



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

**CONSIDERACIONES TÉCNICAS Y FUNDAMENTOS
DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS
ELECTROATMOSFÉRICAS Y PULSACIONES
ELECTROMAGNÉTICAS PARA UNA RADIOBASE
CON TECNOLOGÍA DE CDMA**

Romel Enrique Fuentes Pérez

Asesorado por el Ing. Francisco Javier González López

Guatemala, febrero de 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONSIDERACIONES TÉCNICAS Y FUNDAMENTOS
DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS
ELECTROATMOSFÉRICAS Y PULSACIONES
ELECTROMAGNÉTICAS PARA UNA RADIOBASE
CON TECNOLOGÍA DE CDMA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ROMEL ENRIQUE FUENTES PÉREZ
ASESORADO POR EL INGENIERO FRANCISCO JAVIER GONZÁLEZ
LÓPEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Julio Ismael González Podszueck
EXAMINADOR	Ing. Miguel Ángel Sánchez Guerra
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
EXAMINADOR	Ing. Luis Alfonso Muralles Calderón
SECRETARIO	Ing. Francisco Javier González López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

CONSIDERACIONES TÉCNICAS Y FUNDAMENTOS DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ELECTROATMOSFÉRICAS Y PULSACIONES ELECTROMAGNÉTICAS PARA UNA RADIOBASE CON TECNOLOGÍA DE CDMA,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 29 de Septiembre de 2003.

Romel Enrique Fuentes Pérez



Guatemala, 26 de enero 2007.

Ingeniero
Coordinador Area de Electrotècnia
Escuela de Ingenieria Mecànica Elèctrica

Estimado Ingeniero:

Por este medio le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado: **Consideraciones Tècnicas y Fundamentos de Protecciòn contra descargas Electroatmosfèricas y pulsaciones electromagnèticas para una Radiobase con Tecnología de CDMA**, elaborado por el estudiante Romel Enrique Fuentes Pèrez.

El mencionado trabajo llena los requisitos para dar mi aprobaciòn, e indicarle que el autor y mi persona somos responsables por el contenido y conclusiones de la misma.

Atentamente,

Ing Francisco Javier González López
ASESOR



Guatemala, 29 de enero 2007.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: **Consideraciones Técnicas y Fundamentos de Protección contra descargas Electroatmosféricas y pulsaciones electromagnéticas para una Radiobase con Tecnología de CDMA**, desarrollado por el estudiante; Romel Enrique Fuentes Pérez, por considerar que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Francisco Javier González López
Coordinador Area de Electrotécnia



FJGL/sro



El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Romel Enrique Fuentes Pérez titulado: **Consideraciones Técnicas y Fundamentos de Protección contra descargas Electroatmosféricas y pulsaciones electromagnéticas para una Radiobase con Tecnología de CDMA**, procede a la autorización del mismo.

Ing. Mario Renato Escobedo Martínez

DIRECTOR



GUATEMALA, 29 DE ENERO 2,007.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **CONSIDERACIONES TÉCNICAS Y FUNDAMENTOS DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ELECTROATMOSFÉRICAS Y PULSACIONES ELECTROMAGNÉTICAS PARA UNA RADIOBASE CON TECNOLOGÍA DE CDMA**, presentado por el estudiante universitario **Romel Enrique Fuentes Pérez**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paiz  
DECANO

Guatemala, febrero de 2007

AGRADECIMIENTOS A:

MI ASESOR:

Ing.: Francisco Javier González López

LOS INGENIEROS:

Ing.: Miguel Angel Sánchez

Ing.: Gustavo Orozco

Ing.: Edgar Montúfar

Ing.: Renato Escobedo

Enrique Ordóñez

LOS LICENCIADOS:

Lic.: Edgardo Alvarez

Lic.: Leonel Morales

por su apoyo y sabias enseñanzas.

ACTO QUE DEDICO A:

DIOS Por su amor, ayuda, guía y misericordia.

MI MADRE

Claudia Amparo Pérez Por su incondicional amor.

MIS HIJAS

**Andrea Raquel y
Sara Emily** Dos grandes milagros en mi vida.

MI ESPOSA

Mirna Ninette Chambers Por su comprensión, esfuerzo, apoyo y cariño.

