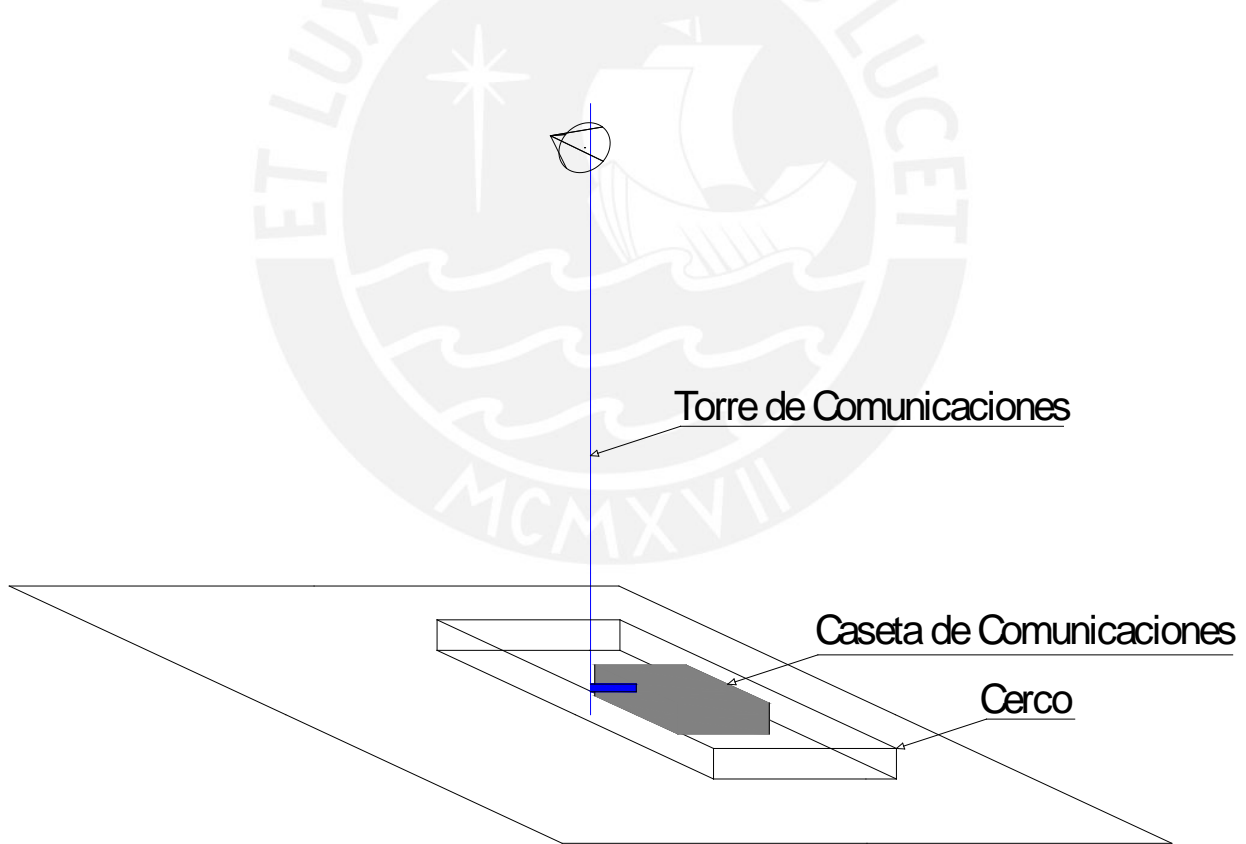


Figura 43
Esquema de estructuras típicas a proteger

4.4.1 DISEÑO DE UBICACIÓN DE PARARRAYOS

Utilizando el método de las esferas rodantes, según punto 2.4.1.1 y tomando el nivel de protección I, ya que es el mínimo señalado en la tabla 9, por tanto $R = 20$ m.

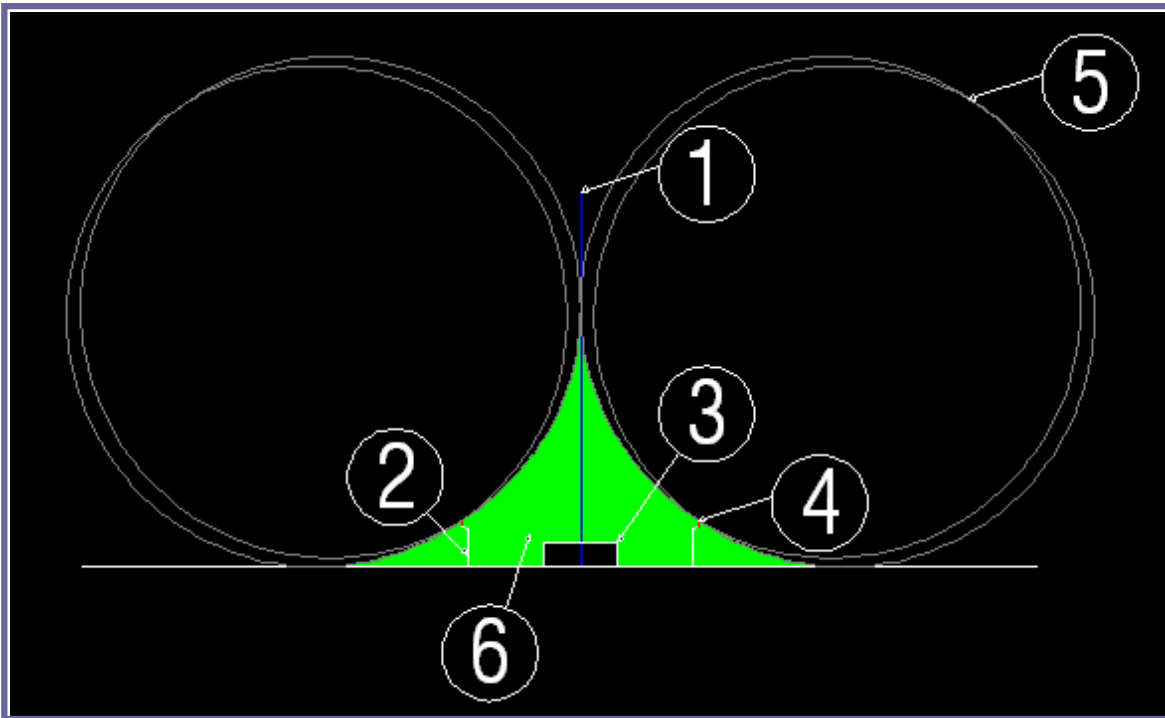


Figura 44
Diseño a escala de protección exterior

Observamos en la figura 44, la aplicación del método señalado, donde:

1. **Torre de comunicaciones**, donde típicamente se coloca un pararrayos, pero según el análisis, por tener 30 m. de altura (Para este caso particular), no requiere el pararrayos, pues la torre está comportándose como un pararrayos.
2. Cerco, que para este caso, requiere de un pararrayos tipo bayoneta de 0,5 m. de longitud
3. Caseta de comunicaciones
4. Punta captadora o bayoneta
5. Esfera rodante ($R=20$ m.)
6. Zona protegida.

Hay que tener en cuenta que los únicos pararrayos aceptados por la comunidad internacional son los Franklin, ver Anexo 7: Pararrayos PDC y Radioactivos.

4.4.2 DETALLES DE CADA ELEMENTO IMPLEMENTADO

CERCO

El sistema siguiente se propone para colocar en cada esquina del cerco:

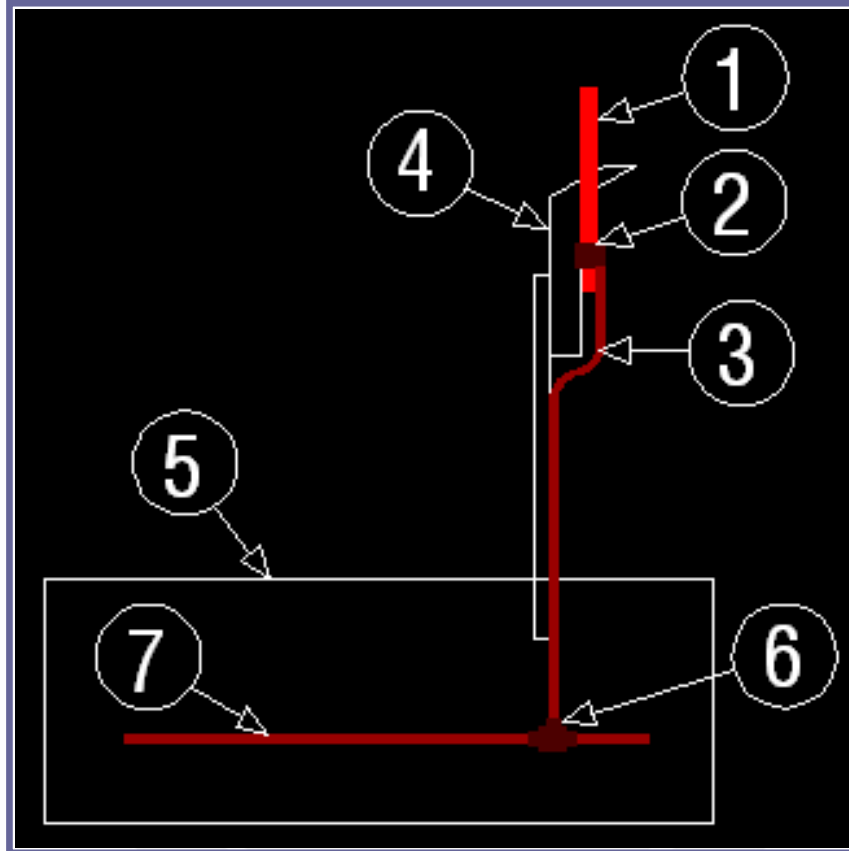


Figura 45
Detalle de apantallamiento en el cerco

Donde:

1. Bayoneta
2. Soldadura exotérmica
3. Bajante, cable de cobre desnudo de 70 mm²
4. Cerco
5. Terreno o suelo
6. Soldadura exotérmica
7. Cable perteneciente al Sistema de Puesta a Tierra General

ANTENA DE COMUNICACIONES

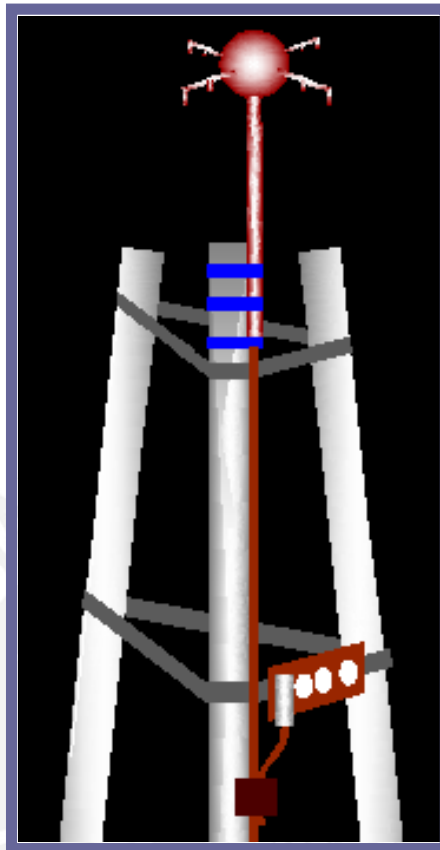


Figura 46
Parte superior de la antena de comunicaciones

En la antena de comunicaciones, normalmente y con sustento en los perfiles analizados con el método de la esfera rodante se coloca un pararrayos, la misma torre es un pararrayos natural que será colocada a tierra en la base.

La bajante de cobre, recoge las tierras que van conectadas a los barrajes que se requieran según los equipos instalados, si los cables que se utilizan tienen algún tipo de pantalla metálica, como por ejemplo cobre, se coloca a tierra mediante los kits de tierra ya analizados en el punto 3.4.7.

CASETA DE COMUNICACIONES

La caseta de comunicaciones, es protegida contra rayos exteriormente y se colocan todas las pantallas de cables que entren mediante los kits de tierras.

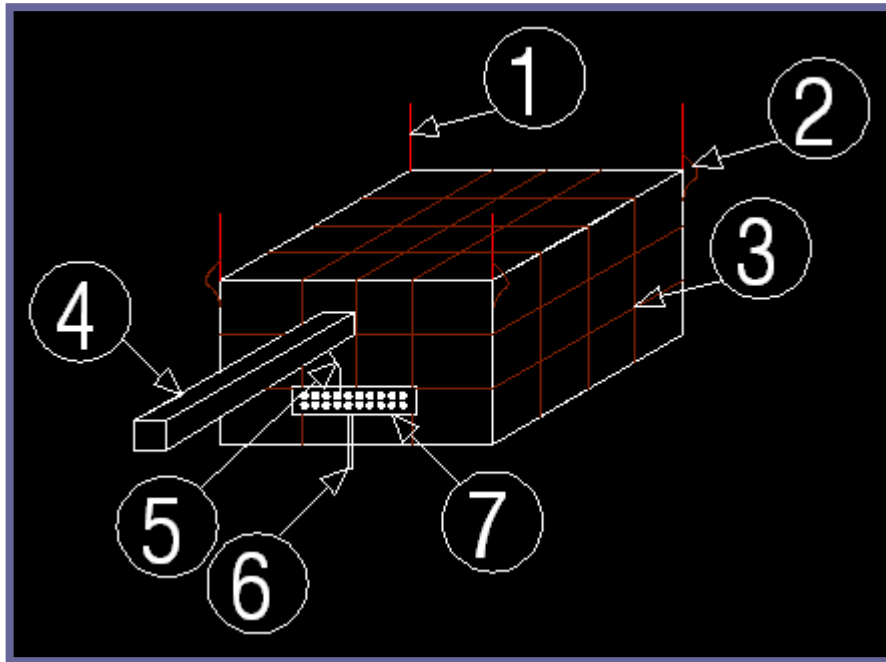


Figura 47
Caseta de comunicaciones-Protección exterior

Observamos en la figura 47, el detalle de protección, donde:

1. Bayoneta o punta captadora
2. "Cola" o conexión de la bayoneta a tierra (Cable de cobre desnudo de 70 mm²)
3. La jaula de Faraday es trabajada con flejes de cobre de 1 ½ " a 2 " de ancho
4. Escalerilla o bandeja de cables que vienen de la antena de comunicaciones y entran a la caseta.
5. Los cables que tienen pantalla se apantallan con los kits de tierra hacia el barraje de tierras
6. El barraje de tierras es colocado a tierra (malla de tierra)
7. Barraje de tierras

BOBINA DE CHOQUE

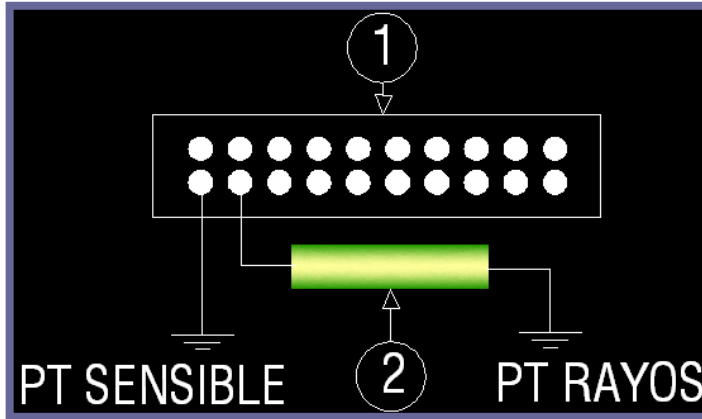


Figura 48
Bobina De Choque

La Bobina de Choque, tal como observamos en la figura 48, une las puestas a tierra sensibles y de rayos cumpliendo en baja frecuencia con lo señalado en el punto 2.4.3.3 según la IEC 61000-5-2.

En la figura 48, tenemos:

1. Barraje de tierras
2. Bobina de Choque

VIENTOS DE LA TORRE

Toda estructura metálica debe estar solidamente colocado a tierra, los vientos de la torre tienen una forma especial de ir a tierra:

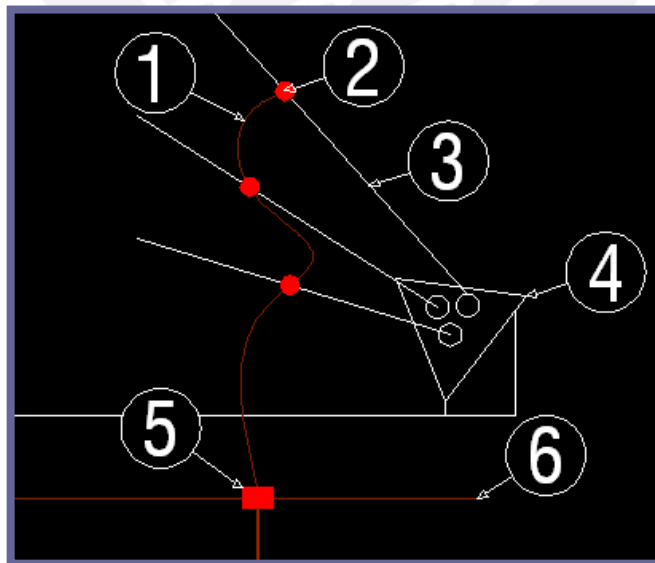


Figura 49
Vientos de la torre de comunicaciones

Los vientos se colocan a tierra, según la figura 49, donde:

1. “Cola” o cable de cobre desnudo de 70 mm²
2. Conector bimetálico (Cobre – acero galvanizado)
3. Viento (Cable de acero galvanizado)
4. Ancla
5. Soldadura exotérmica (Une la “Cola” a la Puesta a Tierra)
6. Puesta a Tierra

4.5 PROTECCIÓN INTERIOR CONTRA RAYOS

Para la protección interior de la caseta, se analizan las entradas y salidas, los equipos a proteger, considerando sus características de corriente, tensión y frecuencia aplicamos los criterios señalados en los puntos 3.4.2. al 3.4.7.

Se recomienda colocar un transformador de aislamiento a la entrada del sistema, los dispositivos contra sobretensiones (DPS) son colocados en función de las características de la red y los equipos a proteger.

Por ejemplo si tenemos tres líneas telefónicas, el DPS se instala en las 3 líneas, este modulo pico protector es el PM230 que tiene un voltaje de operación (VSO)⁸ de 180V y voltaje de ruptura DC de 230 V +/- 15%.

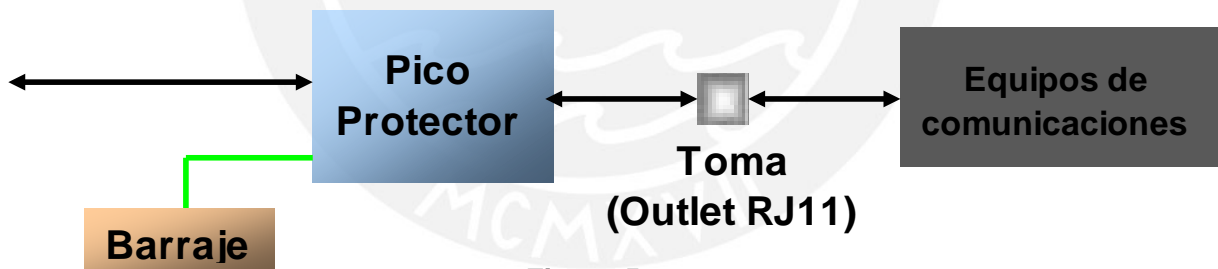


Figura 50

Esquema de instalación del DPS

Este sistema tiene dos componentes:

- a) Un módulo del protector de sobre tensión
- b) Un kit de tierra.

Nota:

[8]: **VSO**: Voltaje de Operación, rango de voltaje al cual un módulo dado, se activará para desviar la sobre energía a tierra

Cada módulo contiene dos fusibles de 350mA reemplazables y componentes de estado sólido, además de cuatro puntos de acceso para prueba de línea.

El kit de tierra consiste en una ranura que une el dispositivo con una línea de tierra a lo largo del modulo, la misma que se conecta al barraje equipotencial de puesta a tierra.

De igual manera se realiza la protección interna de los cables coaxiales de comunicación. Se utiliza para este cometido el dispositivo **IS-B50LN-C1**, el cual se inserta a la altura del BE (barraje equipotencial o barraje de tierras), dentro del cuarto de equipos.

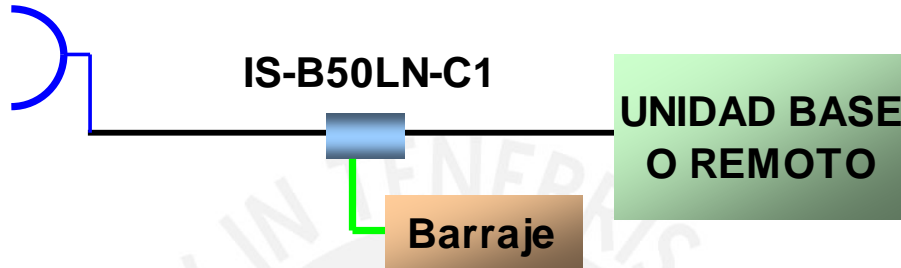


Figura 51

El rango de frecuencia de operación es 50MHz a 700MHz de acuerdo a las especificaciones propias de los equipos.

En lo referente a la protección de energía de los equipos de comunicación, se usa un supresor de transitorios de voltaje 1-800-647-TVSS como se indica en el esquema.

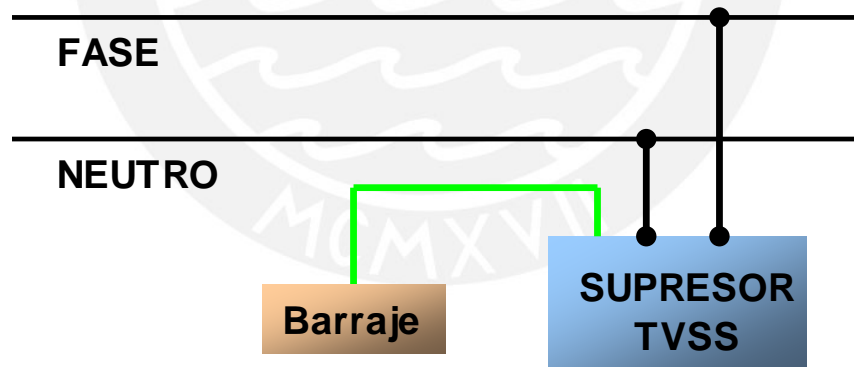


Figura 52
Esquema de instalación del TVSS

El criterio general es minimizar el efecto o pulso nocivo producto de la sobretensión o falla en el sistema de manera directa o inducida a niveles que no causen daño alguno a los equipos.

En el Anexo 2, podemos ver el esquema general de protección

CONCLUSIONES

1. Los Sistemas de Protección Integral están regidos por la Normatividad nacional e internacional, donde podemos encontrar todos los aspectos de diseño, materiales y consideraciones para realizar una adecuada protección
2. El Rayo es un evento probabilístico y como tal no existe una manera cien por ciento segura de evitarlo, lo que se hace es minimizar su efecto al mínimo posible a fin de salvaguardar los elementos materiales y la vida humana.
3. Con una adecuada Protección exterior, se garantizará que los impactos directos del rayo sean minimizados y que los efectos de los indirectos no sean nocivos y se minimicen sus efectos.
4. Los sistemas de captación son fundamentales como punto de impacto directo de un rayo, por lo tanto se debe tener gran cuidado a fin de evitar posibles daños, problemas de índole normativo y comercial, por ejemplo el uso de pararrayos radioactivos, los cuales están prohibidos por toda la comunidad científica.
5. Existen metodologías de diseño especificadas en las normas que nos brindan criterios y consideraciones a tomar en cuenta, siempre regidos bajo nuestra realidad tanto geográfica como económica.
6. El Método de la Esfera Rodante, nos brinda una herramienta eficaz de diseño en la protección exterior, para estructuras de hasta 60 m. de altura.
7. Todo el análisis de seguridad se basa en los niveles establecidos por la Norma IEC 61024, la cual establece cuatro niveles: I, II, III y IV
8. Un segundo método de protección exterior es el del Ángulo de Protección, que se usa en estructuras simples, pero limitado a la altura de los mismos y al tamaño del Terminal aéreo.
9. El tercer método tratado es el llamado Enmallado, que es útil para proteger superficies planas, como techos y terrazas.
10. Los requisitos mínimos a considerar en una Puesta a Tierra son:
 - ✓ Un adecuado valor de la resistencia para cada tipo de instalación
 - ✓ Mínima variación de resistencia a cambios ambientales
 - ✓ Garantizar una vida útil razonable (Como todo material eléctrico por lo menos debería presentar sus mismas características durante 10 años).
 - ✓ Resistente a la corrosión.
 - ✓ Costos razonables, sin comprometer la seguridad.
 - ✓ Permitir su mantenimiento periódico.

- ✓ Cumplir los requerimientos de las normas y especificaciones
11. Las principales funciones que debe tener una puesta a tierra son:
 - ✓ Garantizar condiciones de seguridad a los seres vivos.
 - ✓ Permitir a los equipos de protección despejar rápidamente las fallas.
 - ✓ Servir de referencia al sistema eléctrico.
 - ✓ Conducir y disipar las corrientes de falla con suficiente capacidad.
 - ✓ Eliminar ruidos eléctricos.
 - ✓ En algunos casos, servir como conductor de retorno.
 - ✓ Transmitir señales de RF en onda media.
 12. De acuerdo con IEC 61000-5-2/1997, todas las puestas a tierra deben estar interconectadas a través de bajas impedancias
 13. Para las conexiones se emplean soldaduras exotérmicas y conectores que cumplan con las recomendaciones de las normas IEC 60364-5-54 / 542.3.2, NTC 4628 o la IEEE-837, con el objeto de reducir las resistencias de contacto
 14. Un Dispositivo contra sobretensiones (DPS), es el elemento que , limita el nivel de la sobretensión, mediante la absorción de la mayor parte de la energía transitoria, minimizando la transmitida a los equipos y reflejando la otra parte hacia la red.
 15. De acuerdo con el artículo 250-75 de la NFPA 70 y la API 2003 – 1998 Protection Against Ignitions Arising Out of Static, las canalizaciones metálicas, bandejas porta cables, blindajes de cables, armaduras de cables, encerramientos, marcos, herrajes y otras partes metálicas no portadoras de corriente, se deben conectar equipotencialmente y en forma efectiva, para asegurar la continuidad eléctrica y la capacidad de conducir en forma segura cualquier corriente de falla que les sea impuesta. Se deben quitar de las roscas, puntos y superficies de contacto todas las pinturas, barnices o recubrimientos similares no conductores o bien conectarlos por medio de accesorios diseñados de tal manera que hagan innecesario dicho proceso.
 16. Los puentes de conexión equipotencial deben ser de cobre u otro material resistente a la corrosión.
 17. Basados en las recomendaciones de la Norma Motorola R56, podemos definir un modelo general de diseño para proteger una caseta de comunicaciones con los siguientes elementos:

- ✓ Caseta de equipos (Donde encontraremos los equipos propiamente dichos y los sistemas de respaldo)
 - ✓ Estructura o torre en la que se colocan antenas, equipos, etc. de comunicaciones, así como elementos de protección contra rayos como pararrayos, barrajes, bajantes, etc.
 - ✓ Vientos de la estructura o torre.
 - ✓ Cerco metálico alrededor de la zona.
18. De acuerdo con IEC 62305-4; los DPS deben colocarse coordinadamente. La entrada debe considerar una honda 10/350, en las siguientes etapas una honda 8/20 y que las distancias entre ellos, no deben superar los 10 m.
 19. Los DPS o también llamados "Pararrayos de línea, deben colocarse correctamente a fin de tener una primera etapa correcta en la protección integral.
 20. Se deben colocar a tierra los vientos de la torre de comunicaciones, así como los cercos metálicos y toda estructura metálica solidamente a tierra.
 21. En el interior de la caseta de equipos, o cuarto de equipos, se deben colocar a tierra todos los elementos metálicos, asegurando la unión equipotencial con puentes equipotenciales si fuera necesario.
 22. Instalar los sistemas de protección tanto para la parte eléctrica como para los cables de comunicaciones, con los TVSS y filtros respectivamente, Cada transmisor debe tener un aislador, un filtro pasa bajos y pasa bandas, en cantidad necesaria para que un transmisor alcance la filtración apropiada, dependiendo del equipo y las frecuencias del transmisor y del lugar así como de los demás equipos de transmisión.
 23. Cuando se instalen transformadores para la parte de comunicaciones, su mejor ubicación es lo más cerca a los equipos mismos, tal como lo señala la norma IEEE 1100.
 24. Se debe medir la resistencia de puesta a tierra siguiendo la metodología sugerida por la IEEE80, donde señala que se debe colocar el electrodo más lejano a 6.5 veces del electrodo más largo en la malla de puesta a tierra y el electrodo más corto al 62.8% de la distancia más larga.
 25. La Caracterización de suelos en dos capas debe cumplir con la ecuación de Tagg y según las rutinas de comprobación y hojas de cálculos, de las ecuaciones analizadas, la que refleja un mejor resultado con un mínimo error es la de potencial: $f(x) = m \times x^a$

BIBLOGRAFÍA

Normas y documentos aplicados

- ✓ Norma Motorola R56: Standards and guidelines for communication Sites
- ✓ Código Nacional Eléctrico Peruano
- ✓ IEC 6 1024-1-1 Y 6 1024-1-2 (1990-03) Protection of structures against lightning.
- ✓ Tierras, Soporte de la Seguridad Eléctrica de Casas O, Favio.
- ✓ El Rayo, Mitos, leyendas, Ciencia y Tecnología” de Horacio Torres – Sánchez
- ✓ ANSI/IEEE 1100-1999: Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment.
- ✓ ANSI/IEEE 80 – 2000 Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- ✓ ANSI/IEEE Std 81 - 1983: Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance.
- ✓ IEC 61000-5-2 (1997-11) Electromagnetic compatibility part 5: Instalation and mitigation guidelines - section two: Earthing and cabling.
- ✓ NFPA 780 – 2000 Standard for lightning protection system
- ✓ API 2003 – 1998 Protection Against Ignitions Arising Out of Static, Lightning and Stray Currents.
- ✓ NEC 2002 National Electrical Code®
- ✓ IEC 62305 – 1: El método de manejo de riesgo
- ✓ IEC 62305 – 2: Los criterios para el diseño, la instalación y el mantenimiento de medidas de protección contra rayo
- ✓ IEC 62305 – 3: Medidas de protección para reducir los daños físicos y el peligro de los seres vivientes dentro de una estructura
- ✓ IEC 62305 – 4: Medidas de protección para reducir las fallas en los sistemas eléctricos y de electrónicos de una estructura
- ✓ IEC 62305 – 5: Medidas de protección para reducir los daños físicos y fallas en la prestación de servicios que incorporan una estructura (principalmente eléctricos y las líneas de telecomunicación)

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PROPUESTA DE DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN
CONTRA FALLAS DE ORIGEN ATMOSFÉRICO EN ESTACIONES
DE COMUNICACIONES**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

Jorge Alberto Noé Rondón

ASESOR: Oscar Melgarejo Ponte

Lima, diciembre del 2009

Índice

Anexo 1	4
SIPRA y su función que cumple.....	4
Anexo 2	5
ESQUEMA GENERAL DE SIPRA	5
Anexo 3	6
EL RAYO.....	6
Anexo 4	11
Aplicación del Método del Enmallado	11
Anexo 5	15
Diseños y consideraciones en general para Comunicaciones.....	15
Anexo 6	21
Resultados Teóricos y Reales, Aplicaciones.....	21
Diseño para Casetas en Mina.....	21
a) Cerro Cometa, Cerro de Pasco	23
b) Toquepala, Moquegua.....	27
c) Paraccsha, Cerro de Pasco.....	30
Anexo 7	34
Pararrayos PDC y Radioactivos.....	34
Anexo 8	42
Puestas a tierra de protección contra rayos	42
Anexo 9	59
Definiciones	59
Anexo 10	69
Mediciones	69
Medición de resistividad.....	69
Medición de resistencia de puesta a tierra.	70
Anexo 11	74
Normas y Estándares de aceptación internacional vigentes	74
Anexo 12	78
CONEXIONES.....	78
Anexo 13	80
Mediciones de Resistencia de Puesta a Tierra	80
Anexo 14	83
EXPLICACIÓN DE CADA TÉRMINO DE LA TABLA 12.B	83

Anexo 15	84
CONSTANTES DE MATERIALES PARA PUESTA A TIERRA	84
Anexo 16	85
SUSTENTACIÓN NUMÉRICA DE ESTRATIFICACIÓN	85
Anexo 17	89
EJEMPLOS DE SIMULACIONES Y COMPARACIONES	89



Anexo 1

SIPRA y su función que cumple

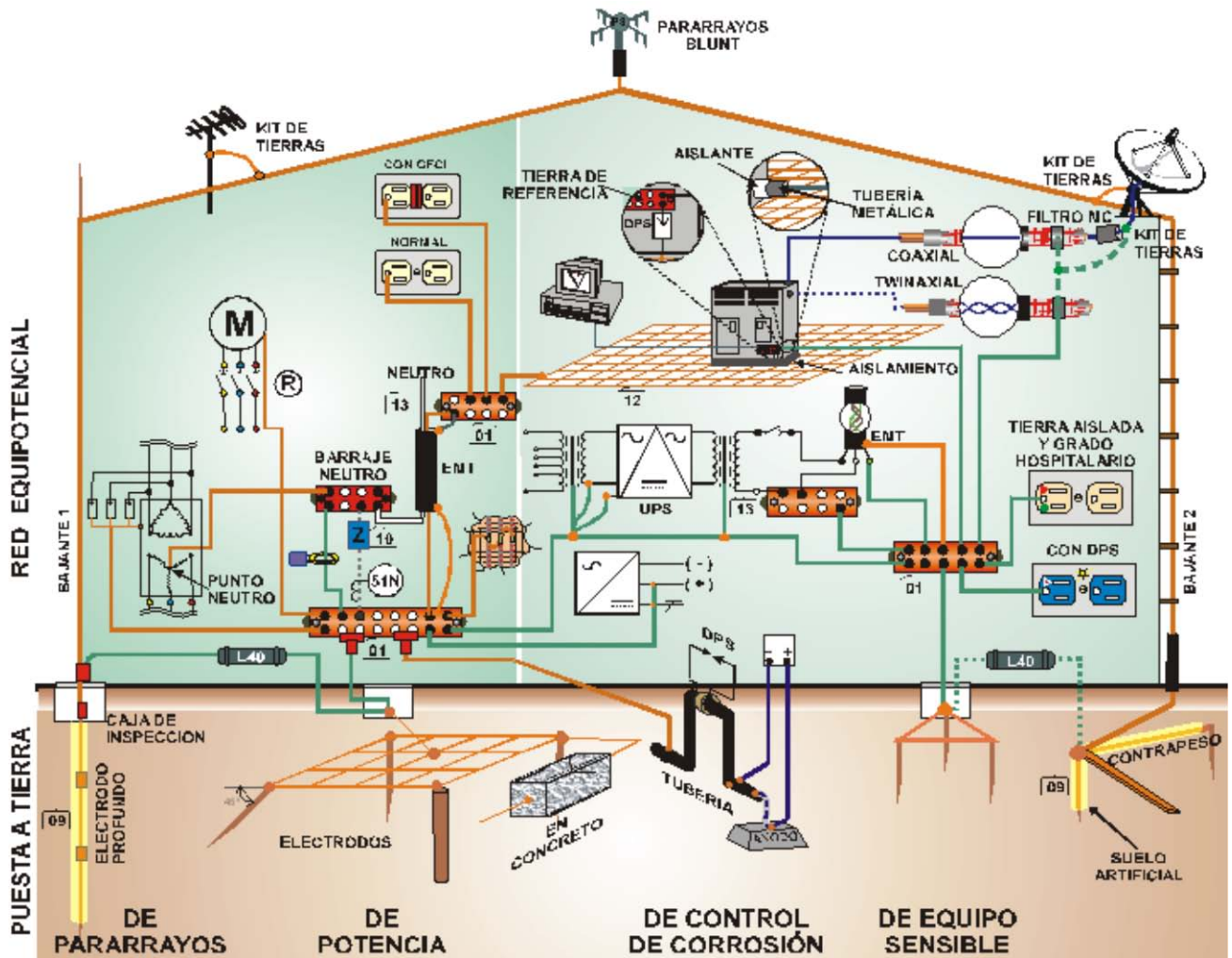
ÍTEM	COMPONENTE	FUNCIÓN QUE CUMPLE
1	Evaluación del Nivel de Riesgo	Determinar las medidas de protección
2	Sistema de Protección externo (SPE)	Canalizar el rayo hasta el suelo en forma segura
2.1	Terminales de captación	Interceptar el rayo
2.2	Barrajes	Conducir el rayo, reducir el di/dt, atenuar efectos internos del campo magnético
2.3	Puesta a tierra de protección contra rayos (PTPR)	Dispersar y disipar la corriente del rayo
3	Sistema de protección interno (SPI)	Limitar las sobretensiones transitorias al interior de la instalación
3.1	Equipotencialización con DPS	Limitar sobretensiones
	Protección primaria	Limitar sobretensiones en las partes energizadas del panel de distribución principal
	Protección secundaria	Limitar sobretensiones en los 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
4	Prevención de riesgos	
4.1	Guía de seguridad personal	Lograr comportamientos seguros de las personas
4.2	Sensor de tormentas	Suspender actividades de alto riesgo
	Fijos	Suspender actividades de alto riesgo
	Portátiles	

FUENTE: Tierras, Soporte de la Seguridad Eléctrica, Segunda Edición, Favio Casas Ospina, página: 47, sección 5.2, Tabla 5

Anexo 2

ESQUEMA GENERAL DE SIPRA

El presente esquema ha sido tomado de La información Técnica desarrollado por SEGURIDAD ELECTRICA LTDA de Colombia



FUENTE: Tierras, Soporte de la Seguridad Eléctrica, Segunda Edición, Favio Casas Ospina

Anexo 3

EL RAYO

El siguiente resumen ha sido tomado del libro: “El Rayo, Mitos, leyendas, Ciencia y Tecnología” de Horacio Torres – Sánchez (Resumen de todo el libro)

Las investigaciones sobre este fenómeno natural han analizado una gran variedad de aspectos, comenzaron las primeras nociones del tema en los años 600 a.C., con la piedra imán (Variedad de magnetita Fe_3O_4) desde un aspecto meramente filosófico, en el año 1269 Peter Peregrinus habla del magnetismo, en 1581 Robert Norman trata el magnetismo pero sin mucho detalle. En 1700 se publicó en Inglaterra la primera especulación sobre las descargas eléctricas atmosféricas, anterior a Franklin el inglés Stephen Gray descubrió en 1729 que la electricidad podría ser comunicada a grandes distancias, por medio de contacto, es decir descubrió la conductividad de los materiales y estableció las diferencias entre cuerpos conductores y no conductores.

Hacia finales del siglo XVIII, las mediciones precisas llegaron a ser un objetivo importante en los experimentos físicos. El concepto de fluido sutil fue un paso necesario en el proceso de cuantificación, la investigación sobre la electricidad se debatió a mediados del siglo XVIII, solamente con los trabajos de Franklin y de sus seguidores inmediatos surgió una teoría que podría explicar todos los fenómenos, en 1749 Franklin propone su experimento “Caja Centinela”, en la cual una persona estando en un banquillo aislado, sosteniendo una varilla de acero terminada en punta y extendida verticalmente varios metros, podía atraer un arco de una nube de tormenta que pasara por encima, principio de la hoy conocida Jaula de Faraday.

En mayo de 1752, el francés François D’Alibard realizó el experimento con éxito. Mientras tanto Franklin, un mes más tarde en Filadelfia, Estados Unidos, usó una cometa como conductor para atraer la electricidad con un cordel húmedo, colocándola dentro de una nube tormentosa.

*Es importante señalar una apreciación errónea de Franklin que aún hoy en día la tienen personas o ingenieros que trabajan en el campo de protección de estructuras contra rayos: Franklin originalmente pensó –erróneamente- que el pararrayos tácitamente descargaba la carga eléctrica presente en una nube de tormenta, y por tanto “**prevenía**” los rayos.*

Estructura tripolar de la nube

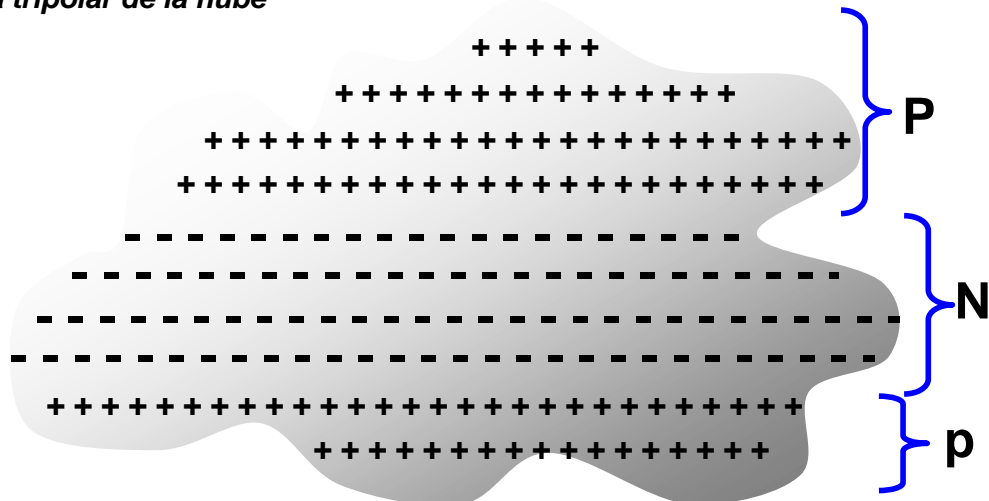


Figura 1
Nube de tormenta

Luego de más de cuatro décadas de trabajo se determino que la estructura básica de la nube no es “bipolar”, sino tripolar.

Hay una región de carga negativa “N” en el centro, con una región de carga positiva “P” encima de ella y una segunda región, menor, de carga positiva “p” debajo de aquella.

La característica más notable de la capa principal, cargada negativamente, es su forma de torta: su espesor vertical, aunque inferior a un kilómetro, puede extenderse horizontalmente varios kilómetros o más. Se halla a unos 6 kilómetros de altura, donde la temperatura se aproxima a -15°C . En las condiciones allí dominantes, las tres fases del agua – hielo, líquido y vapor – pueden coexistir. Los campos eléctricos más intensos de la nube de tormenta se encuentran en las fronteras superior e inferior de la capa principal de carga negativa.

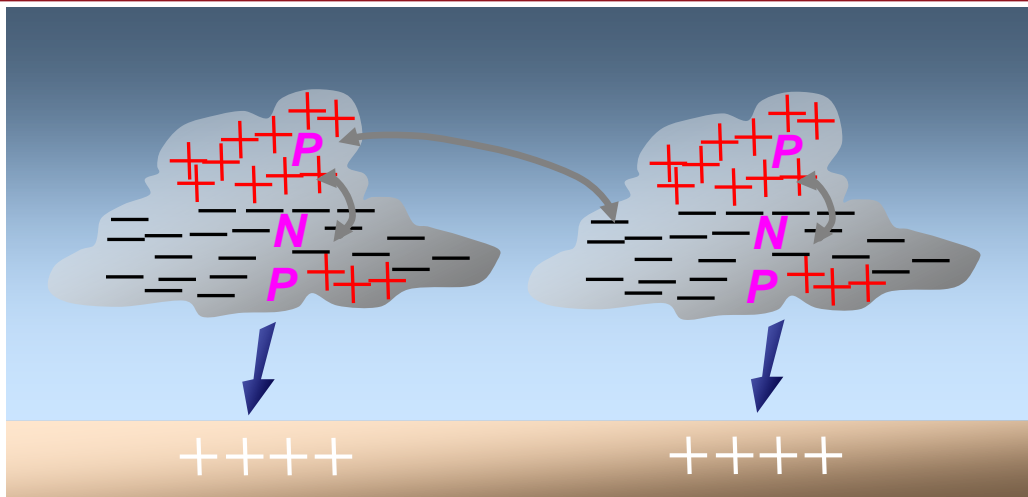


Figura 2
Nube de tormenta

Existen cuatro categorías de formación de rayos:

- Categoría 1 Rayos negativos Nube – tierra (más del 90% de las descargas)
- Categoría 2 Rayos negativos tierra – nube
- Categoría 3 Rayos positivos Nube – tierra
- Categoría 4 Rayos positivos tierra – nube

Una descarga atmosférica se compone en general de 5 etapas:

1. Encendido de la descarga (Preliminary breakdown)
2. Líder escalonado (Stepped leader)
3. Proceso de enlace (Attachment process)
4. Descarga de retorno (Return stroke)
5. Líder dardo (Dart leader)

Circuito eléctrico Global

La moderna investigación sobre la física del rayo a principios del siglo XX se basó en los trabajos del físico inglés C.T.R. Wilson, quien fue el primero en sugerir que los rayos eran generadores de tensión, que mantenían una diferencia de potencial entre la superficie de la tierra y la ionosfera.

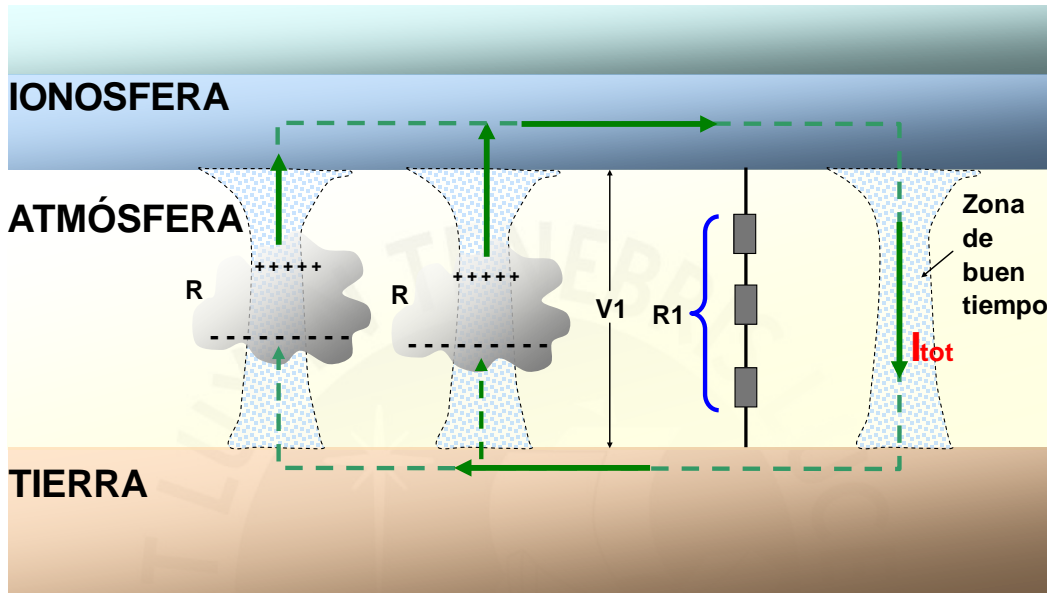


Figura 3
Circuito eléctrico global

Wilson, con base en mediciones hechas entre 1917 y 1920, formuló su hipótesis, la cual plantea que las descargas eléctricas atmosféricas representan los generadores, en lo que denominó "Circuito eléctrico global"

Atmósfera: Buen aislador eléctrico de buena calidad

Ionósfera y Tierra: Buenos conductores

Número de generadores

Aunque el número de rayos "n" que se presentan simultáneamente sobre la tierra es incierto, algunos investigadores como Brooke (1925), Whipple (1929) y Krumm (1962) estimaron un valor entre 1,500 y 1,800.

La Resistencia global se ha estimado en promedio en 230Ω y con una Corriente global de: $I_{tot} = nxi = [800 - 1,800] A$

Tendríamos un potencial global

$$V = RI = [184 - 414] kV.$$

Típicamente más de **2,000 tormentas** están activas alrededor del globo terráqueo en un momento dado, produciendo aproximadamente **100 descargas por segundo**.

Finalmente, El doctor Horacio Torres analiza los parámetros del Rayo, un resumen de este análisis se muestra a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 1
Parámetros del Rayo

Tipo de Parámetro	Parámetro	Siglas	Descripción
a) De incidencia	Densidad de descarga a tierra	DDT	Ground Flash Density, GFD: N° de rayos por Km2 al año
	Nivel ceráuneo	NC	Keraunic Level, TD: N° de días tormentosos al año, donde un día tormentoso es aquel en el que por lo menos se escucha un trueno.
	Polaridad del Rayo	PC	Flash Polarity: Positivo ó negativo
	Multiplicidad	M	Multiple Stroke Flashes: N° de descargas individuales por descarga
	Duración de la descarga eléctrica atmosférica		
Duración del intervalo entre descargas individuales			
b) De amplitud de la corriente del Rayo		CR	Lightning Peak Current Amplitude: Es el parámetro más importante para aplicaciones de ingeniería
c) De la forma del impulso de la corriente del rayo			Stoke Current Impulse: En los cuales se tienen en cuenta las características dependientes del tiempo, con énfasis en las características de la rata de ascenso de corriente del rayo (RAI)

FUENTE: Resumen trabajado del libro El Rayo, Mitos, leyendas, Ciencia y Tecnología” de Horacio Torres – Sánchez, páginas: 117-118.

Anexo 4

Aplicación del Método del Enmallado

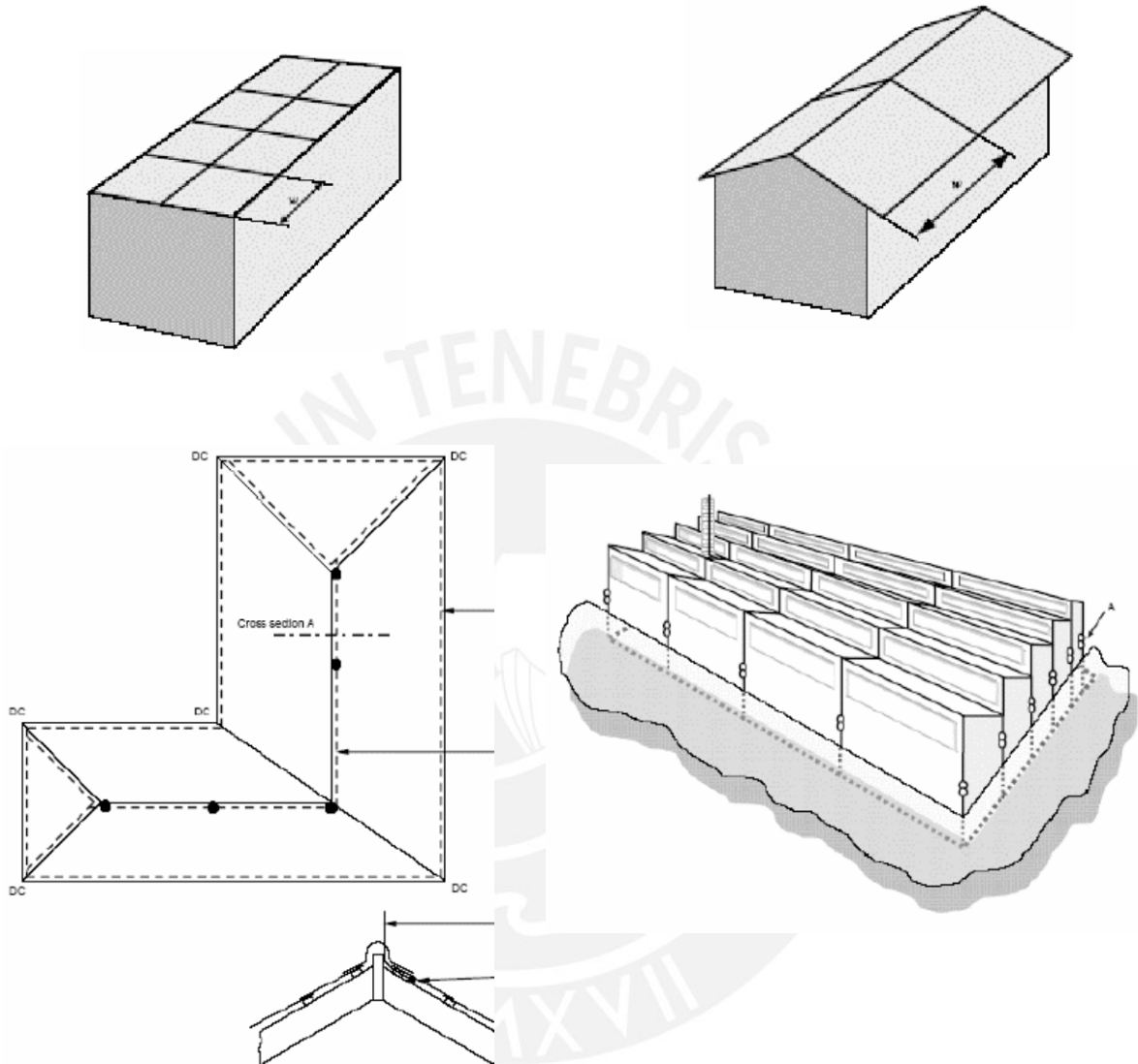


Figura 4
Ejemplo de Diseño de terminales aéreas para un SIPRA no aislado

FUENTE: IEC 62305-3, Figura F.20, Páginas:119-121

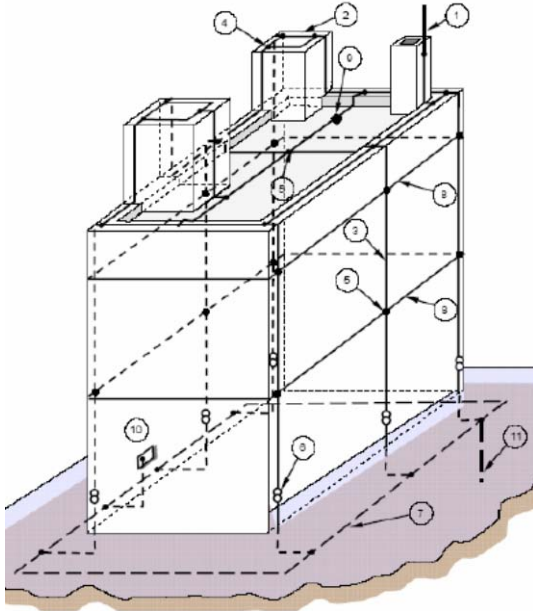


Figura 5
Posicionamiento de un SIPRA externo sobre una estructura hecha de material aislante (Madera o ladrillo) con altura hasta 60 m, techo plano y con accesorios en techo

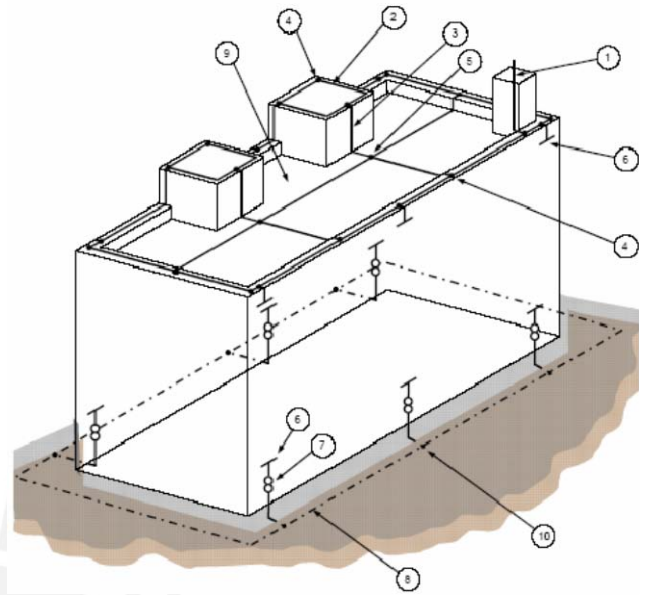


Figura 6
Construcción de un SIPRA externo sobre estructura de concreto reforzada con acero usando el refuerzo de paredes externas como componentes naturales

FUENTE: IEC 62305-3, Figura F.22 y 25, Página 123 y 126

- 1 Varilla de Terminal aérea
- 2 Conductor horizontal Terminal aérea
- 3 Bajante
- 4 Unión tipo T
- 5 Unión tipo cruce
- 6 Unión de prueba
- 7 Arreglo de Puesta a Tierra
- 8 Conductor de anillo equipotencial
- 9 Techo
- 10 Terminal para conexión de barra de equipotencialización
- 11 Arreglo de Puesta a Tierra

- 1 Varilla de Terminal aérea
- 2 Conductor horizontal Terminal aérea
- 3 Bajante
- 4 Unión tipo T
- 5 Unión tipo cruce
- 6 Conexión a la varilla de acero de refuerzo
- 7 Punto de prueba
- 8 Arreglo de Puesta a Tierra
- 9 Techo
- 10 Unión tipo T resistente a la corrosión.