MIS AMIGOS

Que de alguna manera han enriquecido mi vida.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
RESUMEN	VII
OBJETIVOS	IX
INTRODUCCIÓN	XI

1. CONCEPTOS Y DEFINICIONES

1.1 Tecnología CDMA.....	1
1.2 Introducción a la tecnología CDMA.....	1
1.3 Descripción de partes constitutivas de una radiobase.....	2
1.4 Descripción del funcionamiento de las partes constitutivas de una radiobase.....	4
1.5 La operación CDMA según se define en los estándares ANSI 008y IS-95 ^a	5
1.6 Diagrama de bloques de una radiobase de CDMA 1900Mhz.....	6

2. DESCARGA ELECTROATMOSFÉRICA

2.1 Comportamiento eléctrico de la atmósfera.....	7
2.2 Cómo se produce la descarga electroatmosférica.....	9
2.3 Forma de propagación de una descarga electroatmosférica.....	10
2.4 Curva típica de una descarga electroatmosférica según IEEE onda 8/20.....	12
2.5 Análisis de la onda 8/20 y sus componentes en frecuencia.....	13

3. COMPONENTES TÍPICOS DE UNA ESTACIÓN RADIOBASE.....	15
3.1 Torre de sostén del sistema radiante.....	16
3.1.1 Inductancia típica de una torre metálica.....	16
3.1.2 Diagrama eléctrico.....	19
3.1.3 Consideraciones técnicas de aterrizamiento de equipo de transmisión y recepción en enlaces y cables coaxiales en torres.....	22
3.1.4 Efectos del campo magnético en conductor de bajada de una torre.....	24
3.2 Equipo electrónico de radiobase con tecnología CDMA.....	26

4. PUESTA A TIERRA Y MATERIALES

4.1 Varillas a tierra de baja inductancia.....	29
4.2 Tubos químicos como bajadas a tierra.....	30
4.3 Tipos de cables para bajada a tierra en las torres.....	31
4.4 Utilización de láminas de cobre para contrarrestar el efecto de alta impedancia debido al campo magnético de corriente a tierra.....	32
4.5 Ventajas de conexiones de tipo soldadas con respecto a conexiones tradicionales de perno roscado.....	34
4.6 Tipos de suelos.....	36
4.7 Acidez de los suelos y corrosión de los materiales de puesta a tierra	36
4.8 Medición de resistencia y resistividad del suelo.....	39
4.9 Medición de acidez del suelo y selección de tipo de material para conductores de puesta a tierra.....	43

5. PROTECCIÓN CONTRA TRANSIENTES.....	45
5.1 Definición de transientes.....	45
5.2 Supresores de transientes.....	45
5.3 Tipos de conexión de supresores de transientes.....	45
5.3.1 Conexión en serie.....	46
5.3.2 Conexión en paralelo.....	47
5.3.3 Conexión mixta.....	47
6. DISEÑO DE PROTECCIONES CONTRA DESCARGAS ELECTROATMOSFÉRICAS Y PULSACIONES ELECTROMAGNÉTICAS DE UNA RADIOBASE TÍPICA CON TECNOLOGÍA CDMA.....	49
CONCLUSIONES.....	51
RECOMENDACIONES.....	53
BIBLIOGRAFÍA.....	55

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Subsistema de estación base transceptora.....	3
2. Recintos digital, de interface y de radio.....	4
3. Interior del recinto digital de una radiobase CDMA.....	5
4. Diagrama de bloques de una radiobase de CDMA 1900Mhz.....	6
5. Superficies equipotenciales de la Tierra.....	7
6. Forma de propagación de una descarga electroatmosférica.....	11
7. Distribución de la carga eléctrica de una nube según la teoría de Simpson.....	12
8. Curva típica de una descarga electroatmosférica según IEEE onda 8/20....	12
9. Componentes típicos de una estación radiobase.....	15
10. Torre de sostén del sistema radiante.....	16
11. Cables coaxiales en una torre de sostén del sistema radiante.....	20
12. Radio enlace digital de pequeña y mediana capacidad.....	24
13. Efectos de curvas cerradas en conductores de bajada de rayos.....	25
14. Radios apropiados en conductores de bajada de rayos.....	26
15. Interior del equipo electrónico de radiobase CDMA.....	27
16. Varillas a tierra de baja inductancia.....	30
17. Tubos químicos como bajadas a tierra.....	30
18. Tipos de cables para bajada a tierra en las torres.....	31
19. Láminas de cobre para bajadas a tierra.....	33
20. Conexión típica a tierra de perno roscado.....	34
21. Conexiones del tipo soldada.....	35
22. Método de cuatro picas para medir la resistividad del suelo.....	40
23. Método de tres picas para medir una varilla o sistema a tierra.....	41