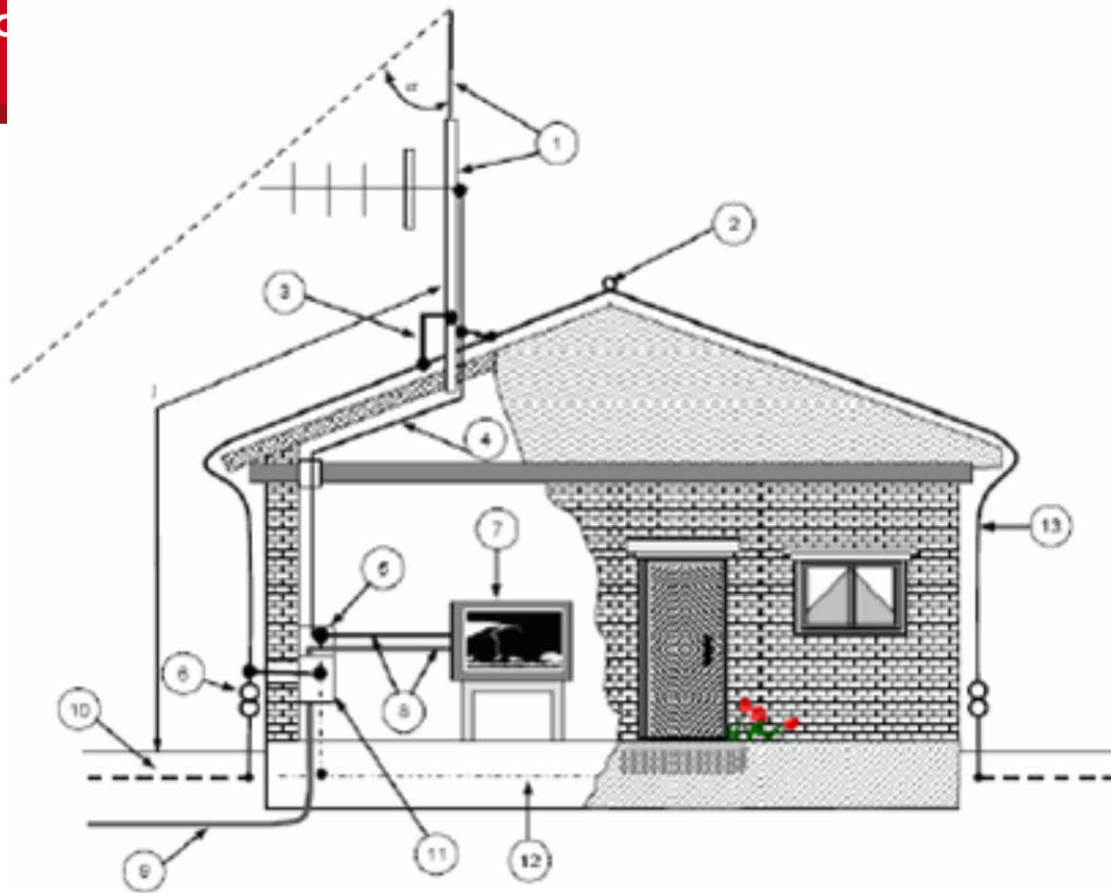


Figura 7
Ejemplo de construcción de un SIPRA de una casa con antena de TV usando mástil como varilla de Terminal aérea

- 1 Mástil metálico
- 2 Conductor horizontal Terminal aérea sobre el lomo del techo
- 3 Unión entre las bajantes y el mástil metálico de la antena
- 4 Cable de antena
- 5 Barraje de puesta a tierra
- 6 Punto de prueba
- 7 Televisor (TV)
- 8 Ruta paralela del cable y cable de energía eléctrica
- 9 Cable de energía eléctrica
- 10 Sistema de puesta a tierra
- 11 Caja principal de distribución de energía con DPS
- 12 Electrodo de fundación
- 13 Conductor del SIPRA
- L Longitud distancia de separación
- α Angulo de protección

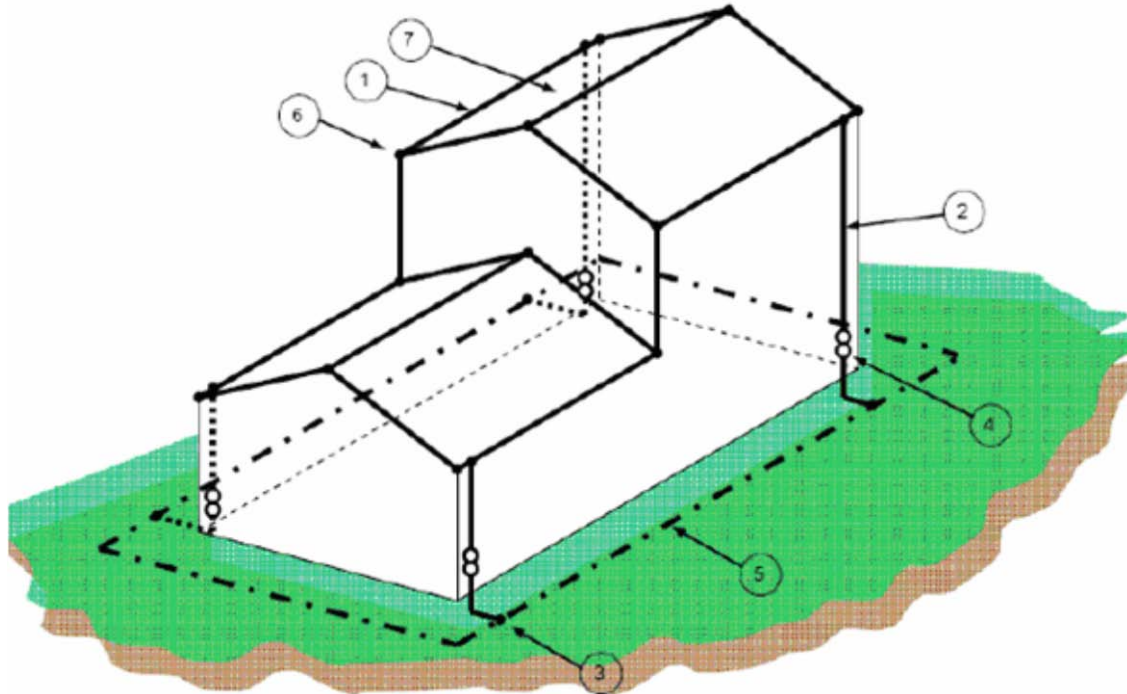


Figura 8
Ejemplo de construcción de un SIPRA de estructuras con material aislante con diferentes niveles de techo

- 1 Conductor horizontal
- 2 Bajante
- 3 Unión tipo T resistente a la corrosión
- 4 Punto de prueba
- 5 Sistema de puesta a tierra
- 6 Unión tipo T sobre el lomo del techo
- 7 Tamaño de la malla

FUENTE: IEC 62305-3, Figura F.30 y 34, Página 131 y 135

Anexo 5

Diseños y consideraciones en general para Comunicaciones

En un sistema en general en comunicaciones en presencia de rayos, la Norma Motorola nos muestra los siguientes esquemas y fotos para el diseño y consideraciones de referencia.

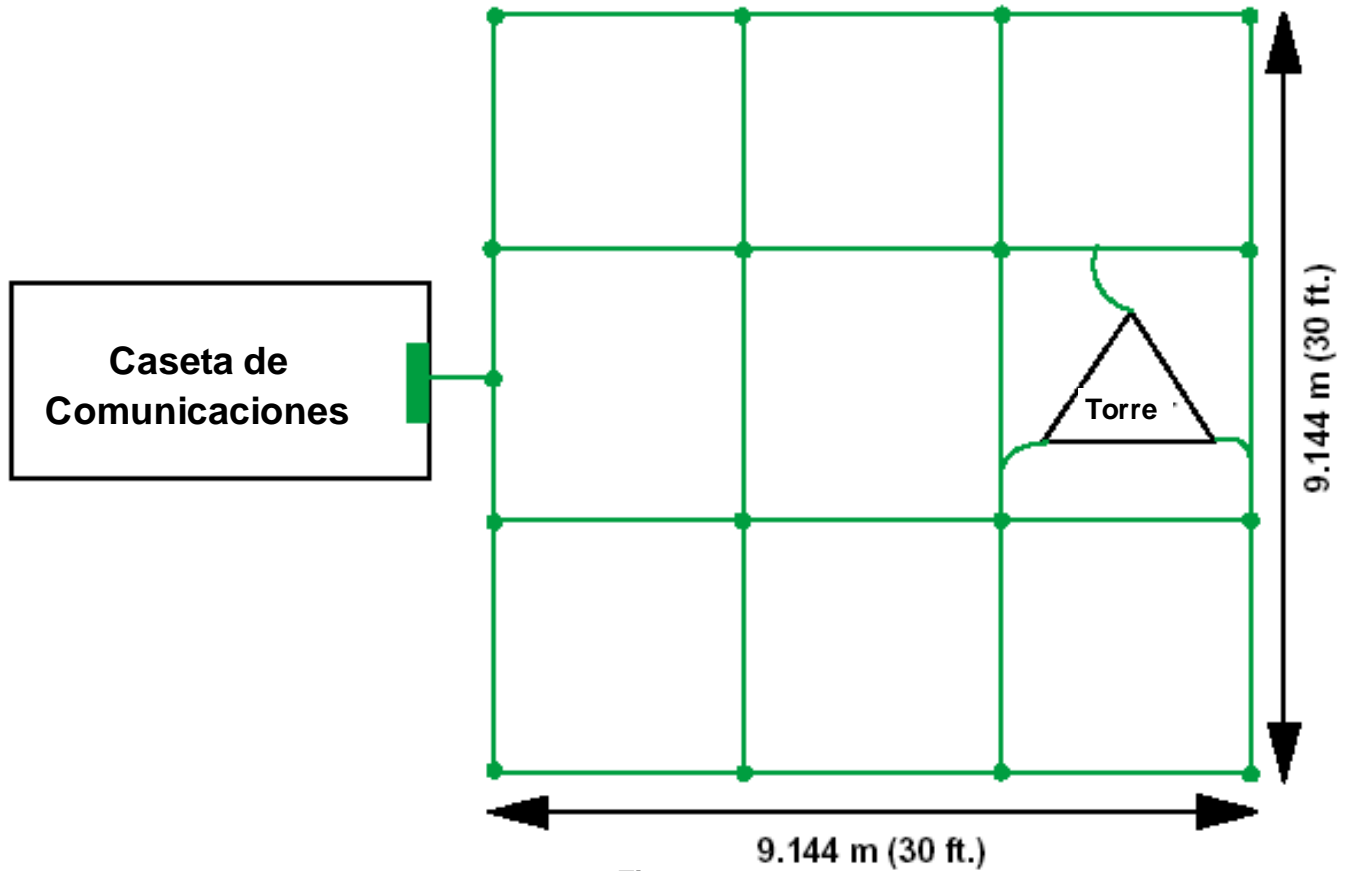


Figura 9
Malla de Puesta a Tierra ejemplo

FUENTE: Norma Motorola R56

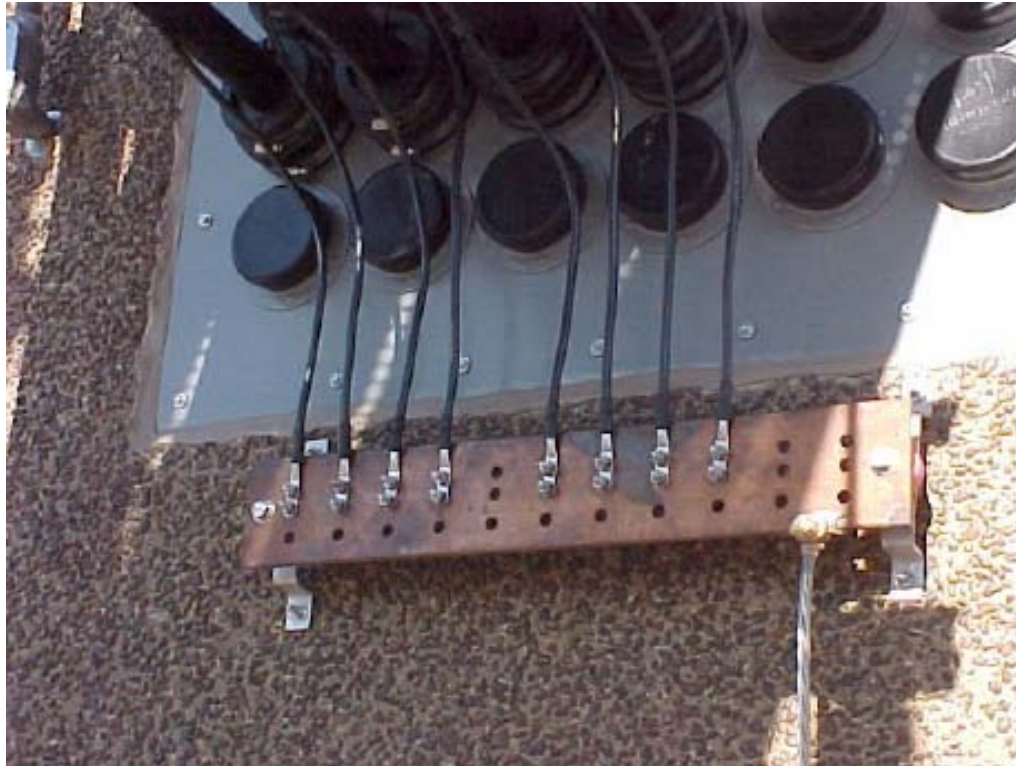


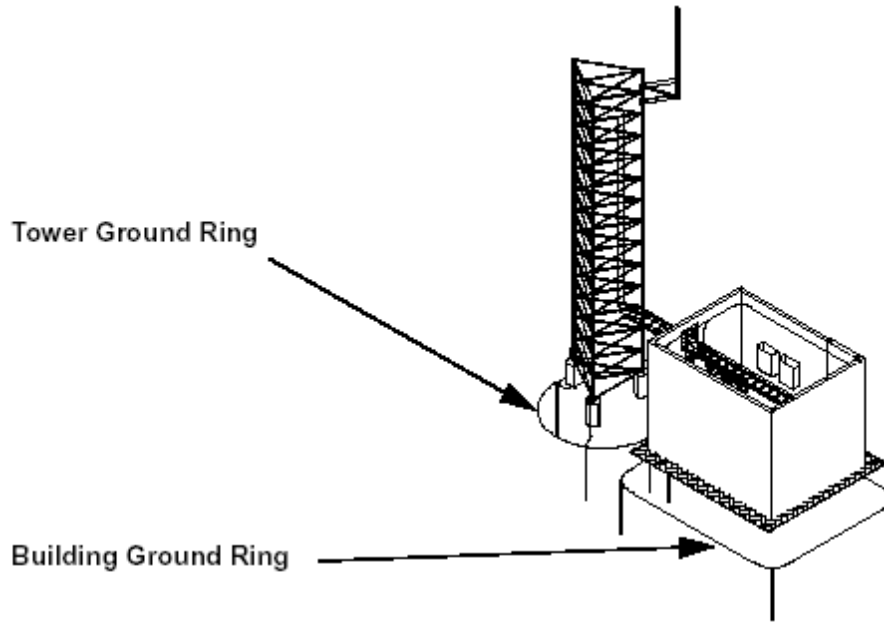
Figura 10
Barraje exterior

FUENTE: Norma Motorola R56



Figura 11
Barraje exterior

FUENTE: Norma Motorola R56



Anillo de Tierra de la
Torre

Figura 12

Mallas alrededor de la caseta y torre de comunicaciones

FUENTE: Norma Motorola R56

Anillo de Tierra del
cuarto de
comunicaciones

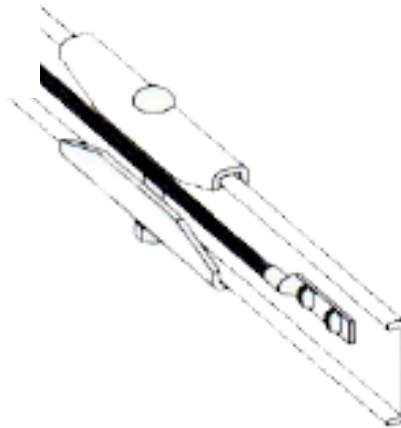


Figura 13

Típica unión equipotencial

FUENTE: Norma Motorola R56

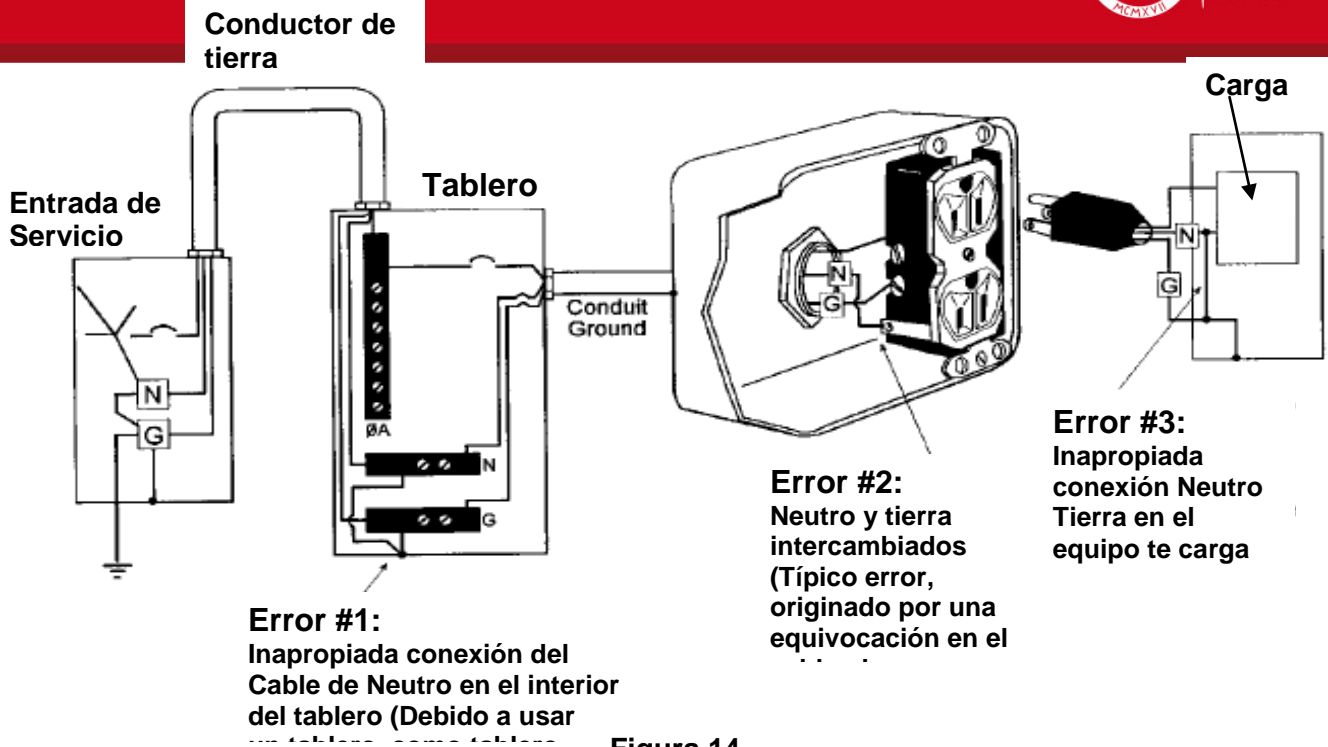
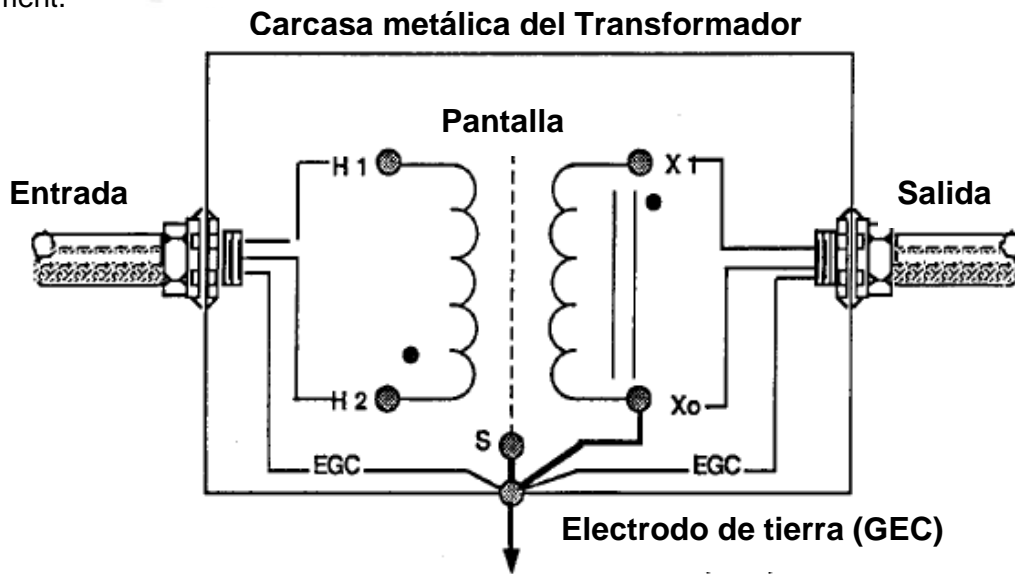


Figura 14
Típicos errores de conexiones

FUENTE: IEEE 1100 Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment.



Se requiere en el sistema AC, electrodo de tierra y señal de referencia local (SRS) al punto de instalación o del transformador

Figura 15
Típico Transformador de aislamiento blindado

FUENTE: IEEE 1100 Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment.

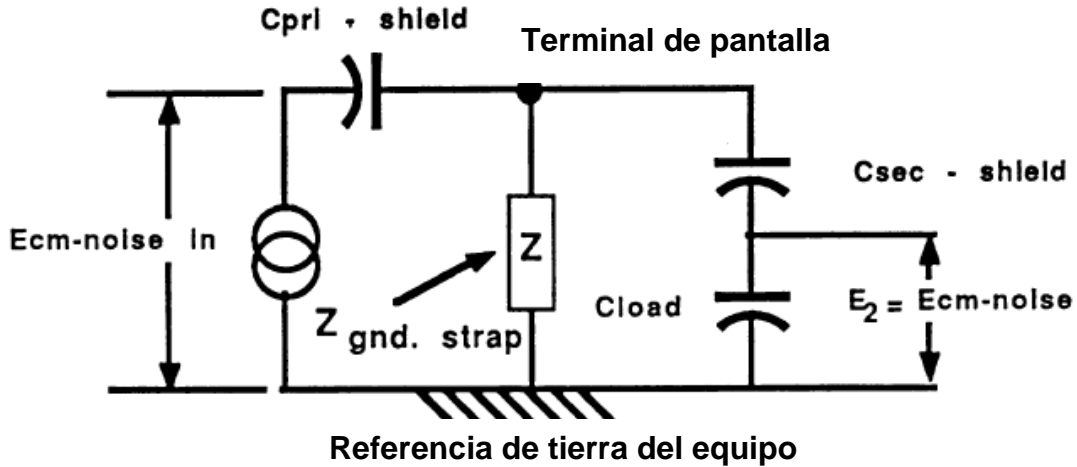


Figura 16

Electrostatic shield in transformer that forms a capacitive voltage divider within the isolation transformer for CM noise currents

Si se adicionan pantallas a los devanados primario y secundario, no conectadas a tierra, pero si a las líneas activas se mejora la atenuación de ruido.

Análisis de los cables variando la frecuencia

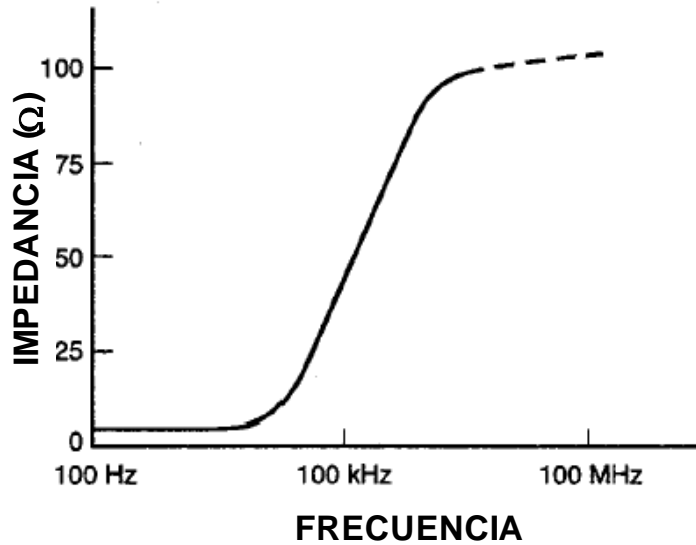


Figura 17

Típica distribución AC de la Impedancia Vs. La Frecuencia (Ninguna conexión de la carga)

FUENTE: IEEE 1100 Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment.

A continuación se muestran las tablas de algunos ejemplos de utilización de cables variando la frecuencia

(a) #4 AWG building wire (25 mm²)

Tabla 2

Length in ft (m)	L (μH) (>1 MHz)	@ 1 MHz		@ 10 MHz		@ 100 MHz	
		Rf (Ω)	$\omega L = Z$ (Ω)	Rf (Ω)	$\omega L = Z$ (Ω)	Rf (Ω)	$\omega L = Z$ (kΩ)
10 (3)	4	0.05	26	0.15	260	0.5	2.6
20 (6.1)	9	0.1	57	0.3	570	1.0	5.7
40 (12.2)	20	0.2	125	0.6	1250	2.0	12.5
60 (18.3)	31	0.3	197	0.9	1970	3.0	19.7
100 (30.5)	55	0.5	350	1.5	3500	5.0	35.0

FUENTE: IEEE 1100 Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment.

(b) #4/0 AWG building wire (107 mm²)

Tabla 3

Length in ft (m)	L (μH) (>1 MHz)	@ 1 MHz		@ 10 MHz		@ 100 MHz	
		Rf (Ω)	$\omega L = Z$ (Ω)	Rf (Ω)	$\omega L = Z$ (Ω)	Rf (Ω)	$\omega L = Z$ (kΩ)
10 (3)	3.6	0.022	23	0.07	230	0.22	2.30
20 (6.1)	8	0.044	51	0.14	510	0.44	5.10
40 (12.2)	18	0.088	113	0.28	1130	0.88	11.3
60 (18.3)	28	0.132	176	0.42	1760	1.32	17.6
100 (30.5)	50	0.220	314	0.70	3140	2.20	31.4

FUENTE: IEEE 1100 Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment.

Anexo 6

Resultados Teóricos y Reales, Aplicaciones

En el presente capítulo, se mostrarán los principales resultados de las aplicaciones tanto teóricas como reales, de trabajos realizados en los diferentes campos de aplicación.

Diseño para Casetas en Mina

La Minería en nuestro país, siempre requiere de la implementación de sistemas de comunicaciones como tema prioritario en su desarrollo, en todos los asentamientos mineros, ya sea a tajo abierto o no, la comunicación es prioritaria, así como sistemas que envían datos hacia lugares específicos son importantes y más aún, si esta de por medio mucho dinero involucrado.

Si algún instrumento no comunica la información requerida a la central, la explotación en esa zona no se podrá realizar perdiendo varios miles o millones de dólares, pero lo que es más importante que el dinero, es la vida humana, pues la implementación de sistemas de protección contra rayos inadecuados podrían traer consecuencias graves en el personal que labora. En tal sentido, la aplicación en la minería de protección contra rayos es vital.

La Norma Motorola muestra un esquema de aplicación muy cercana a nuestra realidad, dando un ejemplo que se asemeja al implementado en Minería:

35 mm² csa (#2 AWG) or larger conductor for runs of 23 m (75 ft.) or less

67.43 mm² csa (#2/0 AWG) or larger conductor for runs longer than 23 m (75 ft.)

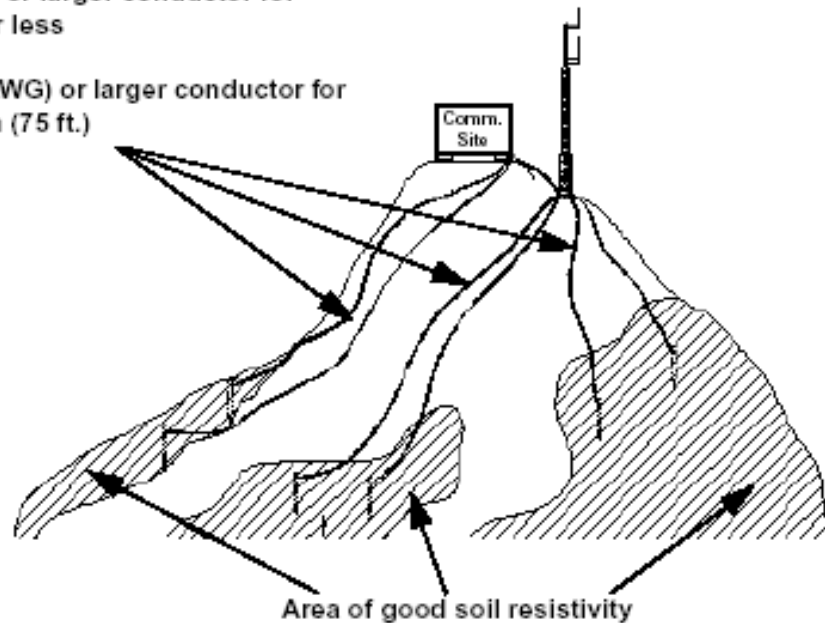


Figura 18
Puesta a Tierra en un cerro según Motorola R56

FUENTE: Norma Motorola R56

Este primer esquema, sugerido por la norma Motorola R56 trae consigo la idea clara de la implementación de “**contrapesos**”¹, para tener puestas a tierra adecuadas, al respecto existen muchos trabajos que demuestran su eficacia frente a las tradicionales varillas (ver Anexo 3), tema que no se tratará, pero lo dicho se basa estrictamente a la experiencia en campo de su implementación, corroborando las teorías demostradas por los investigadores.

Nota:

[1]: **Contrapeso**, Zanja de longitud determinada, con una profundidad entre 0.5 a 0.85 m y un ancho de entre 25 a 50 cm

a) Cerro Cometa, Cerro de Pasco

En este lugar a más de 4,000 m.s.n.m. se encuentra un cerro que domina la zona, la gente del lugar le llama Cerro Cometa, en el cual una compañía minera tiene una de sus siete antenas de comunicaciones, en ella se implementó el sistema de protección contra rayos integral, el cual constó de:

➤ **Puesta a Tierra**

Se implementó un diseño acorde a las condiciones geográficas, la resistividad del suelo y los espacios disponibles, utilizando contrapesos:

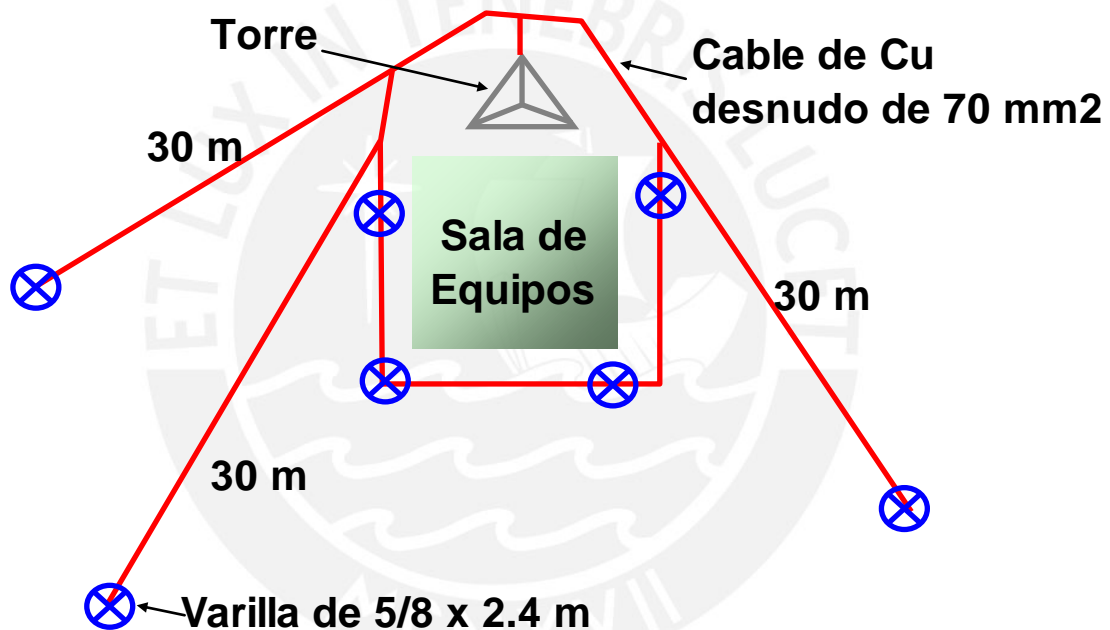


Figura 19
Diseño implementado en Cerro Cometa

➤ **Pararrayos**

Contaba con la instalación de un pararrayos Franklin Charp tetrapuntal.

➤ **Equipotencialización externa**

Se colocaron barrajes de tierras y todas las partes metálicas se colocaron a tierra:



Figura 20
Aplicación de Barrajes de tierras



Figura 21
Equipotencialización de estructuras metálicas

➤ **Protección interior**

Se instalaron dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias DPS en las 3 líneas telefónicas que llegan a Cerro cometa, este modulo pico protector es el PM230 que tiene un voltaje de operación (VSO)⁹ de 180V y voltaje de ruptura DC de 230 V +/- 15%.

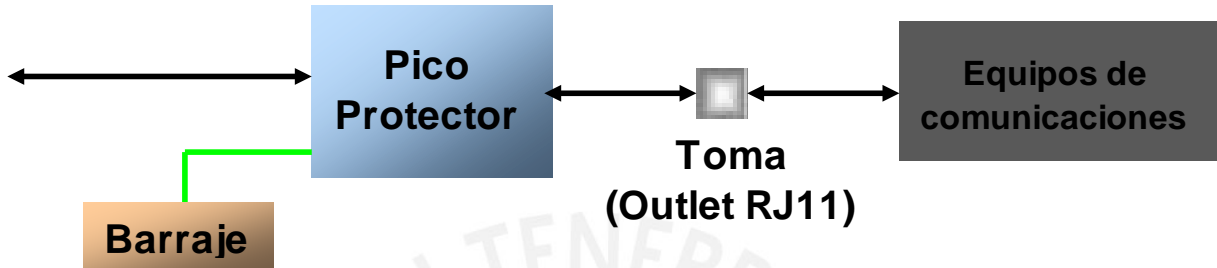


Figura 22
Esquema de instalación del DPS

Este sistema tiene dos componentes:

- a) Un módulo del protector de sobre tensión
- b) Un kit de tierra.

Cada módulo contiene dos fusibles de 350mA reemplazables y componentes de estado sólido, además de cuatro puntos de acceso para prueba de línea.

El kit de tierra consiste en una ranura que une el dispositivo con una línea de tierra a lo largo del modulo, la misma que será conectada hacia la barra equipotencial de puesta a tierra.

De igual manera se realizó la protección interna de los cables coaxiales de comunicación. Se utilizo para este cometido el dispositivo **IS-B50LN-C1**, el cual se inserto a la altura del BE (barraje equipotencial o barraje de tierras), dentro del cuarto de equipos.

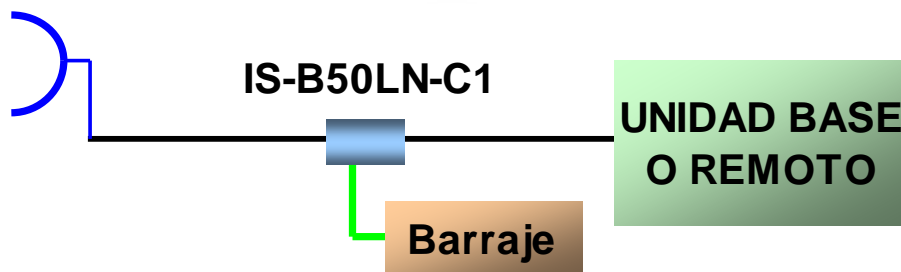


Figura 23

Nota:

[9]: **VSO**: Voltaje de Operación, rango de voltaje al cual un módulo dado, se activará para desviar la sobre energía a tierra

El rango de frecuencia de operación es 50MHz a 700MHz de acuerdo a las especificaciones dadas por la empresa de comunicaciones que instaló los equipos.

En lo referente a la protección de energía de los equipos de comunicación, se instaló un supresor de transitorios de voltaje 1-800-647-TVSS como se indica en el esquema.

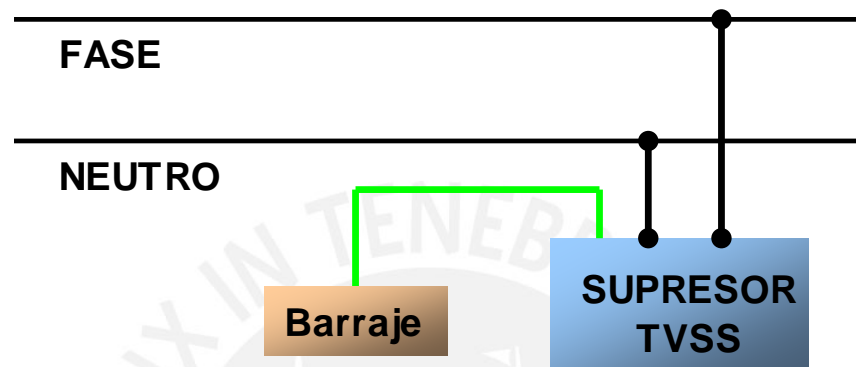


Figura 24
Esquema de instalación del TVSS

b) Toquepala, Moquegua

Un lugar similar al anterior, donde el terreno es muy seco y de clima hostil. En este caso se planteo solo como Proyecto, su implementación aún no ha sido realizada.

➤ **Puesta a Tierra**

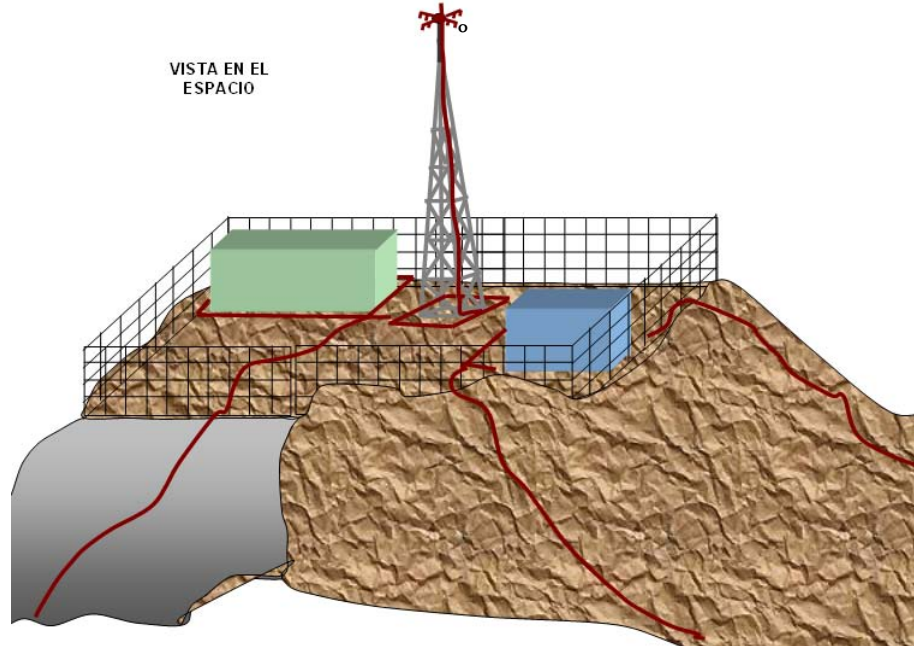


Figura 25
Diseño del Sistema de Puesta a Tierra

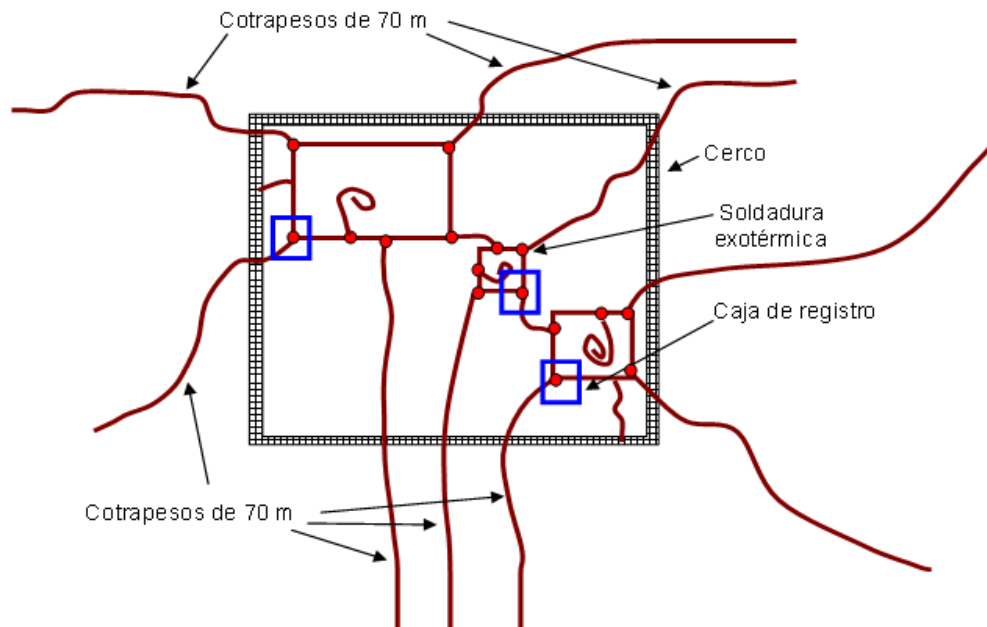


Figura 26
Diseño en vista de planta del Sistema de Puesta a Tierra

➤ **Pararrayos**

El Terminal de captación de la estación se encuentra ubicado en la torre de telecomunicaciones; es un pararrayos tipo Franklin Sharp, el cual cumple con el requerimiento normativo.



Figura 27
Pararrayo Franklin Sharp

Según la norma NTC 4552, cualquier elemento metálico, que se encuentre expuesto al impacto del rayo, como antenas, chimeneas, torres de comunicación y tuberías que sobresalga debe ser tratada como una punta de captación, por lo tanto debe considerarse como bajante también por ello se debe adherir la bajante a la estructura.

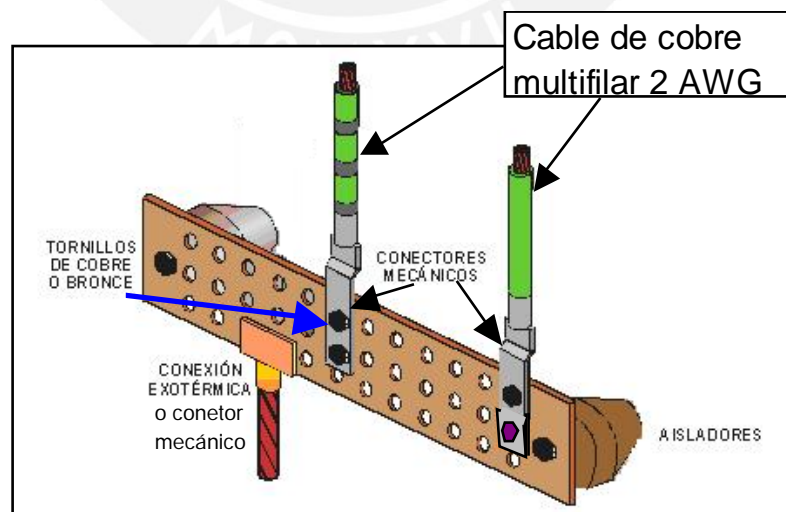


Figura 28
Uso de Barrajes equipotenciales de Tierra

➤ **Protección interior**

La equipotencialización de líneas activas se efectúa por medio de dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias (DPS), con el fin de disminuir a niveles aceptables las sobretensiones transitorias conducidas que se pueden presentar al interior de una instalación.

La selección de los DPS, parte del principio que los equipos de baja tensión, son capaces de tolerar sin daño, tensiones al impulso dadas en la Tabla 1 de la IEC 60664-1. (Tabla 4 de este anexo)

Tabla 4

TENSIÓN AL IMPULSO QUE DEBEN SOPORTAR LOS EQUIPOS				
Nivel de tensión [V]	BIL requerido en [kV]			
	Contadores.	Tableros, interruptores, cables, etc.	Electrodomésticos, herramientas portátiles	Equipo electrónico
	IV	III	II	I
120-240 ; 120/208	4	2,5	1,5	0,8
254/440 ; 277/480	6	4	2,5	1,5
1000	8	6	4	2,5

c) Paraccsha, Cerro de Pasco

En el centro de cerro de la ciudad de Pasco en el tajo abierto de una empresa minera se encuentra una caseta que mide diferencias de distancias de todos los puntos en el tajo, esta información es capturada, medida y enviada a una estación base muy cerca del lugar, al existir en esta caseta equipos de muy alto costo se implementó un sistema de protección contra rayos externo, quedando pendiente la protección interior por parte de la empresa minera.

➤ Puesta a Tierra

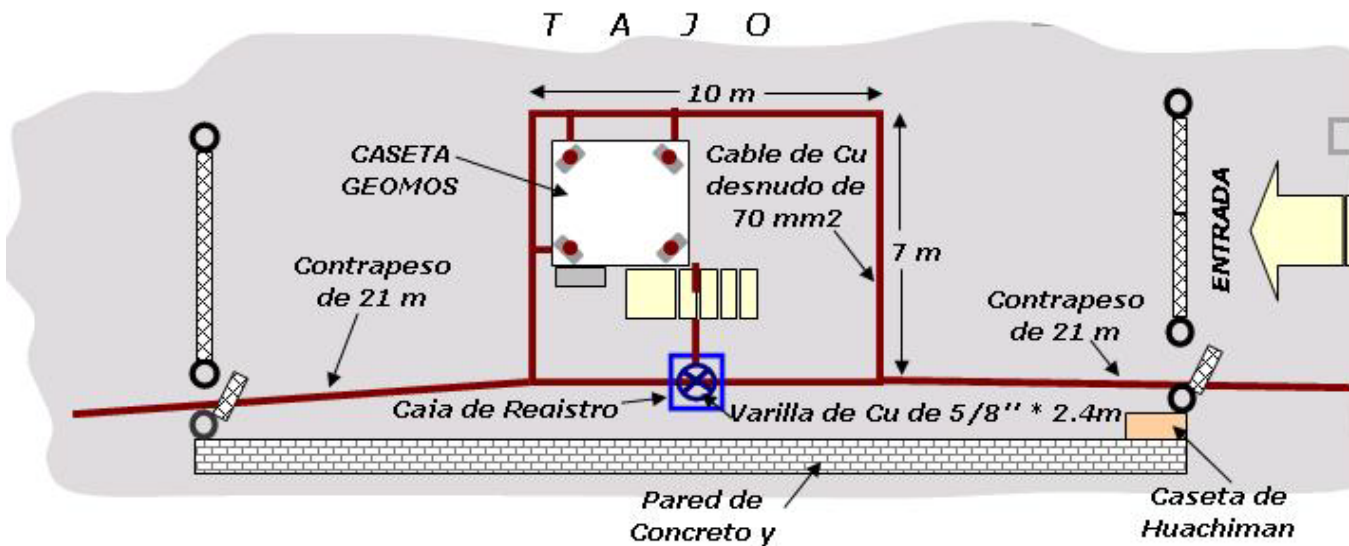


Figura 29
Diseño de Puesta a Tierra

Se realizó un análisis, según lo especifica las normas pertinentes y resultado de ello se concluyó que debido a la ubicación geográfica **NO SE DEBE COLOCAR PARARRAYO EN TORRE.**

Por lo cual se adoptó un sistema de protección tipo apantallamiento, que consistía en colocar cuatro puntas captadoras (Varillas de cobre de 5/8" x 0.6 m. de largo), cuatro bajantes colocadas a la misma estructura, pues al ser toda la estructura metálica, según las normas antes citadas se utiliza a la misma estructura como bajante.

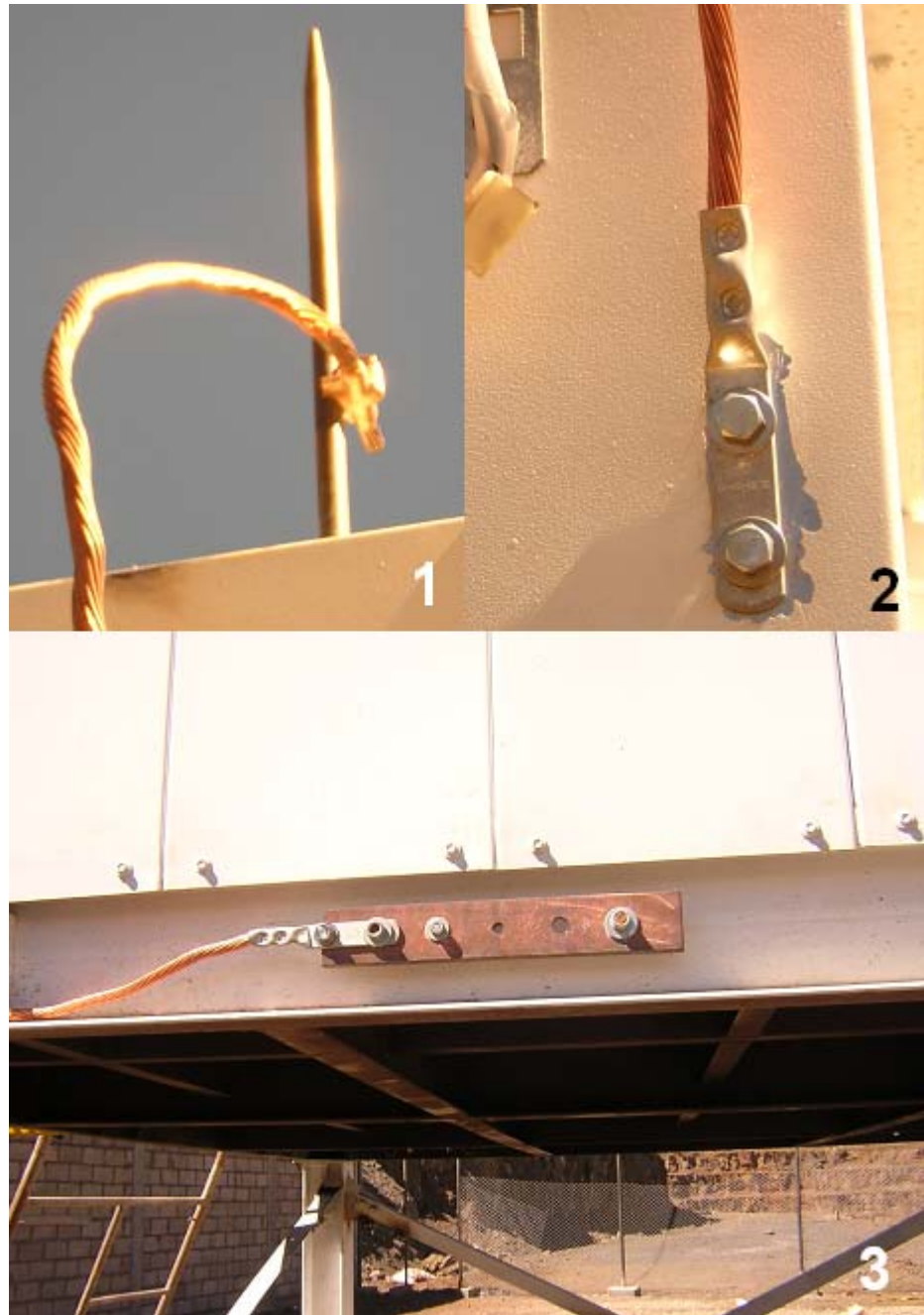


Figura 30
Apantallamiento

- 1: Punta captadora con bajante
- 2: Detalle de bajante con conector doble ojo a estructura
- 3: Detalle de barraje equipotencial externo



Figura 31
Puesta a Tierra

1 y 2: Detalle de Contrapesos

3: Varilla con cable soldado en caja de registro



Figura 32
Implementación del apantallamiento

En el libro Tierras de Favio Casas Ospina, extraemos el siguiente gráfico que ilustra la protección en un sistema de comunicaciones típico.

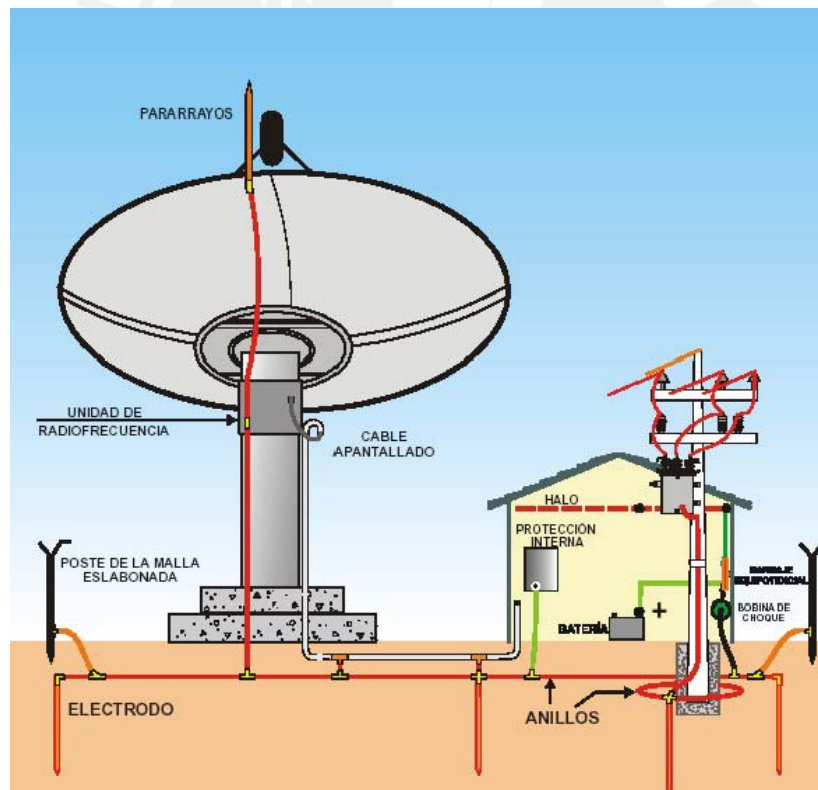


Figura 33
Sistema de comunicaciones Típico y su Protección contra rayos

Fuente: Libro Tierras, Favio Casas Ospina, Bogotá Colombia

Anexo 7

Pararrayos PDC y Radioactivos

Pararrayos PDC

Los **PDC** sin Standard alguno que los sustente, han sido estudiados por académicos y científicos alrededor del mundo, los cuales concluyen que no tienen ninguna base científica, por lo que no cumplen en proporcionar la protección contra rayos que dicen hacer. Estos estudios han sido discutidos y aceptados por todas las entidades nacionales e internacionales que participan del estándar de protección contra rayos para estructuras.

Los fabricantes de estos sistemas no han podido proporcionar ningún estudio independiente que pueda probar que sus productos han sido probados en campo, a pesar de que se han estado realizando estudios de carácter científico en laboratorios y en el campo, alrededor del mundo por casi tres décadas.

A pesar de esta deficiencia, los millares de estos sistemas se han vendido por todo el mundo, aseguran una protección contra rayos, apoyada por los propios fabricantes en una "investigación". En muchos países en especial en Malasia, donde se ha realizado esta investigación, se han instalado varios millares de estos desde los años 70, con grandes sumas de dinero

El uso de los pararrayos poco convencionales ha conducido a muchos edificios a grandes daños por impactos directos de Rayos. En la mayoría de casos existen amenazas para no divulgar estos problemas, por ser públicas, ejemplo el edificio de una escuela.

La estandarización de los PDC en Malasia, es en parte debido a la ayuda dada a ellos por SIRIM y UTM. En el último caso, enseñan a los estudiantes, que los sistemas convencionales son anticuados mientras que, al mismo tiempo, el sistema no estándar se enseña como "adelanto" en la metodología de la protección contra rayos.

PARARRAYOS RADIATIVOS: A DESMONTARLOS!

Por: Favio Casas Ospina* y Héctor Graffe Cantillo**

INTRODUCCIÓN.

Amigo lector, quizás cuando termine de leer este artículo suba a la terraza de su edificio o mire desde la calle para verificar que pararrayos le instalaron en su lugar de vivienda, de trabajo o el hotel en el que se hospeda. Algún ingeniero de pronto recuerde que compró e instaló un dispositivo que en su momento tenía la mejor imagen y ahora debe llamar a su cliente para informarle que debe retirarlo. Llamado especial hacemos a los jefes de salud ocupacional, para que consideren este factor de riesgo y actúen en consecuencia. Sea cual fuere su caso, con este artículo pretendemos ilustrarlo sobre algunos aspectos de un tema, que no puede pasar desapercibido en un mundo volcado hacia la ecología.

Un pararrayos radiactivo o ionizante, está basado en la utilización de una fuente radiactiva para ionizar el espacio su alrededor y así volverlo un punto atractivo al impacto de un rayo. Las radiaciones ionizantes constituyen un factor de riesgo clasificado como físico al que pueden exponerse las personas por causas naturales o tecnológicas. Todas las fuentes utilizadas para uso en medicina, en la industria, en la investigación o para enseñanza, tienen la particularidad de su larga vida útil, de tal manera que si el pararrayos va a durar 430 años, muy seguramente el edificio donde se instaló va a ser demolido antes que eso ocurra y puede terminar la fuente radiactiva entre los escombros (Véase Foto 1).



Foto 1 Pararrayos radiactivo entre escombros

ASPECTO HISTÓRICO

El efecto de las radiaciones ionizantes sobre los seres vivos, no es un hallazgo reciente, viene con el descubrimiento de los rayos X en 1895 y la radiactividad en 1896, cuando comenzaron a notarse lesiones tumorales. Debido a los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes, es importante evaluar los riesgos potenciales que están presentes cuando se poseen fuentes emisoras de este tipo de radiación, los cuales dependen de las características del radionúclido, del tipo de radiación que emita y de la forma como se utilice. Los residuos radiactivos se clasifican en tres tipos según su período de semidesintegración: menor a seis días, entre 6 y 71 días y más de 71 días. Los de los pararrayos van desde 10 hasta 5700 años.

En España, en Junio de 1986, las autoridades prohibieron la instalación de nuevos pararrayos que incorporaran elementos radiactivos. Para los que se habían instalado hasta ese momento la legislación ofrecía dos posibilidades: Su legalización como instalación radiactiva conforme a los requisitos establecidos en las normas para ese tipo de instalaciones, o bien su retirada por parte de la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, sin costo para sus propietarios. En 1992 se inició el desmonte masivo de estos elementos, habiéndose retirado hasta el momento más de 21.500 pararrayos.

Las fuentes de Am-241 son extraídas en España y posteriormente enviadas a Inglaterra para su reciclaje, según los acuerdos establecidos con la empresa que originalmente fabricó la mayoría de esas fuentes.

En la norma oficial mexicana, NOM-022-STOS-1999, Electricidad Estática en los Centros de Trabajo – Condiciones de Seguridad e Higiene, en su ítem 8.1, se prohíbe la utilización de pararrayos que funcionen a base de materiales radiactivos.

ASPECTO BIOLÓGICO

Las radiaciones electromagnéticas interactúan con la materia de diferente forma. Cuando el material irradiado está constituido de tejidos biológicos, los efectos producidos son distintos para cada rango de frecuencia. En una interacción, la radiación cede parte de su energía a una molécula y esta energía puede ser suficiente para arrancar un electrón, que se denomina ionización. Las radiaciones electromagnéticas han sido clasificadas como ionizantes y no ionizantes, estas últimas porque no poseen energía suficiente para producir ionización. No hay duda entonces que las radiaciones ionizantes afectan negativamente a los seres humanos, cuando

se exponen sin protección. Los efectos físicos causados por el paso de las partículas o fotones durante su corto período de contacto con la materia orgánica (10^{-13} s) son los mismos en esencia, que los ocurridos con la materia inerte, pero las consecuencias suelen ser diferentes, porque en el proceso de ionización los átomos cambian la estructura de las moléculas donde se encuentran dichos átomos.

Las consecuencias a nivel de un órgano o tejido pueden no ser aparentes, pero la acumulación de una serie de deficiencias celulares hace que aparezcan anomalías morfológicas o funcionales y crear una condición patológica que permita hablar de un efecto evidente en la salud. Las sustancias radiactivas pueden penetrar en los organismos vivos mediante ingesta, inhalación o a través de la piel. En este último órgano se tienen casi dos metros cuadrados, lo que significa una vía muy amplia de exposición al material radiactivo.

ASPECTO TÉCNICO

Como ya se dijo, los pararrayos radiactivos o ionizantes, buscan formar una atmósfera ionizada alrededor del mismo con un isótopo, por ello, conviene recordar los tres conceptos básicos:

Isótopo, es un átomo que teniendo el mismo número de protones que el elemento padre, tiene diferente número de neutrones; *Ionización*, es el proceso mediante el cual uno o más electrones son liberados de átomos, moléculas o cualquier estado en que se encuentren dando lugar a dos porciones cargadas eléctricamente y *radiación ionizante*, es la emisión de fotones o partículas con o sin carga, con suficiente energía como para producir ionización mediante procesos primarios o secundarios.

Los pararrayos radiactivos incorporaban isótopos como el Americio (Am-241) con un período de semidesintegración de 433 años, el más utilizado. Otros se basaron en el Radio (Ra-226), con período de semidesintegración de 1600 años; el Estroncio (Sr-90), con período de 28,1 años; el Carbono (C-14) con período de 5739 años y el kriptón (Kr-85) con período de 10,8 años.

ASPECTO LEGAL

En Colombia, se tienen normas legales con respecto a los materiales radiactivos, pero la más importante es la Ley 599 de 2000, o Código Penal, que dice textualmente:

“.....Artículo 362. *Perturbación de instalación nuclear o radiactiva.* El que por cualquier medio ponga en peligro el normal funcionamiento de instalación nuclear o radiactiva, incurrirá en prisión de tres (3) a ocho (8) años y multa de cien (100) a veinte mil (20.000) salarios mínimos legales mensuales vigentes.

Artículo 363. *Tráfico, transporte y posesión de materiales radiactivos o sustancias nucleares.* El que sin permiso de autoridad competente fabrique, transporte, posea, almacene, distribuya, reciba, venda, suministre o trafique materiales radiactivos o sustancias nucleares, utilice sus desechos o haga uso de isótopos radiactivos, incurrirá en prisión de dos (2) a seis (6) años y multa de veinte (20) a cien (100) salarios mínimos legales mensuales vigentes.

La pena será de tres (3) a ocho (8) años y multa de cincuenta (50) a doscientos (200) salarios mínimos legales mensuales vigentes, cuando como consecuencia de alguna de las conductas anteriores se produzca liberación de energía nuclear o elementos radiactivos que pongan en peligro la vida o salud de las personas o sus bienes.”

El Gobierno ha facultado al Ministerio de Minas y Energía para dictar las normas y reglamentos para la gestión segura de materiales nucleares y radiactivos en el país y velar por el cumplimiento de las disposiciones legales y reglamentarias en materia de protección radiológica y seguridad nuclear. Además en un corto tiempo, entrará en vigencia una nueva prohibición sobre la instalación de pararrayos radiactivos; nos referimos al “Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE” que dice textualmente:



“CAPÍTULO VIII, Artículo 44º. RESIDUOS NUCLEARES Y DESECHOS TÓXICOS

En consideración a que el artículo 81 de la Constitución Nacional, prohíbe la introducción al territorio nacional de residuos nucleares y de desechos tóxicos, el Reglamento Técnico avala expresamente estas prohibiciones.....

..... A partir de la entrada en vigencia del presente Reglamento Técnico, queda prohibida la instalación, fabricación e importación de pararrayos o terminales de captación con material radiactivo.

CAPITULO IX, Artículo 45º. DISPOSICIONES TRANSITORIAS.

..... Se concede el plazo de un año para quienes teniendo instalados pararrayos o terminales de captación radiactivos, carezcan de autorización como instalación radiactiva por parte del Ministerio

de Minas y Energía o la entidad que éste delegue, para tramitarla con el lleno de los requisitos respectivos. Quienes no tramiten la autorización, en el mismo plazo de un año, deben contratar la gestión para que sean dipuestos como desechos radiactivos.”

Habida cuenta del período de semidesintegración tan largo, el desmonte debe dejarse en manos expertas que realicen la gestión de residuo radiactivo, cuyo objetivo debe ser implementar un sistema de control, gestión evacuación y disposición final que garantice la seguridad de las personas y del medio ambiente. La gestión y disposición como desecho del pararrayos radiactivo existente, debe considerar los siguientes lineamientos, pero cada una de las etapas de la gestión debe respetar las normas de Seguridad Radiológica.:

- Caracterización de la fuente.
- Inspección y/o evaluación radiológica del lugar y de las fuentes.
- Desmonte del pararrayos.
- Construcción de blindajes adicionales requeridos.
- Adecuación de la fuente para el transporte.
- Transporte.
- Tratamiento y almacenamiento definitivo como residuo radiactivo.

REGISTRO FOTOGRÁFICO

Para mayor ilustración de los lectores, las siguientes fotografías muestran algunos de los pararrayos radiactivos que fueron montados en Colombia los cuales deben ser retirados.



Foto 2 El más utilizado en Colombia.



Foto 3 El más antiguo.



Foto 4 Sin aspas.



Foto 5 De Carbono 14.

Referencias.

- [1] Waste, Magazine On Line, actualidad ambiental y científica. 2001
- [2] Real Decreto 1428 – 1986, de 13 de Junio, por el que se dictan normas sobre homologación de pararrayos. España.
- [3] Real Decreto 903-1987, que modifica el Real Decreto 1428-1986 sobre Pararrayos Radiactivos. España
- [4] Norma Oficial Mexicana NOM-022-STPS-1999, electricidad estática en los centros de trabajo - condiciones de seguridad e higiene.
- [5] Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas para Colombia – RETIE
- [6] Fotos cortesía de la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos

*FAVIO CASAS OSPINA. Ingeniero electricista de la Universidad Nacional de Colombia, gerente de SEGELECTRICA LTDA, licenciado en Salud Ocupacional del Ministerio de Salud, con estudios de maestría en Sistemas de Distribución, experto en control de calidad de Icontec, investigador del proyecto de Adquisición y Análisis de Señales financiado por Colciencias, presidente del Comité de Protección contra Rayos de ICONTEC y miembro de la IEEE, asesor del Ministerio de Minas y Energía para la elaboración del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas para Colombia. Conferencista y ponente de diversos trabajos en seminarios y congresos nacionales e internacionales. Correo electrónico: favigel@col1.telecom.com.co

**HÉCTOR EDUARDO GRAFFE CANTILLO. Ingeniero electricista de la Universidad Nacional de Colombia, con conocimientos específicos en el área de alta tensión y aislamiento eléctrico, sistemas de protección contra sobretensiones en media y baja tensión, sistemas de puesta a tierra y protección contra rayos. Miembro de la IEEE, miembro del grupo de trabajo para la elaboración del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas para Colombia. Correo electrónico: graffe_h@hotmail.com

Anexo 8

Puestas a tierra de protección contra rayos

PUESTAS A TIERRA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

Por: *Alan Duque Henao y **Favio Casas Ospina

INTRODUCCIÓN.

Frecuentemente percibimos fenómenos relacionados con estados transitorios de un sistema, un ejemplo típico es el que se presenta al golpear transversalmente una cuerda tensa entre dos soportes fijos, lo que produce una propagación de oscilaciones por la cuerda en uno y otro sentido. Cada golpe genera un estado transitorio con relación a la condición de reposo que se tenía. La dirección de propagación de cada pulso es perpendicular a la dirección del movimiento de las partículas de la cuerda.

En forma similar se presenta en un sistema eléctrico, cuando pasa de un estado a otro se genera, por razón del cambio, un transitorio que se manifiesta como una sobretensión o una sobrecorriente, que se propaga a través de las redes eléctricas y puede llegar a ocasionar daños. Los transitorios electromagnéticos más comunes son aquellos que tienen origen en las maniobras, en las fallas y sobre todo en los rayos.

El fenómeno físico involucrado en los transitorios en sistemas de potencia, obedece a la interacción entre la energía magnética almacenada en las inductancias y la energía eléctrica almacenada en los condensadores; en su mayoría son de naturaleza oscilatoria. Para el análisis de los transitorios en sistemas de potencia es importante seleccionar el modelo mediante el cual el sistema físico quede representado. Una forma simple consiste en un modelo de parámetros concentrados, es decir, la resistencia es tomada como un elemento ideal, al igual que la inductancia y la capacitancia. Otro modelo es el

de parámetros distribuidos, cuyo ejemplo clásico es la línea de transmisión. La selección de un sistema u otro depende del sistema físico y del fenómeno transitorio a ser estudiado.

DESARROLLOS MATEMÁTICOS

Para una línea de transmisión sin pérdidas con parámetros ideales distribuidos se aplican las siguientes ecuaciones en un elemento diferencial:

$$\frac{\partial v(y,t)}{\partial y} = L \frac{\partial i(y,t)}{\partial t} \quad [1]$$

$$\frac{\partial i(y,t)}{\partial y} = C \frac{\partial v(y,t)}{\partial t} \quad [2]$$

En este caso se asume que la resistencia serie y la conductancia paralelo son cero y L y C son constantes. Para relacionar las ecuaciones anteriores se deriva la primera respecto de "y" y la segunda respecto de "t", con lo cual se obtiene:

$$\frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial y^2} = L \frac{\partial^2 i(y,t)}{\partial y \partial t} \quad [3]$$

$$\frac{\partial^2 i(y,t)}{\partial t \partial y} = C \frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial t^2} \quad [4]$$

Se asume que la función $i(y,t)$ es doblemente diferenciable y que por lo tanto el orden del diferencial puede ser invertido. De las ecuaciones [3] y [4] se obtiene:

$$\frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial y^2} = LC \frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial^2 t} \quad [5]$$

Para L en H/m y C en F/m, entonces LC estará en $H.F/m^2 = s^2/m^2$. De la función $v(y,t)$ se tiene que LC es el inverso del cuadrado de la velocidad, es decir:

$$LC = \frac{1}{c^2} \quad [6]$$

En donde c es la velocidad en metros por segundo. Reemplazando [6] en [5] se obtiene la ecuación de onda:

$$\frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial y^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial^2 t} \quad [7]$$

Asumiendo que la ecuación [7] tiene como solución $v(y,t)$, entonces en las ecuaciones [1] ó [2] se obtiene la solución para $i(y,t)$. Las soluciones particulares no son de interés aquí, por lo que la solución general se presenta como:

$$v(y,t) = v_1 f_1(y + ct) + v_2 f_2(y - ct) \quad [8]$$

En donde v_1 y v_2 son constantes y $c = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. El hecho de que [8] es solución de

[7] se verifica por sustitución directamente en ambos lados de la ecuación.

Reemplazando en el lado izquierdo de la ecuación [7] se tiene:

$$\frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial y^2} = v_1 f_1''(y+ct) + v_2 f_2''(y-ct) \quad [9]$$

y en el lado derecho:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial t^2} = \frac{v_1}{c^2} c^2 f_1''(y+ct) + \frac{v_2}{c^2} c^2 f_2''(y-ct)$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial t^2} = v_1 f_1''(y+ct) + v_2 f_2''(y-ct)$$

Ambos resultados son idénticos para las funciones f_1 y f_2 . La solución para la corriente se obtiene de [2]:

$$v_1 f_1'(y+ct) + v_2 f_2'(y-ct) = L \frac{\partial i(y,t)}{\partial t} \quad [10]$$

Ambos lados de la ecuación son integrables respecto del tiempo, por lo tanto:

$$i(y,t) = i_1 f_1(y+ct) + i_2 f_2(y-ct) \quad [11]$$

En donde:

$$i_1 = \frac{v_1}{cL} \quad \text{y} \quad i_2 = -\frac{v_2}{cL}; \quad \text{entonces:}$$

$$cL = \frac{1}{\sqrt{LC}} L = \sqrt{\frac{L}{C}} = Z_0 \quad [12]$$

La variable Z_0 tiene dimensiones de impedancia (ohmios). Esta es la impedancia característica, también llamada impedancia al impulso, impedancia de choque o impedancia de onda.

Por lo tanto, la solución general a las ecuaciones [1] y [2] es:

$$v(y,t) = v_1 f_1''(y + ct) + v_2 f_2''(y - ct) \quad [13]$$

$$i(y,t) = \frac{v_1}{Z_0} f_1''(y + ct) + \frac{v_2}{Z_0} f_2''(y - ct) \quad [14]$$

La solución general está dada en términos de dos constantes, v_1 y v_2 y dos funciones arbitrarias f_1 y f_2 . Para un problema específico, v_1 , v_2 , f_1 , y f_2 serán determinados de las condiciones iniciales y de frontera. La solución general (ecuaciones [13] y [14]) representan una onda viajera a lo largo de una línea de transmisión.

La velocidad de propagación (c) de las corrientes y tensiones a lo largo de la línea depende de la geometría de la línea y de las propiedades electromagnéticas del espacio circundante, que a su vez determinan la inductancia y la capacitancia.

En un circuito formado por dos hilos conductores de radio " r " y separados una distancia " d ", se tiene una buena aproximación para la inductancia cuando $d \gg r$, cuya expresión matemática es:

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \ln\left(\frac{d}{r}\right) \quad [\text{H/m}] \quad [15]$$

Con la misma consideración, la capacitancia puede ser expresada como:

$$C = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{d}{r}\right)} \quad [\text{F/m}] \quad [16]$$

Aplicando la ecuación [6], para hallar la velocidad de propagación, se tiene:

$$c = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \quad [\text{m/s}] \quad [17]$$

La cual es la velocidad de propagación de una onda en el espacio vacío, igual a la velocidad de la luz. En muchos casos prácticos el medio no es el espacio vacío y la velocidad de propagación se reduce. Otro aspecto importante es la independencia de la impedancia al impulso $Z(t=0)$ de la frecuencia de la señal; como la impedancia al impulso de una línea de transmisión esta dada por la siguiente ecuación:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{r + j\omega L}{g + j\omega C}} \quad [\Omega] \quad [18]$$

Donde " ω " es la frecuencia angular de la señal aplicada.

En el caso de puestas a tierra del tipo contrapeso, es decir, cables enterrados horizontalmente, en un tiempo en el cual una onda de corriente entra a un sistema equivalente a una línea de transmisión, ve una resistencia de dispersión muy alta, porque la conductividad del suelo es muy baja, por lo tanto la impedancia al impulso viene dada por:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad [19]$$

A medida que penetra la onda en el suelo el efecto neto de varias resistencias en paralelo es como si la conductividad del material aumentara, por lo tanto, la impedancia de la onda debe disminuir partiendo del valor dado por la impedancia al impulso.

El modelo de una línea de transmisión sin pérdidas no refleja la realidad, porque factores como la resistencia, la proximidad con la tierra y el efecto corona, cambian el comportamiento de las ondas en su viaje a través de la línea, produciendo distorsión y variaciones en la forma de onda de un impulso o de la onda conforme ésta avanza. La resistencia produce atenuación debida a las pérdidas por efecto Joule, la proximidad con la tierra produce disminución de la velocidad de propagación y por ende cambio en la forma de onda por la diferencia de los tiempos de llegada de los frentes de onda y cuando el gradiente del campo eléctrico supera el umbral de corona se produce atenuación y distorsión de la onda de tensión.

El comportamiento de una puesta a tierra ante un transitorio, depende de su geometría y del tiempo de duración del transitorio; puede ser estudiada por parámetros concentrados o distribuidos. Las señales físicas que más inciden en las puestas a tierra son las corrientes provenientes de fallas en el sistema de potencia (frecuencia industrial) y las corrientes tipo impulso con origen en los rayos. En muchos aspectos el rayo puede ser considerado como una fuente de corriente ideal. Típicamente la forma de onda que exhibe el rayo es un frente negativo con promedio de 5,69 μ s y duración total de 12,8 ms según el CIGRE. Cuando el rayo se enlaza con una estructura o una línea de transmisión se produce un impulso de corriente que causa una sobretensión, que depende de las características de la estructura o línea.

Una corriente de impulso que es inyectada a un electrodo de puesta a tierra, percibe oposición a su circulación debido a las características físicas del electrodo y electromagnéticas del medio. El terreno circundante alrededor del electrodo, por ser un material con conductividad finita, permite que se manifieste la constante dieléctrica. La resistividad del terreno establece una corriente de conducción y la permitividad asociada al cambio de tensión, una de desplazamiento. Además, la corriente que fluye por el electrodo, establece un campo magnético, cuya intensidad es alta en su vecindad. La inductancia de la corriente por tierra es una contribución directa de la corriente fluyendo en el electrodo. Los caminos de corriente citados, que algunos autores llaman longitudinal y transversal, constituyen el circuito equivalente y las ecuaciones 20, 21 y 22 que planteó Rùdenberg.

COMPORTAMIENTO DE ELECTRODOS VERTICALES ANTE CORRIENTES DE IMPULSO

Para un electrodo vertical de longitud " l " y radio " r ", los valores de resistencia, inductancia y capacitancia están dados por:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r} \quad [\Omega] \quad [20]$$

$$C = \frac{\epsilon_r l}{2 \ln \left(\frac{2l}{r} \right)} \frac{10^{-9}}{9} \quad [F] \quad [21]$$

$$L = 2l \mu_r \ln \left(\frac{2l}{r} \right) 10^{-7} \quad [H] \quad [22]$$

Donde, ρ es la resistividad, ϵ_r es la permitividad relativa (variable entre 4 y 40, desde suelo seco a suelo muy húmedo) y μ_r es la permeabilidad magnética del suelo.

Las constantes de tiempo debidas a la capacitancia e inductancia están dadas por:

$$\tau_c = CR = \frac{\rho \varepsilon_r}{4\pi} \frac{10^{-9}}{9} \quad [23]$$

$$\tau_L = \frac{L}{R} = 4\pi l^2 \frac{\mu_r}{\rho} 10^{-7} \quad [24]$$

Evaluando las constantes anteriores para un electrodo de 2,4 m, con una resistividad de 100 $\Omega \cdot m$, una permitividad de 9 y permeabilidad de 1, se obtienen los siguientes valores:

$$\tau_c = 7,95 \times 10^{-9} \text{ s y } \tau_L = 7,23 \times 10^{-8} \text{ s.}$$

Tiempos que son muy cortos comparados con los del frente de una onda de impulso tipo rayo, por lo que la misma podrá llegar a su valor máximo sin una demora significativa y por tanto el electrodo no brinda atenuación. La impedancia característica de este tipo de electrodo está dada por:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = 60 \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \ln\left(\frac{2l}{r}\right) \quad [\Omega] \quad [25]$$

COMPORTAMIENTO DE CONTRAPESOS ANTE CORRIENTES DE IMPULSO

Los actuales conocimientos han establecido como buena práctica de ingeniería la instalación de los electrodos horizontales o contrapesos, comúnmente cables o cintas metálicas, como configuración para las puestas a tierra de protección contra rayos.

El sistema de puesta a tierra denominado *Contrapesos* (por su nombre en inglés counterpoise), también llamado dispersores, de compensación, de contraantena o radiales, consiste en enterrar conductores solos o con un electrodo en su extremo, donde la profundidad de enterramiento (del orden de

50 cm) no afecta mucho. El concepto de “contrapeso” se aplicó antiguamente, como un conductor enterrado a lo largo de las líneas de transmisión, por ser un buen acoplador de capacitancias. Adicionalmente es de mayor riesgo, en caso de falla, estar sobre un electrodo tipo varilla, que sobre un contrapeso.

El comportamiento de los contrapesos (electrodos horizontales) ante impulso, al igual que el de los verticales, es gobernado por la impedancia característica de este tipo de electrodos.

En los contrapesos, la constante de tiempo inductiva crece considerablemente, ya que ésta es directamente proporcional al cuadrado de la longitud y se puede hacer comparable con el tiempo de frente de las ondas de impulso originadas en los rayos. A medida que la onda de impulso viaja por el conductor enterrado, el valor inicial de la impedancia característica se va reduciendo hasta llegar al valor de la resistencia de dispersión, en un tiempo que depende básicamente de la longitud del conductor y de la velocidad de propagación de la onda. Transcurridos unos $5 \mu\text{s}$ a partir de la llegada de la onda, el valor de la impedancia se reduce al valor de la resistencia de puesta a tierra. Por lo tanto, es más aconsejable usar varios conductores cortos enterrados que usar uno solo de longitud equivalente.

Los contrapesos actúan como una guía de onda para los campos eléctricos y magnéticos asociados con la corriente inyectada al suelo. La representación del contrapeso (modelo) se efectúa con parámetros distribuidos, es decir, la resistencia, la inductancia, la capacitancia y la conductancia (R, L, C, G) se expresan por unidad de longitud del conductor, conformando una línea de transmisión con pérdidas como se expone en la figura 1. Las longitudes típicas de contrapesos empleados en la práctica varían entre 15 y 60 metros.

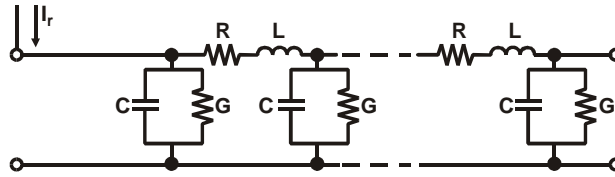


Figura 91. Modelo de un contrapeso

Las ecuaciones para el cálculo de los parámetros del circuito de la figura 1 son:

Conductancia (G): Se calcula por medio del inverso de la resistencia por unidad de longitud.

$$G = \frac{\pi}{\rho \left(\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2ha}} \right) - 1 \right)} \quad [\text{S}] \quad [26]$$

Donde: "h" es la profundidad a la cual se encuentra enterrado el contrapeso en metros, ρ es la resistividad en $\Omega \cdot \text{m}$ y "l" es la longitud del contrapeso en metros.

Inductancia: La circulación de la corriente de impulso en el conductor, genera un campo magnético alrededor del mismo. El medio se caracteriza en este caso, por ser de permeabilidad constante. La inductancia por unidad de longitud para un contrapeso, se calcula usando datos experimentales de la velocidad de propagación de la onda en el suelo, que es del orden de $80 \text{ m}/\mu\text{s}$, para resistividades entre 50 y $200 \Omega \cdot \text{m}$ y permitividad alrededor de 20 .

$$L = \frac{\mu}{\pi} \left(\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2ha}} \right) - 1 \right) \quad [27]$$

Esta ecuación corresponde a los desarrollos matemáticos expresados por Sunde.

Capacitancia: Se calcula a partir de la relación directa entre la conductividad del suelo y la constante de proporcionalidad existente entre los dos factores, la ecuación para el cálculo de la capacitancia por unidad de longitud esta dada por:

$$C = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\left(\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2ha}} \right) - 1 \right)} \quad [28]$$

Un contrapeso

En un contrapeso, los impulsos de corriente se propagan a 1/3 de la velocidad de la luz o sea 80 m/ μ s. Un cable contrapeso tiene una impedancia característica inicial al impulso relativamente alta (100 a 200 Ω), pero al propagarse la onda de corriente a través del contrapeso, la relación v/i (no la impedancia característica), se ve reducida o incrementada hasta su resistencia de dispersión, en un tiempo que depende de la longitud del cable y de la velocidad de propagación del impulso. Calcular contrapesos con tiempos de viaje (t) mayor a 1 μ s, garantiza que cuando la onda vuelve, el fenómeno está decreciendo.

A medida que se reduce la longitud del contrapeso en una distancia equivalente al recorrido de la corriente de impulso en un tiempo Δt , la resistencia aumenta, es decir, la corriente inyectada al electrodo nunca percibe instantáneamente una resistencia baja sino un conjunto de resistencias de valores muy altos correspondientes a la Z_0 . Respecto a la inductancia y la capacitancia, sucede lo mismo que con la resistencia serie, es decir, los valores iniciales son grandes, pero en un conjunto de n segmentos del contrapeso, los dos parámetros combinados con una resistencia alta, hacen que los tiempos de carga y descarga de los condensadores sean largos.

Las corrientes transversales o de dispersión que se disipan a través de los caminos laterales son muy pequeñas. La trayectoria de ésta corriente se puede modelar como una línea de transmisión en la cual también hay disipación lateralmente. Por lo tanto, tiene implícito la existencia de una longitud máxima a la cual la corriente dispersada a una distancia en la dirección radial del conductor, se ha reducido casi a cero y como la densidad de corriente es tan pequeña, lo más probable es que esta longitud no alcance una distancia superior a algunas decenas de centímetros.

La onda de corriente se atenúa rápidamente, si la resistividad es muy baja. Si se rodea el conductor con un suelo artificial que tenga una resistividad sustancialmente baja, comparada con la del terreno natural, a medida que la onda de corriente viaja, le toma un tiempo adicional percibir los puntos donde la resistividad aumentó, produciendo el efecto de entregar más corriente al suelo exterior ocasionando una reducción de la resistencia en cada segmento del contrapeso, dando como resultado final una disminución considerable de la resistencia neta.

Contrapeso y varillas

El efecto de una varilla en el punto inicial de un contrapeso es disminuir la impedancia al impulso, mientras que la resistencia en estado estacionario disminuye pero no en la misma proporción. Mediante simulaciones en el programa Spice, en un terreno de $2000 \Omega \cdot m$ y una permitividad relativa de 20, un contrapeso de 60 m enterrado a 0,6 m, presenta una Z_0 de 170Ω ; al instalar un electrodo vertical en el punto de inyección de corriente, la Z_0 disminuye a 140Ω , es decir, la impedancia al impulso se reduce en un 17,6%. Cuando la varilla y el contrapeso están rodeados de un suelo artificial de baja resistividad ($<1 \Omega \cdot m$), la impedancia al impulso llega a 60Ω , teniendo una reducción efectiva del 57,15%. El 88% de la corriente circula por el contrapeso y el 12% por la varilla, es decir, por el contrapeso se va casi 7 veces más corriente que por la varilla.

Se puede afirmar que la influencia de la varilla ubicada en el punto inicial del contrapeso consiste en reducir la impedancia al impulso y es poco efectiva para disminuir la resistencia en estado estacionario. En conclusión es mejor una puesta a tierra compuesta por una combinación de varilla y contrapeso, que únicamente de contrapeso. Si se adiciona una varilla con suelo artificial al final del contrapeso, se mejora la resistencia de estado estacionario.

Dos o más contrapesos

Cuando se aplica un impulso de corriente en un punto en donde existen dos o más contrapesos, la impedancia al impulso y la resistencia en estado estacionario son reducidas proporcionalmente al número de contrapesos. El efecto producido por el incremento de contrapesos en el punto de ingreso de la corriente, es aumentar la corriente de dispersión hacia el suelo, debido a la multiplicidad de caminos; permitiendo que se atenué la corriente incidente de manera igual y simultánea en cada contrapeso.

RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA IMPEDANCIA DE IMPULSO

Los resultados experimentales de Berger y Darveniza han mostrado que la respuesta dinámica o transitoria de una puesta a tierra es no lineal y se asemeja a la característica de un descargador de sobretensiones tipo válvula, cuyo comportamiento se describe mediante la siguiente ecuación:

$$R = kI^\alpha \quad [\Omega]$$

Donde R es la resistencia no lineal a un nivel de corriente de I amperios, la constante k depende del tipo de suelo y α depende de la configuración. La ecuación anterior no expresa alguna dependencia explícita entre la resistencia, el gradiente de tensión de ruptura crítico y el tiempo de retraso ocasionado por

la ionización del suelo. La dependencia con el gradiente de tensión crítica esta implícita en las constantes k y α , las cuales se deben evaluar para cada tipo de configuración de electrodos y para cada tipo de terreno.

Otra variable importante es el campo eléctrico crítico para producir ionización. Oettle ha propuesto una relación con la resistividad, dada por la siguiente ecuación:

$$E_c = 241\rho^{0.125} \quad [\text{kV/m}]$$

CONCLUSIONES

De lo expuesto, se observa que aún se requieren muchos trabajos para analizar el comportamiento de la puesta a tierra bajo condiciones de impulsos tipo rayo, por los grandes errores que pueden derivarse de considerar únicamente la resistencia de puesta a tierra para baja frecuencia, como indicativo de su comportamiento transitorio. Lo anterior no obsta para dar unas indicaciones de orden práctico, como que cada bajante de un sistema de protección contra rayos, llegue a un electrodo; que se debe conservar una proporción mínima entre electrodo y contrapeso de 1:2; que los contrapesos son la mejor configuración de una puesta a tierra de protección contra rayos (PTPR); que es mejor construir varios contrapesos cortos que uno largo, pero sin pasar de cinco; que deben construirse entre 15 y 60 metros; que se deben medir estas puestas a tierra con telurómetros con frecuencia de 25 kHz o más.

Para calcular la longitud de un contrapeso para una torre de alta tensión o de comunicaciones, puede emplearse la siguiente ecuación, que se viene aplicando con éxito desde hace varios años:

$$L_c = 50 - \frac{2}{3}(H - 15) \quad [\text{m}]$$

Donde L_c es la longitud del contrapeso en metros y H es la altura de la torre.

REFERENCIAS

1. BERGER, K. "The behavior of Grounding under High Impulse Current"
2. BEWLEY, L. V. "Traveling Waves on Transmission Systems"
3. CHISHOLM William. A., Y. L. Chow, "Lightning Surge Response Of Transmission Tower", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983.
4. CHOWDHURI Pritindra. "Analysis Of Lightning- Induced Voltages on Overhead Lines" IEEE Transactions on Power Delivery, 1989.
5. CORRREIA M. T. , M. E. Almeida "Accurate Modelling of Rod Driven Tower Footing" IEEE Transactions on Power Delivery, 1996.
6. DARVENIZA Mat "Tower Surge Impedance" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969.
7. DARVENIZA, M., Liew A.C., "Dinamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earths" Proc IEE, 1974.
8. GRCEV, Leonid D. "Computer Analysis of Transient Voltajes in Large Grounding Systems" IEEE Transactions on Power Delivery, 1996.
9. GRCEV, Leonid D. y DAWALIBI, Farid. "An Electromagnetic Model for Transients in Grounding System" IEEE Transactions on Power Delivery, 1990
10. GREENWOOD, Alan. Electrical Transients in Power Sitems. Second Edition, 1990.
11. LOBODA, M. y Pochanke, Z. "Implementation of the Dynamic Model of Surge Solid Conduction for Transient Behaviour of Grounding Electrodes Simulations Using Atp version of EMTP" 22 ICLP 1994.
12. MAZZETTI Carlo, Veca, Giuseppe M. " Impulse Behavior of Ground Electrodes" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983.
13. MELIOPOULOS A. P., M MOHARAM. G. "Transient Analysis of Grounding Systems" IEEE Transactions on Power Delivery, 1983.
14. MELIOPOULOS A. P., Sakis "Power Systems Grounding and Transients" Marcel Dekker, Inc. 1988.

15. OETTLER E. E. "A new General Estimation Curve For Predicting The impulse Impedance of Concentrated Earth Electrodes" IEEE Trans. on Power Delivery, 1988.
16. PAPALEXOPOULOS A. D, MELIOPOULOS A. P. "Frequency Dependent Characteristics of Grounding Systems" IEEE Transactions on Power Delivery, 1987.
17. SUNDE, Erling D. "Earth Conduction Effects in Transmission Systems" 1948
18. TOBIAS, John M., "A Brief History of the Development of Lightning Protection Design Practices (an american perspective)" Ground 2002 and 3rd Wae, 2002.

*ALAN DUQUE HENAO. Ingeniero electricista de la Universidad Tecnológica de Pereira, gerente de la firma DEMO INGENIERIA LTDA, con amplia experiencia en áreas de Mantenimiento Eléctrico, Producción, Control de Calidad, Sistemas de Comunicación, Estudios de Calidad de Energía y Puestas a Tierra.
demoing@supercabletv.net.co

**FAVIO CASAS OSPINA. Ingeniero electricista de la Universidad Nacional de Colombia, gerente de la firma SEGURIDAD ELÉCTRICA LTDA, licenciado en Salud Ocupacional del Ministerio de Salud, con estudios de maestría en Sistemas de Distribución, presidente del Comité de Protección contra Rayos de ICONTEC y asesor del Ministerio de Minas y Energía para la elaboración del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas para Colombia.
favigel@etb.net.co

Anexo 9

Definiciones

Tomado de: Tierras, Soporte de la Seguridad Eléctrica, Favio Casas Ospina, segunda edición, Bogotá, D.C., Junio de 2003.

Absorción:

Es la conversión irreversible de energía de una onda electromagnética en otra forma de energía (normalmente calor) como resultado de la interacción con el material que la absorbe.

Accidente:

Evento no deseado, incluidos los descuidos y las fallas de equipos, que da por resultado la muerte, una lesión personal, un daño a la propiedad o deterioro ambiental.

Acometida (Service):

Es una derivación de la red de distribución que provee energía eléctrica a un inmueble (incluye conductores y accesorios), que va desde el empalme o punto de unión, hasta los bornes de salida del dispositivo de corte localizado inmediatamente después del medidor.

Aislante:

Material que impide la propagación de algún fenómeno o agente físico. Material

de tan baja conductividad eléctrica, que puede ser utilizado como no conductor.

Ambiente Electromagnético:

La totalidad de los fenómenos electromagnéticos existentes en un sitio dado.

Análisis de Riesgos:

Conjunto de técnicas para definir, clasificar y evaluar los factores de riesgo y la adopción de las medidas para su control.

Apantallamiento (Shielding):

Elementos metálicos que se instalan alrededor de los dispositivos que se desean proteger contra los efectos de una perturbación.

Bajante (Down Conductor):

Elemento conectado eléctricamente entre los pararrayos y la puesta a tierra respectiva, cuya función es conducir las corrientes de rayo que puedan incidir sobre la instalación a proteger.

Barraje Equipotencial - BE (Ground Busbar, Ground Bar, Ground Bus o Grounding Block):

Conductor de tierra colectiva, usualmente una barra de cobre o un cable que permite la unión de dos o más conductores y garantiza el mismo potencial.

Bobina de Choque (Choke Coil):

Elemento acoplador que puede utilizarse para interconectar los sistemas de puesta a tierra de potencia y de equipo sensible o para reducir ruidos eléctricos en la alimentación de equipo sensible.

Cable Apantallado:

Cable con una envoltura conductora alrededor del aislamiento que le sirve como protección electromecánica. Es lo mismo que cable blindado.

Carga Lineal (Linear load):

Es aquella en donde la forma de onda de la corriente de estado estable, sigue la forma de onda de la tensión aplicada.

Carga no Lineal (Nonlinear load):

Es aquella en donde la forma de onda de corriente de estado estable, no sigue la forma de onda de la tensión aplicada.

Carga Crítica (Critical Load):

Es aquella de cuyo funcionamiento incorrecto puede derivar en perjuicios económicos o de diversa índole, normalmente necesita ser alimentada por fuentes de gran calidad, confiabilidad y eficiencia.

Circuito:

Lazo cerrado formado por un conjunto de elementos, dispositivos y equipos eléctricos, alimentados por la misma fuente de energía y con las mismas protecciones contra sobretensiones y sobrecorrientes. No se toman los cableados internos de equipos como circuitos.

Compatibilidad Electromagnética (Electromagnetic Compatibility):

Es la capacidad de un equipo o sistema para funcionar satisfactoriamente en su ambiente electromagnético, sin dejarse afectar ni afectar a otros equipos por energía electromagnética, radiada o conducida.

Conductividad Eléctrica (χ):

Es el poder conductor específico de una sustancia. Es el recíproco o inverso de la resistividad. Su unidad es el siemens.

Conductor Activo:

Aquellas partes destinadas, en su condición de operación normal, a la transmisión de electricidad y por tanto sometidas a una tensión en servicio normal.

Conductor de Puesta a Tierra de Equipo (Grounding Conductor Equipment):

Es el conductor usado para conectar partes metálicas, canalizaciones y gabinetes con la puesta a tierra.

Conductor del Electrodo de Puesta a Tierra (Grounding Electrode Conductor):

Conductor que es intencionalmente conectado a una puesta a tierra, desde el neutro, bien sólidamente o a través de una impedancia limitadora de corriente.

Conector:

Dispositivo que une dos o más conductores con el objeto de suministrar un camino eléctrico continuo.

Conexión de Puesta a Tierra:

Soldadura exotérmica, lengüeta certificada, conector a presión o de cuña certificados o abrazadera certificada; destinados a asegurar, por medio de una conexión especialmente diseñada, dos o

más componentes de un sistema de puesta a tierra.

Conexión equipotencial:

Conexión eléctrica entre dos o más puntos, de manera que cualquier corriente que pase, no genere una diferencia de potencial sensible entre ambos puntos.

Confiabilidad:

Capacidad de un dispositivo, equipo o sistema para cumplir una función requerida, en unas condiciones y tiempo dados. Equivale a fiabilidad.

Dispositivo de Protección Contra Sobretensiones Transitorias-DPS (Surge Protective Device):

Dispositivo para protección de equipos eléctricos, el cual limita el nivel de la sobretensión, mediante la absorción de la mayor parte de la energía transitoria, minimizando la transmitida a los equipos y reflejando la otra parte hacia la red. No es correcto llamarlo pararrayos.

Electrocución:

Paso de corriente eléctrica a través del cuerpo humano.

Electrodo de Puesta a Tierra (Grounding Electrode):

Conductor o conjunto de conductores enterrados que sirven para establecer una conexión con el suelo, inalterables a la humedad y a la acción química del terreno.

Equipotencializar (Bonding):

Es el acto, proceso, práctica o acción de conectar partes conductivas de las instalaciones, equipos o sistemas entre sí o a un sistema de puesta a tierra, mediante una baja impedancia, para que la diferencia de potencial sea mínima entre los puntos interconectados.

Fase (Phase o Line):

Designación de un conductor, un grupo de conductores, un terminal, un devanado o cualquier otro elemento de un sistema polifásico que va a estar energizado durante el servicio normal.

Grado de Riesgo:

Valoración conjunta de la probabilidad de ocurrencia de los accidentes, de la gravedad de sus efectos y de la vulnerabilidad del medio

Inmunidad (Immunity):

Es la capacidad de un equipo o sistema para funcionar correctamente sin

degradarse ante la presencia de una perturbación electromagnética.

Instalación Eléctrica (Electrical Installation):

Conjunto de aparatos eléctricos y de circuitos asociados, previstos para un fin particular: generación, transmisión, transformación, rectificación, conversión, distribución o utilización de la energía eléctrica.

Interfaz (Interface):

Límite entre dos sistemas o entre dos partes de un mismo sistema, que se define por la especificación de características apropiadas, usualmente con el propósito de asegurar la compatibilidad de formatos, de funciones, de señales y de interconexión en el límite.

Nota

Un interfaz puede definirse, por ejemplo, en una conexión de clavija y tomacorriente o en la abertura de una antena.

Interferencia Electromagnética (Electromagnetic Interference):

Degradación funcional o física en las características de un dispositivo, equipo o sistema; causadas por una perturbación electromagnética.

Malla de Alta Frecuencia (Signal Reference Grid):

Malla de conductores que se instala en el piso de centros de cómputo, para evitar interferencia de alta frecuencia.

Mantenimiento:

Conjunto de acciones o procedimientos tendientes a preservar o restablecer un bien, a un estado tal que le permita garantizar la máxima confiabilidad.

Método Electrogeométrico:

Procedimiento que permite establecer cual es el volumen de cubrimiento de protección contra rayos de una estructura para una corriente dada, según la posición y la altura de la estructura considerada como pararrayos.

Neutro (Neutral o Grounded Service Conductor):

Conductor de servicio puesto a tierra.

Nivel Ceraunio o Ceraunico:

Número de días al año, en que por lo menos se oye un trueno. El término viene de la raíz griega $\kappa\epsilon\rho\alpha\upsilon\omicron\varsigma$ (keraunós) que en inglés se traduce como Ceraunic (no Keraunic) y en francés Céraunien. En el idioma castellano la traducción más correcta es Ceraunio, que es la adjetivación del verbo en griego, sin tilde ni acento por tener dos vocales largas y

escrito con C que es la forma de traducir la K. También es válido decir Ceraunico. No se debe escribir ceráunio, porque se estaría refiriendo a quien produce la acción.

Pararrayos o Terminal de Captación o Dispositivo de interceptación de rayos (Air Terminal):

Elemento metálico resistente a la corrosión, cuya función es interceptar los rayos que podrían impactar directamente sobre la instalación a proteger. Debe ser ubicado de tal manera que intercepte el rayo y defina un volumen de protección.

Perturbación Electromagnética (Electromagnetic Disturbance):

Cualquier fenómeno electromagnético que puede degradar las características de desempeño de un equipo o sistema.

Puente de Conexión Equipotencial (Bonding jumper):

Conductor confiable que asegura la conductividad eléctrica necesaria entre las partes metálicas que deben estar eléctricamente conectadas entre sí.

Puerto (Port):

Punto de interfaz entre un equipo y su ambiente electromagnético.

Puesta a Neutro:

Sistema de protección contra contactos eléctricos indirectos, que consiste en unir las carcasas de los equipos al neutro, de tal forma que los defectos de aislamientos, se transformen en cortocircuitos entre fase y neutro. Ya no se permite.

Puesta a Tierra (Grounding o Earthing):

Grupo de elementos conductores equipotenciales, en contacto eléctrico con el suelo o una masa metálica de referencia común, que distribuye las corrientes eléctricas de falla en el suelo o en la masa. Comprende electrodos, conexiones y cables enterrados.

Puesta a Tierra Antiestática:

Subsistema de puesta a tierra diseñado y construido para desviar hacia el terreno los potenciales originados en fenómenos de electricidad estática, por su gran riesgo de producir incendios o daños en equipos electrónicos.

Puesta a Tierra de protección contra rayos:

Es un subsistema de puesta a tierra que debe garantizar la disipación en el terreno de las corrientes provenientes de las descargas eléctricas atmosféricas directas sobre la instalación considerada.

Puesta a Tierra de Protección:

Conjunto de conexión, cable y clavija que se acoplan a un equipo, para prevenir electrocuciones por contactos con partes metálicas energizadas accidentalmente.

Puesta a Tierra de Servicio:

Puesta a tierra que pertenece al circuito normal de corriente; sirve tanto para condiciones de funcionamiento normal, como de falla. Pueden ser de subestación, de comunicaciones, de estática, de equipo sensible, de terminales de captación. o requerida por las disposiciones de los fabricantes de equipo electrónico.

Rayo (Lightning):

La descarga eléctrica atmosférica o más comúnmente conocida como rayo, es un fenómeno físico que se caracteriza por una transferencia de carga eléctrica de una nube hacia la tierra, de la tierra hacia la nube, entre dos nubes, al interior de una nube o de la nube hacia la ionosfera.

Receptor:

Todo equipo o máquina que utiliza la electricidad para un fin particular.

Resistencia de Puesta a Tierra o Resistencia de Dispersión (Earth Resistance):

Es la relación entre el potencial del sistema de puesta a tierra a medir, respecto a una tierra remota y la corriente que fluye entre estos puntos.

Resistividad del Terreno (Earth Resistivity):

Es la relación entre la diferencia de potencial en un material y la densidad de corriente que resulta en el mismo. Es la resistencia específica de una sustancia. Numéricamente es la resistencia ofrecida por un cubo de 1m x 1m x 1m, medida entre dos caras opuestas. Se da en ohmio metro (Ωm).

Riesgo (Risk):

Condición ambiental o humana cuya presencia o modificación puede producir un accidente o una enfermedad ocupacional. Posibilidad de consecuencias nocivas, vinculadas a exposiciones reales o potenciales a una forma de energía.

Seguridad:

Es un estado de riesgo aceptable o una actitud mental de las personas.

Sistema (System):

Conjunto de componentes interrelacionados e interactuantes para llevar a cabo una misión conjunta. Admite ciertos elementos de entrada y produce ciertos elementos de salida en un proceso organizado.

Sistema de Protección Externa (SPE):

Es el conjunto comprendido por los pararrayos o terminales de captación, las bajantes, el sistema de puesta a tierra, conectores herrajes y otros, cuya función es captar los rayos y llevarlos a tierra en forma segura.

Sistema de Protección Interna (SPI):

Conjunto de dispositivos y técnicas para reducir las sobretensiones transitorias que se pueden presentar al interior de una instalación.

Sistema de Puesta a Tierra (SPT):

Conjunto de elementos conductores de un sistema eléctrico específico, sin interrupciones ni fusibles, que conectan los equipos eléctricos con el terreno o una masa metálica. Comprende la puesta a tierra y el cableado puesto a tierra.

Sistema Ininterrumpido de Potencia (UPS):

Sistema que provee energía a cargas críticas unos milisegundos después del corte de la alimentación normal. Durante ese tiempo, normalmente no debe salir de servicio ninguno de los equipos que alimenta.

Sistema Integral de Protección Contra Rayos (SIPRA):

Sistema con el que se puede alcanzar un alto grado de seguridad para las personas y los equipos, mediante la combinación de varios subsistemas como la protección externa, la protección interna y las acciones preventivas respecto a las personas.

Sobretensión (Overvoltage):

Tensión anormal existente entre dos puntos de una instalación eléctrica, superior a la tensión máxima de operación normal de un dispositivo, equipo o sistema.

Sólidamente Puesto a tierra (Grounded Solidly o Grounded Effectively):

Sistema de conexión a una puesta a tierra, sin otra resistencia que la del cable, es decir, sin resistencias ni inductancias.

Suelo o Terreno (Soil):

Capa de productos de meteorización, llena de vida, que se encuentra en el límite entre la roca inerte de la corteza y la atmósfera.

Suelo Artificial (Artificial Soil):

Compuesto preparado industrialmente, de baja resistividad, para potenciar la conductividad de un electrodo enterrado.

Supresión (Suppression):

Reducción o eliminación de emisiones indeseables por técnicas tales como: absorción, equipotencialización metálica, filtrado, conexiones de puesta a tierra, apantallamientos o alguna combinación de las anteriores.

Susceptibilidad (Susceptibility):

La inhabilidad de un dispositivo, equipo o sistema para operar sin degradarse en presencia de una perturbación electromagnética.

Telecomunicación:

Toda transmisión, emisión o recepción de signos, señales, escritos, imágenes, sonidos o informaciones de cualquier naturaleza por hilo, radioelectricidad, medios ópticos u otros sistemas electromagnéticos.

Telurómetro (Tellurohm o Earth Tester):

Nombre en castellano del equipo diseñado para medición de resistividad y resistencia de sistemas de puesta a tierra. Sus principales características son: frecuencia, alarma, detección de corrientes espurias, escala y margen de error.

Tensión (Potential Difference):

La diferencia de potencial eléctrico entre dos conductores, que hace que fluyan electrones por una resistencia. Tensión es una magnitud, cuya unidad es el voltio. En castellano no es correcto hablar de "voltaje" y en inglés también se está eliminando el término "voltage" cuando se refiere a diferencia de potencial (como aparece en el NEC-2002)

Tensión de Contacto (Touch Voltage):

Diferencia de potencial que durante una falla se presenta entre una estructura metálica puesta a tierra y un punto de la superficie del terreno a una distancia de un metro. Esta distancia horizontal es equivalente a la máxima que se puede alcanzar al extender un brazo.

Tensión de Paso (Step Voltage):

Diferencia de potencial que durante una falla se presenta entre dos puntos de la

superficie del terreno, separados por una distancia de un paso (aproximadamente un metro), en la dirección del gradiente de tensión máximo.

Tierra (Earth, Ground, Terra, Terre, Örlliche, Ziemia):

Para sistemas eléctricos, es una expresión que generaliza todo lo referente a sistemas de puesta a tierra. En temas eléctricos se asocia a suelo, terreno, tierra, masa, chasis, carcasa, armazón, estructura o tubería de agua. El término "masa" solo debe utilizarse para aquellos casos en que no es el suelo, como en los aviones, los barcos y los carros.

Tierra Aislada (Insulated Equipment Grounding Conductor):

Es un conductor de tierra de equipos electrónicos, aislado y que recorre las mismas conducciones o canalizaciones que los conductores de alimentación.

Tierra Remota (Earth Remote):

Sistema de puesta a tierra lejano, respecto al sistema considerado, para el cual se asume que su potencial es cero y que no causa interferencia.

Tomacorrientes con Polo a Tierra:

Son aquellos con una tercera clavija que hace el primer contacto eléctrico al

conectar el equipo. Algunos vienen con la tierra unida a la caja y otros con la tierra aislada (para equipos sensibles).

Transitorio:

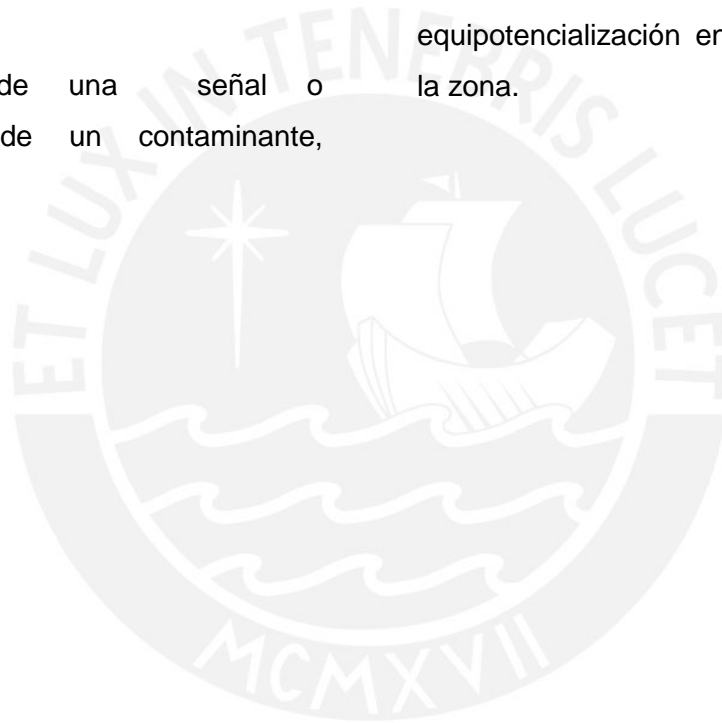
Designa un fenómeno o una cantidad que varía entre dos estados consecutivos durante un intervalo de tiempo corto comparado con la escala de tiempo de interés.

Umbral: Nivel de una señal o concentración de un contaminante,

comúnmente aceptado como de no daño al ser humano.

Zonificación:

Es el método por el cual se determinan unos volúmenes de una instalación en donde se deben cumplir las mismas condiciones electromagnéticas para los dispositivos, equipos o sistemas y definen los puntos de equipotencialización en las fronteras de la zona.



Anexo 10

Mediciones

Medición de resistividad.

La medición de la resistividad de un terreno es un requisito indispensable antes de diseñar las puestas a tierra para una instalación.

PRECISIÓN: Está dada por la no interacción de electrodos (garantizada al usar una separación conveniente), por el número de medidas (se deben tomar como mínimo dos ortogonales) y por las características del equipo empleado.

INTERFERENCIA: En las instalaciones, normalmente se tienen señales de 60 Hz y/o de muy alta frecuencia. Para evitar interferencia con estas señales, se selecciona un equipo con una frecuencia de operación no múltiplo entera de la fundamental del sistema eléctrico, por ejemplo 1470 Hz.

CONDICIONES DE MEDICIÓN: Se debe disponer de un área semidespejada de 25 x 25 m.

En la teoría clásica existen los siguientes métodos:

- Arreglo de cuatro electrodos
- Arreglo Schlumberger o de gradiente
- Arreglo Wenner o de potencial

- Arreglo de polos
- Arreglo de dipolos
- Arreglo polo - dipolo
- De dos electrodos
- Por medida de resistencia
- Por toma de muestras

De los anteriores métodos comúnmente aceptados, el más adecuado para mallas de puestas a tierra, es el de Wenner, el cual se desarrolla a continuación:

Es un caso particular del método de los cuatro electrodos, solo que aquí se disponen en línea recta y equidistante una distancia “a”, simétricamente respecto al punto en el que se desea medir la resistividad del suelo, no siendo necesario que la profundidad de los electrodos auxiliares, sobrepase los 30 cm. El aparato de medida es un telurómetro clásico con cuatro terminales, siendo los dos electrodos extremos los de inyección de la corriente de prueba (I) y los dos centrales los electrodos de medida del potencial (P).

En la práctica se puede admitir que la resistividad aparente es, básicamente la de las capas comprendidas entre la superficie del suelo y la profundidad a la cual la densidad de corriente se ha reducido a la mitad de su valor en la superficie, es decir, la profundidad

de investigación es “0.75 a”. El eje del sondeo eléctrico vertical y en consecuencia, de medida de resistividad, se encuentra en el medio del sistema simétrico compuesto por los cuatro electrodos, entre los dos de potencial.

Para obtener la resistividad, se aplica la siguiente ecuación, que puede ser simplificada como aparece, si la profundidad de enterramiento es 1/20 de la separación de electrodos:

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a}} \approx 2\pi a R$$

Donde, ρ es la resistividad aparente del terreno en $\Omega \cdot m$; R es la resistencia medida por el telurómetro y a es la distancia entre electrodos en metros

En relación con este método, deben tenerse presente los siguientes aspectos:

Noción de la profundidad de investigación:
La densidad de la corriente en el suelo decrece regularmente cuando aumenta la profundidad en la vertical de los dos electrodos centrales de medida de potencial ya que la corriente penetra tanto más profundamente en el suelo cuanto más alejados estén los electrodos de inyección y cuanto menos frecuencia se emplee.

En la práctica, se puede admitir que la resistividad aparente es, básicamente, la de las capas comprendidas entre la superficie del suelo y la profundidad a la cual la densidad de corriente se ha reducido a la mitad de su valor en la superficie, siendo esta profundidad de exploración (h), del orden de “0.75 a”.

Elección de la profundidad de investigación:
Cuanta mayor extensión vaya a ocupar el electrodo de tierra, mayor será la profundidad de exploración del suelo de cuyas características depende la puesta a tierra. En la práctica normal, no se recomienda separaciones mayores a 8 m para profundidades de exploración de 6 m.

Por otro lado, los potenciales (GPR) en la superficie, dependen principalmente de la resistividad de la capa superficial de terreno que se escoja, mientras que la resistencia de puesta a tierra no depende de ella.

Medición de resistencia de puesta a tierra.

La impedancia de una puesta a tierra, se reduce prácticamente a su resistencia, pues los efectos inductivos y capacitivos se dan en conductores de grandes longitudes o terrenos rocosos. La medición de la resistencia de puesta a tierra es un requisito indispensable

antes de poner en servicio una instalación eléctrica.

Objetivo: Medir los sistemas de PT instalados

Seguridad: Antes de proceder a la medición de resistencia debe medirse la tensión originada por corrientes espurias. Si supera los 25 voltios, no debe medirse y localizar la falla.

Equipo: Para las mediciones de resistividad y resistencia se debe emplear un telurómetro electrónico digital que cumpla con las normas AIEE 81/62 y VDE 0413, con una precisión de +/- 1%, rango de medición de 0.0 a 20.000 ohmios y con una señal de audio aguda e intermitente que indica si hay anomalías en el circuito de medición. Se recomienda que trabaje a más de 1000 Hz.

Método: De los 10 métodos comúnmente aceptados, el más adecuado para este tipo de configuración, es el de “caída de potencial” con aplicación de la regla del 61.8%.

Requiere dos electrodos auxiliares que se entierran alineados con la malla. Permite la inyección de corriente en uno de ellos considerado como “tierra lejana”, pues debe estar alejada por lo menos 6,5 veces la longitud mayor de la puesta a tierra, para que su interacción tenga un efecto despreciable. El electrodo intermedio se ubica al 61.8% de

la distancia entre la malla y el electrodo de corriente, para medir la elevación de potencial (ver siguiente figura).

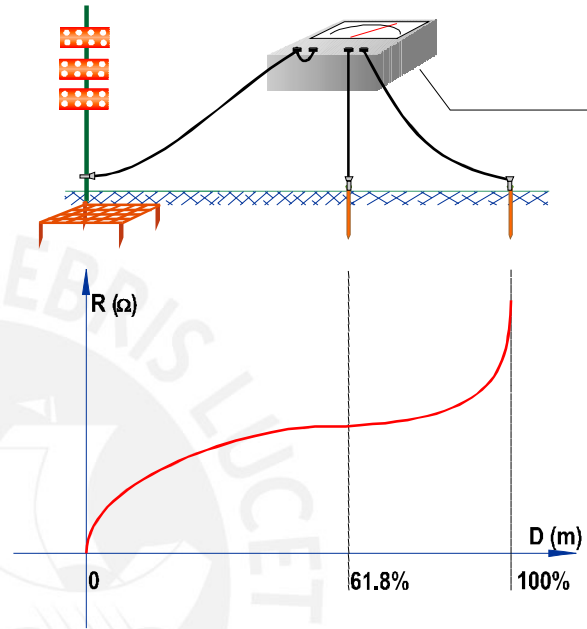


Figura 34

Precisión: Está dada por la no interacción de electrodos (garantizada al usar una tierra lejana), por la ubicación del electrodo intermedio (el 61.8% garantiza la ubicación en la meseta de la curva), por el número de medidas (se deben tomar tres) y por las características del equipo empleado.

Interferencia: En las instalaciones, normalmente se tienen señales de 60 Hz y/o de muy alta frecuencia. Para evitar interferencia con estas señales, se selecciona un equipo con una frecuencia de operación de 1000 Hz o más.

Condiciones de Medición: En muchas ocasiones, como en edificios o cerros, se presentan dificultades prácticas para realizar las mediciones. Cuando no se puedan enterrar los electrodos de pica, debe acudirse a unos planos. Cuando no sea consistente la medición, debe acudirse a otro método. En este aspecto, la experiencia se constituye en la garantía de la medida.

Interpretación de resultados: El valor obtenido es un indicativo de la calidad de la puesta a tierra instalada, pero la profusión de normas hace que la evaluación sea de interpretación propia de cada empresa. Un concepto respaldado en una amplia experiencia, permite definir el valor más cercano a la realidad.

Luego de construida la puesta a tierra teniendo en cuenta todos los parámetros que se necesitan, se alcanza la etapa que ha de constituir la verdadera validación a cualquier instalación de puesta a tierra, la medición de resistencia de puesta a tierra.

La resistencia de puesta a tierra o resistencia de dispersión de tierra se denomina generalmente como “la resistencia del suelo, o de una porción del suelo, al paso de una corriente de tipo eléctrico”. En la actualidad se reconoce que el suelo es un conductor de corriente eléctrica, pero comparado con diferentes tipos de metales la conducción de

corriente que ofrece el suelo es pobre. Sin embargo, si el área del camino que toma la corriente es grande, la resistencia puede ser bastante baja y la tierra puede ser un camino de baja resistencia.

Las mediciones de resistencia de una puesta a tierra son hechas con el fin de determinar la efectividad de la puesta a tierra y las conexiones que son utilizadas en los sistemas eléctricos para proteger las personas y equipos eléctricos que dependen de las mismas; además, permite detectar la elevación de potencial del sistema de puesta a tierra, la seguridad de la conexión a tierra y la variación de la composición y estado físico del suelo.

La resistencia de puesta a tierra se entiende como la razón entre el potencial del sistema de puesta a tierra que se desea medir, con relación a un punto teóricamente ubicado en el infinito, respecto al que se desea medir; el cual se denomina tierra remota y la corriente que se hace fluir entre estos puntos. En la práctica se sabe que casi todo este potencial (cerca del 98%) se localiza a una distancia no muy lejana de la puesta a tierra a medir y se puede considerar este punto aproximadamente como la tierra remota.

La impedancia de una puesta a tierra se reduce a su resistencia al no intervenir efectos inductivos y capacitivos más que para los frentes de ondas de corriente muy escarpados,

de forma que en la práctica solamente se presentan efectos inductivos en el caso de conductores enterrados de grandes longitudes y capacitivos cuando se trata de terrenos rocosos de resistividad demasiado alta.

Principio de medición de un sistema de puesta a tierra

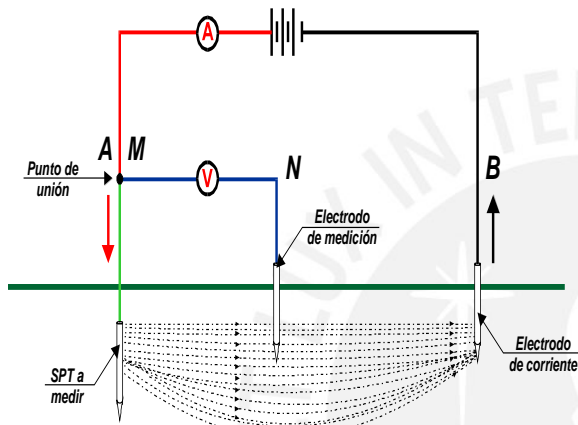


Figura 35

Anexo 11

Normas y Estándares de aceptación internacional vigentes

A continuación se detalla el marco normativo en el cual se sustentan los análisis, definiciones y aplicaciones:

**Tabla 5-a
Marco Normativo**

Nº	Norma	Aplicación	Observaciones
1	IEC 61024-1-1 / IEC 62305-2	Rayos	Metodologías de evaluación del grado de riesgo
2	IEC 61024-1 / IEC 62305-3	Rayos - Estructuras	Indica que cualquier elemento metálico que se encuentre expuesto al impacto del rayo, debe ser tratado como un terminal de captación y por tanto debe ser equipotencializado(1) . Analiza el tema de la bajante(2) Brinda las especificaciones técnicas para la Puesta a Tierra
3	IEC 60364-5-54 / 542.3.2 IEEE-837	Conexiones	Conexiones en las que se debe emplear soldadura exotérmica o conectores certificados
4	IEC 61000-5-2/1997	Sistemas de Puestas a Tierra	Interconexión de Puestas a tierra
5	NFPA 70 250-75 API 2003 – 1998	Equipotencialización	Interconexión de todas las estructuras metálicas
6	NTP 370.052 1999	Tierras	Seguridad Eléctrica. Materiales que constituyen el pozo de puesta a tierra.
7	NTP 370.053 1999	Tierras	Seguridad Eléctrica. Elección de los materiales eléctricos en las instalaciones interiores para puesta a tierra. Conductores de protección de cobre.
8	NTP 370.054 1999	Tierras	Seguridad Eléctrica. Enchufes y tomacorrientes con protección a tierra para uso doméstico y uso general similar.
9	NTP 370.055 1999	Tierras	Seguridad Eléctrica. Sistema de puesta a tierra. Glosario de términos.
10	SIEMENS S45052-L1511-P661 /1993	Tierras	Puesta a Tierra de Equipos de Telecomunicaciones.
11	MOTOROLA: R56 /1994	Rayos	Quality Standards. Fixed Network Equipment Installations.
12	CFE 56100-16 1984	Tierras	Especificación Provisional. Electrodo de Tierra
13	CODENSA LA 870 1998	Tierras	Especificación Técnica Conectores Tipo Cuña
14	CODENSA ET-489 1998	Tierras	Especificaciones técnicas para tratamiento de puesta a tierra.
15	UNESA 6501 F	Tierras	Electrodos de puesta a tierra.
16	ANSI T1.313	Telecomunicaciones	Electrical Protection for telecommunications central offices and similar type facilities.
17	BS 6701 1994	Telecomunicaciones	Installation of apparatus intended for connection to certain telecommunication systems.
18	GTE Addendum 887-030-085 1992	Telecomunicaciones	Engineering Considerations Radio Station Protection..

1: Ver definiciones – Anexo 9

2: Ver definiciones – Anexo 9

Tabla 5-b
Marco Normativo

Nº	Norma	Aplicación	Observaciones
19	NTC 4171 - 1997	Telecomunicaciones	Telecomunicaciones. Nueva Tecnologías. Requisitos para la conexión y continuidad de tierra para telecomunicaciones en construcciones comerciales.
20	TIA/EIA SP-607-A	Telecomunicaciones	Commercial Building grounding and Bonding requirements for Telecommunications (August 1994).
21	UIT (1991)	Telecomunicaciones	Spectrum Monitoring Handbook.
22	UIT –T K11 1993 (Antes CCITT)	Telecomunicaciones	Principios de protección contra las sobretensiones y sobrecorrientes
23	UIT –T K27 1996 (Antes CCITT)	Telecomunicaciones	Configuraciones de continuidad eléctrica y puesta a tierra dentro de los edificios de telecomunicación.
24	UIT –T K31 1993 (Antes CCITT)	Telecomunicaciones	Método de conexión equipotencial y puesta a tierra dentro de los edificios de abonados.
25	UIT –T K35 1996 (Antes CCITT)	Telecomunicaciones	Configuraciones de continuidad eléctrica y puesta a tierra en instalaciones electrónicas distantes.
26	UIT –T K36 1996 (Antes CCITT)	Telecomunicaciones	Selección de los dispositivos de protección.
27	UIT –T K8 –1988 (Antes CCITT)	Telecomunicaciones	Separación en el suelo entre un cable de telecomunicación y el sistema de puesta a tierra de una instalación de energía eléctrica.
28	BS 6651 1999	Rayos	Code of Practice for Protection of Structures against Lightning.
29	IEC 61024-1 1990-03	Rayos	Protection of structures against lightning.
30	IEC 61024-1-1 1993-08	Rayos	Protection of structures against lightning
31	IEC 61024-1-2 1998-05	Rayos	Protection of structures against lightning- Part 1-2.
32	IEC 61312-1 1995-02	Rayos	Protection against lightning electromagnetic impulse.
33	IEC TS 61312-2 1999-08	Rayos	Protection against lightning electromagnetic impulse (LEMP) - Part 2: Shielding of structures, bonding inside structures an earthing.
34	IEC TS 61312-3 2000-07	Rayos	Protection against lightning electromagnetic impulse - Part 3: Requirements of surge protective devices (SPDs).
35	IEC 61312-4 1998-09	Rayos	Protection against lightning electromagnetic impulse - Part 4: Protection of equipment in existing structures.
36	IEC 61662 1995-04	Rayos	Assessment of the risk of damage due to lightning.
37	IEEE Std C62.22 1991	Rayos	Guide for the application of metal-oxide surge arresters for alternating-current systems.
38	KSC-STD-E-0013D, 1995	Rayos	Facility Lightning Protection Design Standard For.
39	LPI 175 - 1987	Rayos	Lightning Protection Institute - Standard of Practice
40	NBR 5419 - 2001	Rayos	Protección de estructuras contra descargas atmosféricas.

**Tabla 5-c
Marco Normativo**

Nº	Norma	Aplicación	Observaciones
41	NBR 5419 - 1993	Rayos	Protección de estructuras contra descargas atmosféricas.
42	NFPA 780 - 2000	Rayos	Standard for Lightning Protection Systems.
43	NFPA 780 - 1992	Rayos	Estándar for Lightning Protection Code.
44	UL 96A - 2001	Rayos	Installations Requirements for Lightning Protection Systems.
45	UL 96A - 1998	Rayos	Installation Requirements for Lightning Protection Systems.
46	UL 96 - 2000	Rayos	Lightning Protection Components.
47	UL 96 - 1985	Rayos	Lightning Protection Components.
48	ANSI/IEEE Std 32 1972	Tierras	Standard Requirements, Terminology and Test Procedure for Neutral Grounding Devices (ANSI)
49	ANSI/IEEE Std 81 1983	Tierras	Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground
50	ANSI/IEEE Std 142 1982	Tierras	Theory of Shielding and Grounding of Control Cables to Reduce Surges.
51	ANSI/IEEE Std 837 1989	Tierras	Std for Qualifying Permanent Connections used in Substation Grounding
52	ANSI/UL 467 1984	Tierras	Standard for Grounding and Bonding Equipment.
53	BS 7430 1998	Tierras	Code of Practice for Earthing.
54	ETSI EN 300 253 V2.1.1 2002-04	Tierras	Environmetal Engineering (EE); Earting and bonding configuration inside telecommunications centres.
55	GENERAL ELECTRIC GER-3205	Tierras	Theory of Shielding and Grounding of Control Cables to Reduce Surges.
56	IEC 60050-195 1998-08 Amend 2001-01	Tierras	International Electrotechnical Vocabulary - Part 195: Earthing and protection againsr electric shock.
57	IEC 60050-195 1998-08	Tierras	International Electrotechnical Vocabulary - Part 195: Earthing and protection againsr electric shock.
58	IEC 60077B.WG2	Tierras	Installation and mitigation guidelines: "Earthing and bonding".
59	IEC 61230 1993-08	Tierras	Live working - Portable equipment for earthing or earthing and short-circuiting.
60	IEC 61557-4 1997-02	Tierras	Part 4: Resistance of earth connection and equipotential bonding.
61	IEC 61557-5 1997-02	Tierras	Part 5: Resistance to earth.
62	IEEE Std 1048 - 1990	Tierras	Guide for Protective Grounding of Power Lines.
63	IEEE Std 367 - 1979	Tierras	Guide for the Maximun Electric Power Station Ground Potential Rise.
64	IEEE Std 665 - 1995	Tierras	Standard for Generating Station Grounding.
65	IEEE Std 81-2 – 1991.	Tierras	Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected

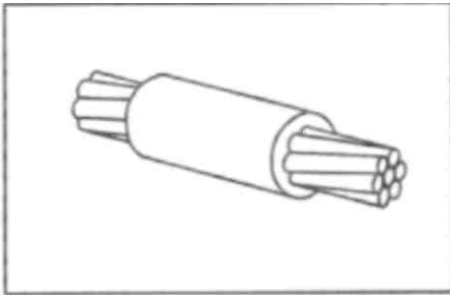
**Tabla 5-d
Marco Normativo**

Nº	Norma	Aplicación	Observaciones
66	KSC-STD-E-0012C - 1994	Tierras	Bonding and Grounding, Standard For.
67	V15-E (1993)	Tierras	Bonding Configurations and Earthing inside a Telecommunication Building.
68	VDE 0141 (1964)	Tierras	Regulation for Earthings in A.C. Installations with Rated Voltage above 1 kV.
69	WESTINGHOUSE	Tierras	Power Systms Grounding.
70	ANSI/IEEE C95.1 1991	Campos Electromagnéticos	IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frecuency Electromagnetic Fields, 3kHz to 300 GHz.
71	IEC 60099-1 1991	Dispositivos Contra Sobretensiones	Surge arresters. Non-linear resistor type gapped surge arresters for a.c. systems.
72	IEC 60099-3 1990	Dispositivos Contra Sobretensiones	Surge arresters. Artifial pollution testing of surge arresters.
73	IEC 60099-4 2001-10	Dispositivos Contra Sobretensiones	Surge arresters. Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems.
74	IEC 60099-4 1998-08	Dispositivos Contra Sobretensiones	Surge arresters. Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems
75	IEC 60099-5 1996	Dispositivos Contra Sobretensiones	Surge Arresters-Part 5: Selection and application recommendation.
76	IEC 61634 1995-04	Dispositivos Contra Sobretensiones	High-voltage switchgear and controlgear - Use and handling of sulphur hexafluoride (SF 6) in high-voltage switchgear and controlgear.
77	IEC 61643-1 2002-01	Dispositivos Contra Sobretensiones	Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems. Part 1: Permormance requirements and testing methods.
78	IEC 61947-2 1995-12	Dispositivos Contra Sobretensiones	Low-voltage switchgear and controlgear. Circuit breakers
79	IEEE C62.41-1991 (R1995)	Dispositivos Contra Sobretensiones	Recommended Practice on Surge Voltages in Low-Voltage AC Power circuits (ANSI)
80	IEEE C62.42-1992	Dispositivos Contra Sobretensiones	Guide for Application of Gas Type and Air Gap Arrester Low-Voltage (Equal to or Less than 100 Vrms or 1200 Vdc) Surge-protective Device (ANSI)
81	IEEE C62.45-1992	Dispositivos Contra Sobretensiones	Guide on Surge testing for Equipment Connected to Low-Voltage AC Power Circuits (ANSI).

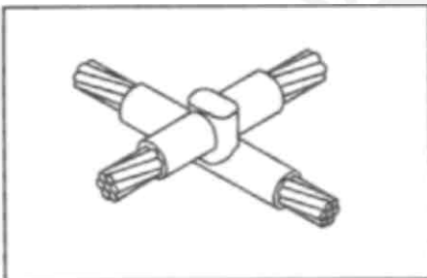
Anexo 12

CONEXIONES

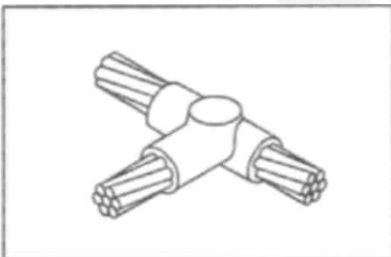
Para las conexiones se emplearon soldaduras exotérmicas y conectores que cumplen con las recomendaciones de las normas IEC 60364-5-54 / 542.3.2, NTC 4628 o la IEEE-837, con el objeto de reducir las resistencias de contacto.



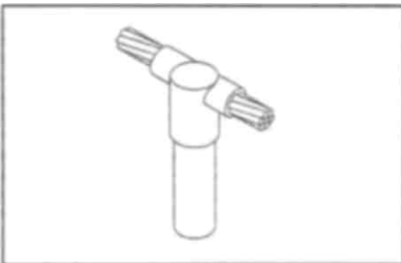
Conexión exotérmica cable a cable



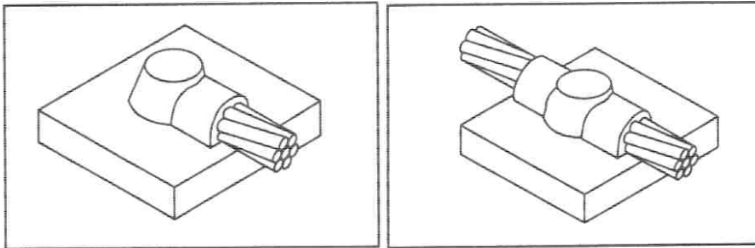
Conexión exotérmica cable a cable en cruz.



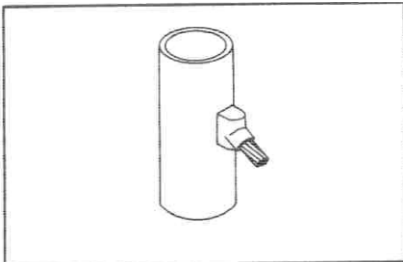
Conexión exotérmica cable a cable en T



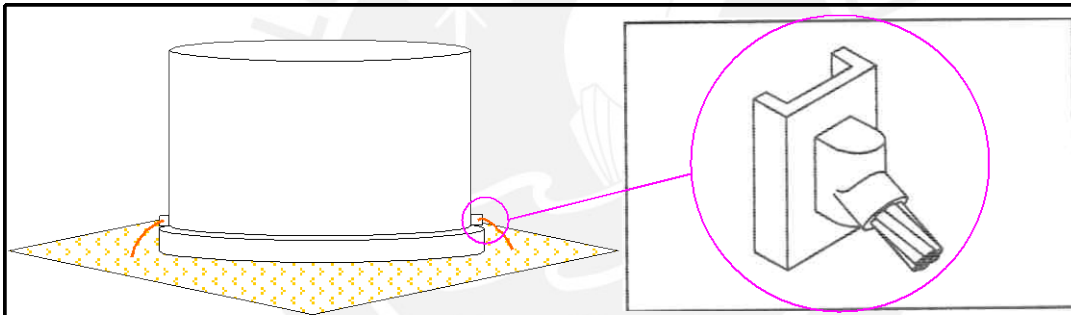
Conexión exotérmica cable – varilla en T



Conexión a estructuras soporte de bombas (estructuras metálicas horizontales)



Conexión exotérmica a tubos de soporte



Conexión exotérmica a estructuras planas (platinas tanques)

Anexo 13

Mediciones de Resistencia de Puesta a Tierra

Para medir una Puesta a Tierra se requiere seguir los procedimientos establecidos por las normas, la Norma Motorola al igual que todas las normas citadas, sugieren realizar las mediciones siguiendo una metodología adecuada y siempre debemos comprobar que los resultados sean correctos, para lo cual se deben realizar por lo menos dos grupos a fin de comparar ambos resultados y si es preciso tres a fin de confirmar su correcto valor.

La Norma Motorola muestra en la siguiente figura las distancias a considerar:

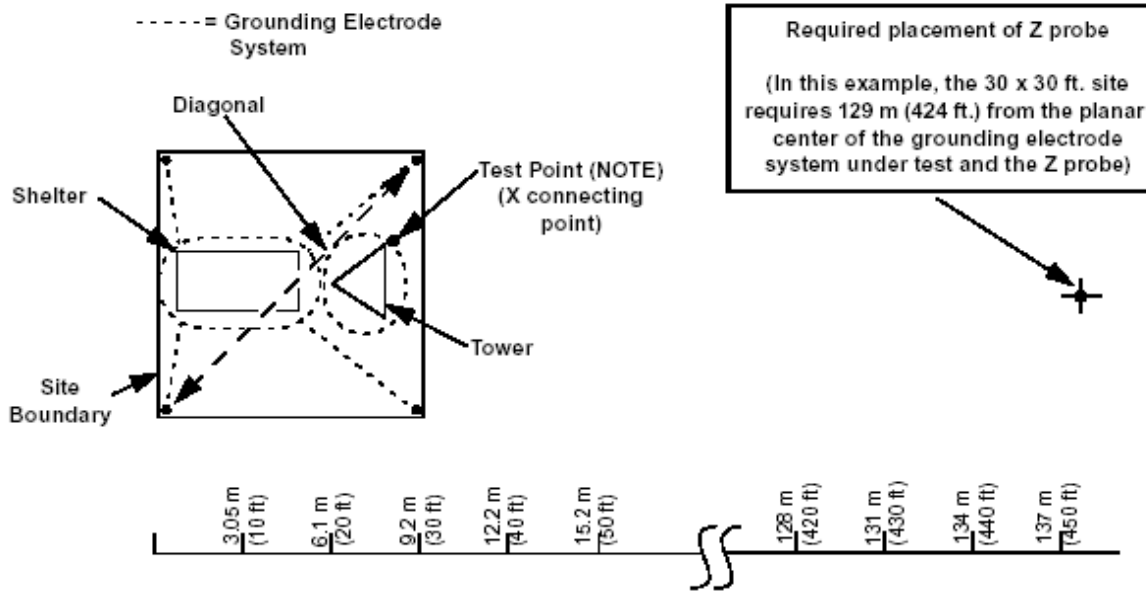


Figura 36
Distancias a considerar para la medición de una puesta a tierra

El esquema siguiente nos muestra al telurómetro junto con los electrodos de medición.

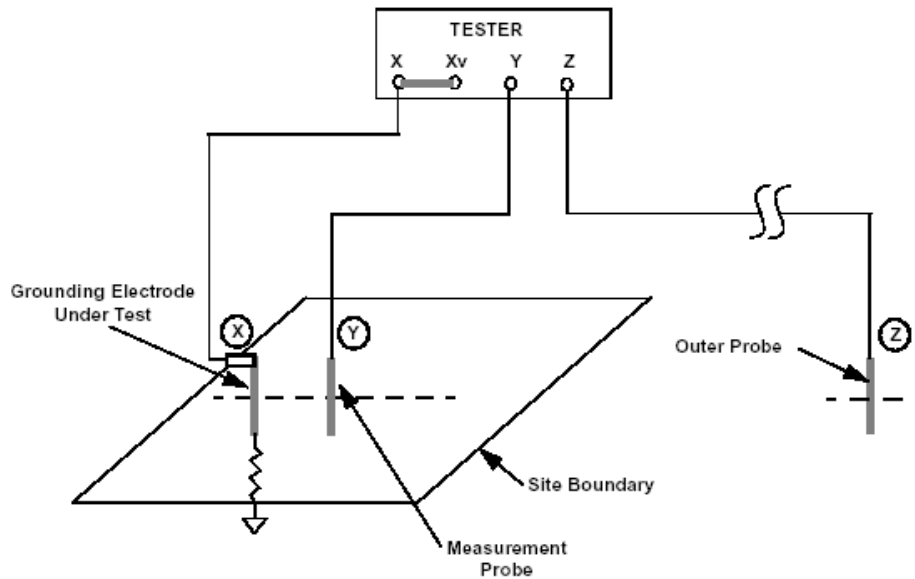


Figura 37
Típico esquema de Medición de Puesta a Tierra

Los Métodos empleados en la Medición de puesta a tierra son muchos y todos deben arrojar resultados que siguen el siguiente criterio para ver si dan un resultado correcto: Cuando se eligen distancias muy largas podemos cometer el error de obtener resultados como los que se muestra en la figura 38, observemos que la zona entre el 10% y el 90% en las abscisas **no es plana**.

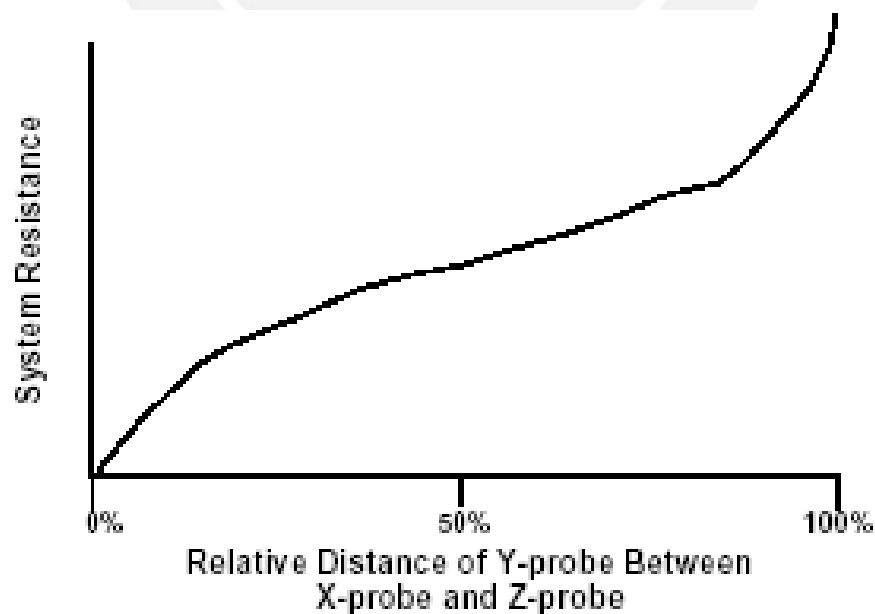


Figura 38
Resultado incorrecto de medición

Cuando se eligen distancias muy cortas podemos cometer el error de obtener resultados como los que se muestra en la figura 39.

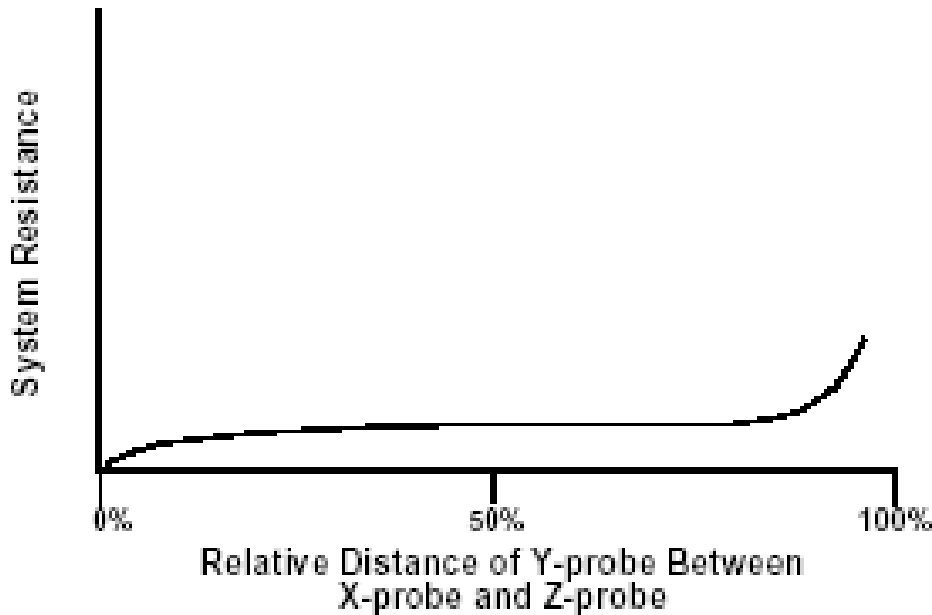


Figura 39
Resultado incorrecto de medición

Un Resultado correcto es el mostrado en la figura 40, donde se muestra una zona plana coherente.

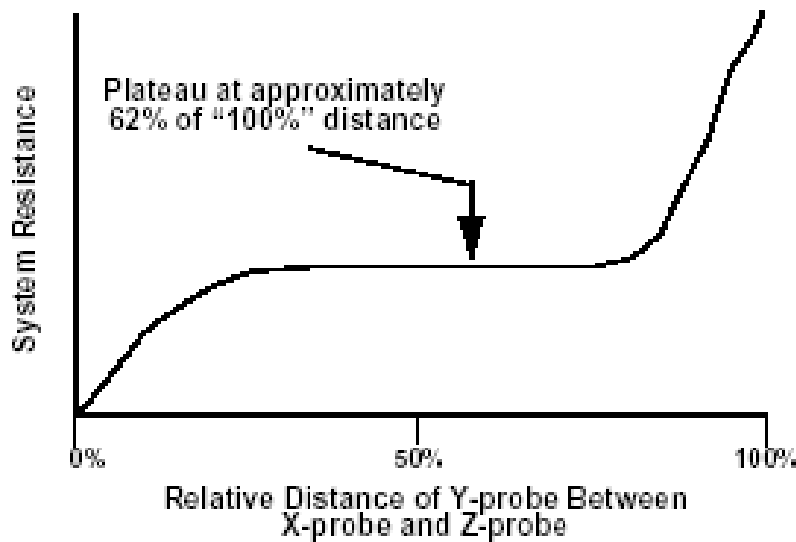


Figura 40
Resultado correcto de medición de Puesta a Tierra:

Fuente: Norma Motorola R56

Anexo 14

EXPLICACIÓN DE CADA TÉRMINO DE LA TABLA 12-b

Mínimo espesor para estructuras en sistemas de captación aérea

Donde:

- [1]: Recubrimiento en caliente o galvanizado, grosor mínimo de capa 1 μm .
- [2]: El recubrimiento deberá ser liso, continuo y libre de impurezas, grosor mínimo de la capa 50 μm .
- [3]: Aplicable solo para varillas tipo Franklin, para aplicaciones donde la tensión mecánica como la carga del viento no son determinantes, un diámetro 10mm. Una varilla tipo Franklin de 1 m de longitud máxima con una fijación adicional se puede usar.
- [4]: Aplicable solo a varillas de tierra con alma de plomo
- [5]: Cromo $\geq 16\%$, níquel $\geq 8\%$, carbón $\leq 0.07\%$
- [6]: Para acero inoxidable incrustado en concreto, y/o en concreto directo con material inflamable, los tamaños mínimos deberán ser aumentados a 78 mm² (10 mm de diámetro) para alambre y 75 mm² (grosor mínimo de 3mm) para cinta sólida.
- [7]: 50 mm² (8 mm de diámetro) se puede reducir a 28 mm² (6 mm de diámetro) en ciertos usos donde la fuerza mecánica no es requisito esencial. Se debería considerar, en este caso, reducir el espacio entre los aseguradores.
- [8]: Si aspectos térmicos y mecánicos son importantes, estas dimensiones se pueden aumentar a 60 mm² para cinta sólida y a 78 mm² para alambre
- [9]: La sección transversal mínima para evitar que se derrita es 16 mm² (cobre), 25 mm² (aluminio), 50 mm² (acero) y 50 mm² (acero inoxidable) para una energía específica de 10000 kJ/ Ω
- [10]: El grosor, el ancho y diámetro son definidos en + - 10%

Anexo 15

CONSTANTES DE MATERIALES PARA PUESTA A TIERRA

Tabla 6

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD	T_m	K_f
	(%)	(°C)	
Cobre blando	100	1083	7
Cobre duro cuando se utiliza soldadura exotérmica	97	1084	7,06
Cobre duro cuando se utilizan conexiones mecánicas a presión	97	250	11,78
Alambre de acero recubierto de cobre	40	1084	10,45
Alambre de acero recubierto de cobre	30	1084	14,64
Varilla de acero recubierta de cobre	20	1084	14,64
Acero 1020	10,8	1510	15,95
Varilla de acero galvanizado	9,8	1400	14,72
Varilla de acero con baño de cinc	8,6	419	28,96
Acero inoxidable 304	2,4	1400	30,05

FUENTE: Tierras, Favio casas Ospina



Anexo 16

SUSTENTACIÓN NUEMÉRICA DE ESTRATIFICACIÓN

Para Calcular la curva que refleja la resistividad de campo, se ha utilizado una ecuación polinómicas de grado 2 y una ecuación exponencial (Que son las que mejor se han adaptado a la gran mayoría de ejemplos trabajados para 2 capas) trabajada por el método de Mínimos cuadrados (Uso directo de la hoja de cálculo en Excel: “Cálculos resistividad y Caracterización”, trabajada para corroborar los resultados del software comercial tecAt Plus 3.2.

Para La verificación de datos, se utilizaron 2 ecuaciones de aproximación:

Ecuación Cuadrática:

$$Y(x) - a_0 + a_1 x + a_2 x^2 \dots\dots\dots (2)$$

Ecuación Potencial:

$$Y(x) - m x^a \dots\dots\dots (3)$$

Para todos los ejemplos trabajados, las constantes para cada ecuación, de acuerdo al método de mínimos cuadrados resultaron:

Caracterización	a0	a1	a2	m	a
1	904.21	96.421	-8.7478	1004.7	0.0727
2	213.06	6.3075	-2.3738	242.73	-0.2426
3	1.4709	0.4873	0.034	1.7066	0.6671
4	47864	-4625	13.053	52365	-0.5562
5	151.81	236.58	-14.698	384.23	0.5482
6	-3.3323	75.559	-5.1799	78.395	0.6614
7	306.64	123.46	-6.1411	407.03	0.3914
8	135.95	60.158	-4.8134	200.96	0.2501
9	266.59	-66.497	5.8942	189.99	-0.4006
10	1214.3	-111.64	-5.0976	1898.1	-1.1393

Analizando la comparación de la Aproximación con **Ecuación cuadrática** y el software comercial TecAt Plus, tenemos:

Caracterización	Rho1			Rho2			h		
	TecAt Plus	Hoja de Cálculo	% de Error	TecAt Plus	Hoja de Cálculo	% de Error	TecAt Plus	Hoja de Cálculo	% de Error
1	981.4	950.3	-3.2%	1,226.8	1,176.0	-4.1%	2.3	0.5	-78.4%
2	215.9	217.2	0.6%	27.2	109.3	301.5%	5.7	1.2	-79.2%
3	1.6	1.7	4.1%	23.6	6.8	-71.1%	1.9	0.4	-75.9%
4	43,894	43,362.5	-1.2%	8,263	18,883.6	128.5%	3	1.0	-66.6%
5	365.2	322.5	-11.7%	1,407.8	980.0	-30.4%	1.1	0.8	-31.8%
6	34.1	60.5	77.5%	435.4	233.1	-46.5%	0.6	0.9	63.8%
7	302.1	370.0	22.5%	987.4	834.7	-15.5%	0.9	0.5	-40.8%
8	230.8	181.8	-21.2%	369.5	311.0	-15.8%	1.8	0.8	-54.7%
9	323.9	231.7	-28.5%	90.1	97.4	8.1%	0.8	0.6	-28.4%
10	1,093.0	1,147.2	5.0%	84.7	53.9	-36.4%	3.7	0.6	-84.1%

Analizando la comparación de la Aproximación con **Ecuación Potencial** y el software comercial TecAt Plus, tenemos:

Caracterización	Rho1			Rho2			h		
	TecAt Plus	Hoja de Cálculo	% de Error	TecAt Plus	Hoja de Cálculo	% de Error	TecAt Plus	Hoja de Cálculo	% de Error
1	981.4	950.3	-3.2%	1,226.8	1,173.4	-4.4%	2.3	0.5	-80.0%
2	215.9	217.2	0.6%	27.2	128.1	370.7%	5.7	1.6	-72.3%
3	1.6	1.7	4.0%	23.6	7.0	-70.2%	1.9	1.0	-46.8%
4	43,894	38,518.6	-12.2%	8,263	16,811.4	103.4%	3	1.7	-40.5%
5	365.2	322.4	-11.7%	1,407.8	1,008.0	-28.4%	1.1	0.7	-34.6%
6	34.1	60.6	77.6%	435.4	212.8	-51.1%	0.6	0.7	23.1%
7	302.1	370.1	22.5%	987.4	860.8	-12.8%	0.9	0.8	-11.9%
8	230.8	182.1	-21.1%	369.5	299.7	-18.9%	1.8	0.7	-62.5%
9	323.9	231.7	-28.5%	90.1	109.1	21.1%	0.8	0.6	-20.9%
10	1,093.0	1,147.0	4.9%	84.7	110.5	30.4%	3.7	1.6	-57.6%

Tabla Completa de resultados análisis:



La Hoja de Cálculo utilizada es:



Anexo 17

EJEMPLOS DE SIMULACIONES Y COMPARACIONES

Caracterización 1

Tabla 7

Lugar	Tres Ríos, CIA Minera San Simón
Ciudad	Trujillo
Fecha	Diciembre del 2,007

a [m]	R [Ohms]	Rho Medido [Ohms-m]	Rho Calculado [Ohms-m] Mediante Una ecuación cuadrática $a_0 + a_1 X + a_2 X^2$	% Error	Rho Calculado [Ohms-m] Mediante una ecuación exponencial $m X^a$	% Error
1.0	152.5	958.2	991.9	4%	1,004.7	5%
2.0	100.0	1,256.6	1,062.1	-15%	1,056.6	-16%
3.0	46.0	867.1	1,114.7	29%	1,088.2	26%
4.0	44.8	1,125.9	1,149.9	2%	1,111.2	-1%
5.0	40.9	1,284.9	1,167.6	-9%	1,129.4	-12%
6.0	32.5	1,225.2	1,167.8	-5%	1,144.5	-7%
7.0	24.7	1,086.4	1,150.5	6%	1,157.4	7%
8.0	22.2	1,115.9	1,115.7	0%	1,168.7	5%

Tabla 8

Experimentación	Mediante Curva cuadrática			Mediante Curva Exponencial		
	Rho_1 [Ohms-m]	Rho_2 [Ohms-m]	h1 [m]	Rho_1 [Ohms-m]	Rho_2 [Ohms-m]	h1 [m]
Según TecAt-Plus [1]	981.4	1,226.8	2.32			
Según Cálculos Teóricos [2]	950.3	1,176.0	0.50	950.3	1,173.4	0.47
Según Software En Matlap [3]						

[1]: TecAt Plus, utiliza su propio algoritmo de cálculo, el cual es desconocido, se coloca en la primera zona solo por cuestión de orden. El software ha sido trabajado para 2 capas.

[2]: Los cálculos realizados en Excel, están basados en la teoría, según la ecuación de Tag y algoritmos creados para este fin.

La ecuación de Tag:

$$\frac{\rho_a}{\rho^1} = 1 + 4 \sum^n K^n \left[\frac{1}{\text{Raiz}(1+2na/h1)} - \frac{1}{\text{Raiz}(4+2na/h1)} \right] \dots (1)$$

[3]: Se ha trabajado un Programa en Matlab para automatizar los cálculos

Se prosigue al análisis de 9 caracterizaciones adicionales:

Caracterización 2

Tabla 9

Lugar	Barcasa Toquepala, Southern Perú Coper Corporation
Ciudad	Moquegua
Fecha	Noviembre del 2,005

a [m]	R [Ohms]	Rho Medido [Ohms-m]	Rho Calculado [Ohms-m] Mediante Una ecuación cuadrática a0 + a1 X + a2 X^2	% Error	Rho Calculado [Ohms-m] Mediante una ecuación exponencial m X ^a	% Error
1.0	29.10	182.8	217.0	19%	242.7	33%
2.0	20.80	261.4	216.2	-17%	205.2	-22%
3.0	11.60	218.7	210.6	-4%	185.9	-15%
4.0	8.20	206.1	200.3	-3%	173.4	-16%
5.0	5.19	163.0	185.3	14%	164.3	1%
6.0	4.15	156.5	165.4	6%	157.2	0%
7.0	2.96	130.2	140.9	8%	151.4	16%
8.0	2.56	128.7	111.6	-13%	146.6	14%

Tabla 10

Experimentación	Mediante Curva cuadrática			Mediante Curva Exponencial		
	Rho_1 [Ohms-m]	Rho_2 [Ohms-m]	h1 [m]	Rho_1 [Ohms-m]	Rho_2 [Ohms-m]	h1 [m]
Según TecAt-Plus	215.9	27.2	5.71			
Según Cálculos Teóricos	217.2	109.3	1.19	217.2	128.1	1.58
Según Software En Matlap						

Caracterización 3

Tabla 11

Lugar	Compañía Cervecera AmBevPerú, Sullana
Ciudad	Piura
Fecha	Diciembre del 2,007

a [m]	R [Ohms]	Rho Medido [Ohms-m]	Rho Calculado [Ohms-m] Mediante Una ecuación cuadrática $a_0 + a_1 X + a_2 X^2$	% Error	Rho Calculado [Ohms-m] Mediante una ecuación exponencial $m X^a$	% Error
1.0	0.28	1.8	2.0	13%	1.7	-3%
2.0	0.24	3.0	2.6	-14%	2.7	-10%
3.0	0.17	3.2	3.2	1%	3.6	11%
4.0	0.15	3.8	4.0	5%	4.3	14%
5.0	0.15	4.7	4.8	1%	5.0	6%
6.0	0.15	5.7	5.6	-1%	5.6	0%
7.0	0.15	6.6	6.5	-1%	6.3	-5%
8.0	0.15	7.5	7.5	0%	6.8	-9%

Tabla 12

Experimentación	Mediante Curva cuadrática			Mediante Curva Exponencial		
	Rho_1 [Ohms-m]	Rho_2 [Ohms-m]	h1 [m]	Rho_1 [Ohms-m]	Rho_2 [Ohms-m]	h1 [m]
Según TecAt-Plus	1.6	23.6	1.86			
Según Cálculos Teóricos	1.7	6.8	0.45	1.7	7.0	0.99
Según Software En Matlap						

Caracterización 4

Tabla 13

Lugar	Desvío la Virgen Comarsa, Cia Minera San Simón
Ciudad	Trujillo
Fecha	Diciembre del 2,007

a [m]	R [Ohms]	Rho Medido [Ohms-m]	Rho Calculado [Ohms-m] Mediante Una ecuación cuadrática $a_0 + a_1 X + a_2 X^2$	% Error	Rho Calculado [Ohms-m] Mediante una ecuación exponencial $m X^a$	% Error
1.0	6,000.0	37,699.1	43,252.1	15%	52,365.0	39%
2.0	3,440.0	43,228.3	38,666.2	-11%	35,613.0	-18%
3.0	2,120.0	39,961.1	34,106.5	-15%	28,422.8	-29%
4.0	1,200.0	30,159.3	29,572.8	-2%	24,220.1	-20%
5.0	709.0	22,273.9	25,065.3	13%	21,393.1	-4%
6.0	400.0	15,079.6	20,583.9	37%	19,330.1	28%
7.0	350.0	15,393.8	16,128.6	5%	17,741.8	15%
8.0	304.0	15,280.7	11,699.4	-23%	16,471.9	8%

Tabla 14

Experimentación	Mediante Curva cuadrática			Mediante Curva Exponencial		
	Rho_1 [Ohms-m]	Rho_2 [Ohms-m]	h1 [m]	Rho_1 [Ohms-m]	Rho_2 [Ohms-m]	h1 [m]
Según TecAt-Plus	43,893.8	8,263.3	2.92			
Según Cálculos Teóricos	43,362.5	18,883.6	0.98	38,518.6	16,811.4	1.74
Según Software En Matlap						

Caracterización 5

Tabla 15

Lugar	Subestación Relaves, San Cristóbal Unidad Minera Yauli, CIA Minera Volcan
Ciudad	Junín
Fecha	Diciembre del 2,007

a [m]	R [Ohms]	Rho Medido [Ohms-m]	Rho Calculado [Ohms-m] Mediante Una ecuación cuadrática $a_0 + a_1 X + a_2 X^2$	% Error	Rho Calculado [Ohms-m] Mediante una ecuación exponencial $m X^a$	% Error
1.0	57.3	360.0	373.7	4%	384.2	7%
2.0	45.2	568.0	566.2	0%	561.8	-1%
3.0	39.7	748.3	729.3	-3%	701.7	-6%
4.0	35.0	879.6	863.0	-2%	821.6	-7%
5.0	30.8	967.6	967.3	0%	928.5	-4%
6.0	26.8	1,010.3	1,042.2	3%	1,026.1	2%
7.0	24.4	1,073.2	1,087.7	1%	1,116.5	4%
8.0	22.4	1,125.9	1,103.8	-2%	1,201.3	7%

Tabla 16

Experimentación	Mediante Curva cuadrática			Mediante Curva Exponencial		
	Rho_1	Rho_2	h1	Rho_1	Rho_2	h1
	[Ohms-m]	[Ohms-m]	[m]	[Ohms-m]	[Ohms-m]	[m]
Según TecAt-Plus	365.2	1407.8	1.11			
Según Cálculos Teóricos	322.5	980.0	0.76	322.4	1,008.0	0.73
Según Software En Matlap						

Caracterización 6

Tabla 17

Lugar	Kimberly Clarck,
Ciudad	Lima
Fecha	Diciembre del 2,007

a [m]	R [Ohms]	Rho Medido [Ohms-m]	Rho Calculado [Ohms-m] Mediante Una ecuación cuadrática $a_0 + a_1 X + a_2 X^2$	% Error	Rho Calculado [Ohms-m] Mediante una ecuación exponencial $m X^a$	% Error
1.0	11.6	72.8	66.8	-8%	78.2	7%
2.0	9.9	124.2	126.8	2%	123.8	0%
3.0	8.9	167.8	176.4	5%	161.9	-3%
4.0	8.5	212.4	215.8	2%	196.0	-8%
5.0	7.9	247.9	244.8	-1%	227.2	-8%
6.0	7.3	276.3	263.5	-5%	256.4	-7%
7.0	6.1	268.3	271.9	1%	284.0	6%
8.0	5.3	266.4	269.9	1%	310.2	16%

Tabla 18

Experimentación	Mediante Curva cuadrática			Mediante Curva Exponencial		
	Rho_1 [Ohms-m]	Rho_2 [Ohms-m]	h1 [m]	Rho_1 [Ohms-m]	Rho_2 [Ohms-m]	h1 [m]
Según TecAt-Plus	34.1	435.4	0.55			
Según Cálculos Teóricos	60.5	233.1	0.90	60.6	212.8	0.68
Según Software En Matlap						

Caracterización 7

Tabla 19

Lugar	Colegio Fe y Alegría N° 23, San Gabriel
Ciudad	Lima
Fecha	Noviembre del 2,007

a [m]	R [Ohms]	Rho Medido [Ohms-m]	Rho Calculado [Ohms-m] Mediante Una ecuación cuadrática $a_0 + a_1 X + a_2 X^2$	% Error	Rho Calculado [Ohms-m] Mediante una ecuación exponencial $m X^a$	% Error
1.0	61.0	383.5	191.0	-50%	200.7	-48%
2.0	47.0	590.7	236.8	-60%	238.9	-60%
3.0	34.0	641.6	273.1	-57%	264.5	-59%
4.0	26.1	654.7	299.6	-54%	284.3	-57%
5.0	24.5	770.6	316.6	-59%	300.7	-61%
6.0	22.4	842.6	323.9	-62%	314.8	-63%
7.0	19.1	837.9	321.5	-62%	327.2	-61%
8.0	18.3	917.8	309.5	-66%	338.4	-63%

Tabla 20

Experimentación	Mediante Curva cuadrática			Mediante Curva Exponencial		
	Rho_1 [Ohms-m]	Rho_2 [Ohms-m]	h1 [m]	Rho_1 [Ohms-m]	Rho_2 [Ohms-m]	h1 [m]
Según TecAt-Plus	302.1	987.4	0.89			
Según Cálculos Teóricos	370.0	834.7	0.53	370.1	860.8	0.78
Según Software En Matlap						

Caracterización 8

Tabla 21

Lugar	Central Hidroeléctrica Antunes de Mayolo
Ciudad	Huancavelica
Fecha	Junio del 2,006

a [m]	R [Ohms]	Rho Medido [Ohms-m]	Rho Calculado [Ohms-m] Mediante Una ecuación cuadrática $a_0 + a_1 X + a_2 X^2$	% Error	Rho Calculado [Ohms-m] Mediante una ecuación exponencial $m X^a$	% Error
1.0	30.9	194.2	191.0	-2%	200.7	3%
2.0	19.0	238.1	236.8	-1%	238.9	0%
3.0	14.4	271.2	273.1	1%	264.5	-2%
4.0	11.3	284.5	299.6	5%	284.3	0%
5.0	10.2	320.1	316.6	-1%	300.7	-6%
6.0	8.9	335.9	323.9	-4%	314.8	-6%
7.0	7.4	326.3	321.5	-1%	327.2	0%
8.0	6.0	301.6	309.5	3%	338.4	12%

Tabla 22

Experimentación	Mediante Curva cuadrática			Mediante Curva Exponencial		
	Rho_1 [Ohms-m]	Rho_2 [Ohms-m]	h1 [m]	Rho_1 [Ohms-m]	Rho_2 [Ohms-m]	h1 [m]
Según TecAt-Plus	230.8	369.5	1.80			
Según Cálculos Teóricos	181.8	311.0	0.82	181.8	299.1	0.67
Según Software En Matlap						

Caracterización 9

Tabla 23

Lugar	Casa de Retiro, Ayaviri
Ciudad	Puno
Fecha	Enero del 2,008

a [m]	R [Ohms]	Rho Medido [Ohms-m]	Rho Calculado [Ohms-m] Mediante Una ecuación cuadrática $a_0 + a_1 X + a_2 X^2$	% Error	Rho Calculado [Ohms-m] Mediante una ecuación exponencial $m X^a$	% Error
1.0	35.5	223.1	206.0	-8%	189.3	-15%
2.0	11.6	145.3	156.9	8%	143.7	-1%
3.0	5.4	101.2	119.8	18%	122.3	21%
4.0	3.4	85.7	94.6	10%	109.1	27%
5.0	3.0	95.2	81.2	-15%	99.8	5%
6.0	2.5	93.5	79.8	-15%	92.9	-1%
7.0	2.3	99.8	90.3	-10%	87.3	-13%
8.0	1.9	97.5	112.7	16%	82.8	-15%

Tabla 24

Experimentación	Mediante Curva cuadrática			Mediante Curva Exponencial		
	Rho_1 [Ohms-m]	Rho_2 [Ohms-m]	h1 [m]	Rho_1 [Ohms-m]	Rho_2 [Ohms-m]	h1 [m]
Según TecAt-Plus	323.9	90.1	0.77			
Según Cálculos Teóricos	231.7	97.4	0.55	246.3	116.0	0.52
Según Software En Matlap						

Caracterización 10

Tabla 25

Lugar	Hospital Honorio Delgado, Bustamante y Rivero
Ciudad	Arequipa
Fecha	Septiembre del 2,007

a [m]	R [Ohms]	Rho Medido [Ohms-m]	Rho Calculado [Ohms-m] Mediante Una ecuación cuadrática $a_0 + a_1 X + a_2 X^2$	% Error	Rho Calculado [Ohms-m] Mediante una ecuación exponencial $m X^a$	% Error
1.0	165.9	1,042.4	1,097.1	5%	1,900.3	82%
2.0	72.4	909.2	970.3	7%	861.6	-5%
3.0	53.1	1,000.0	833.3	-17%	542.5	-46%
4.0	32.6	819.3	686.1	-16%	390.7	-52%
5.0	14.3	449.6	528.6	18%	302.8	-33%
6.0	5.2	196.0	360.8	84%	246.0	25%
7.0	3.0	131.9	182.7	38%	206.3	56%
8.0	2.1	104.6	-5.7	-105%	177.1	69%

Tabla 26

Experimentación	Mediante Curva cuadrática			Mediante Curva Exponencial		
	Rho_1 [Ohms-m]	Rho_2 [Ohms-m]	h1 [m]	Rho_1 [Ohms-m]	Rho_2 [Ohms-m]	h1 [m]
Según TecAt-Plus	1,093.0	84.7	3.67			
Según Cálculos Teóricos	1,147.2	53.9	0.59	1,147.0	110.5	1.56