24. Curva de resistencia relativa de la tierra.....	42
25. Medición de acidez del suelo.....	43
26. Conexión en serie de supresores de transientes.....	46
27. Conexión en paralelo de supresores de transientes.....	47
28. Conexión mixta de supresores de transientes.....	48

TABLAS

I. Inductancia aproximada en microhenries para líneas coaxiales.....	19
II. Resistividad promedio de suelos.....	36
III. Tabla de metales nobles.....	39

RESUMEN

El estudiante de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica (EIME), durante muchos años, sólo ha tenido capacitación de protecciones contra descargas electroatmosféricas orientado a proteger equipos de alta, mediana o baja tensión a frecuencias nominales de red (50 o 60 Hz.). Ésto ha orientado su estudio de las protecciones y los efectos de las descargas electroatmosféricas a fenómenos propiamente resistivos, sin tomar en cuenta los efectos inductivos y capacitivos.

Con el auge de las telecomunicaciones en Guatemala y el surgimiento de compañías que brindan el servicio de telefonía celular, surgió la necesidad de proteger estos equipos de las descargas electroatmosféricas. Así también fue necesario, debido a las altas frecuencias de operación de la tecnología CDMA, analizar los efectos de las componentes de alta frecuencia de las descargas electroatmosféricas a las frecuencias de operación de esta nueva tecnología.

El presente trabajo pretende servir de guía técnica, que permita abrir nuevos caminos de análisis, y proporcione al diseñador, de las protecciones, las herramientas básicas para tomar en cuenta los efectos de las componentes de altas frecuencias del rayo.

OBJETIVOS

GENERAL

Que este trabajo de graduación sirva como un manual y guía técnica para el diseño de las protecciones contra descargas electroatmosféricas y pulsaciones electromagnéticas para una radiobase con tecnología CDMA.

ESPECÍFICOS

1. Que se conozcan las bases técnicas y científicas de las diferentes consideraciones, para el diseño de protecciones contra descargas electroatmosféricas y pulsaciones electromagnéticas para una radiobase con tecnología CDMA.
2. Con el conocimiento técnico-científico logrado con el objetivo 1), poder realizar un diseño de las protecciones específicas para cada sitio de celda, dependiendo de la ubicación y condiciones particulares del mismo.
3. Que se pueda minimizar el riesgo de falla, al aplicar un correcto diseño de protecciones.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día en Guatemala las empresas de telecomunicaciones están prestando el servicio de telefonía celular, y se ha llegado al uso tan común de este sistema que se ha tenido la necesidad de incrementar, en un período muy corto, el número de radiobases necesarias para tener la capacidad de manejo de llamadas, así como la cobertura del servicio a nivel nacional; para tener una mejor cobertura, las radiobases deben ser colocadas en lugares altos con respecto al área a cubrir y por lo mismo las torres donde se sujetan los sistemas radiantes están sujetas, por su estructura y tamaño, a estar propensas a descargas electroatmosféricas o a que las mismas caigan en la línea de alimentación de la radiobase y por lo mismo se produzcan transientes que afectan el buen funcionamiento del equipo, dejando así fuera de servicio la radiobase y a los usuarios que utilizan ésta.

La tecnología CDMA (Acceso Múltiple por División de Código) es relativamente nueva en Guatemala y, por lo mismo, no se ha tratado el tema de protección de estos equipos contra descargas electroatmosféricas y pulsaciones electromagnéticas.

La mayoría de personas que han tratado el tema de protecciones lo hacen desde el punto de vista de potencia o usan un criterio orientado a protección de subestaciones, por lo que sólo abordan el fenómeno

como un alto voltaje a frecuencia nominal de red, normalmente 60Hz o 50 Hz.

Es necesario, entonces, analizar el fenómeno de una descarga electroatmosférica y sus repercusiones en equipos que operan a altas frecuencias, dándole especial énfasis a la impedancia y no sólo a la resistencia; por supuesto, esta va a ser variable dependiendo no sólo de la resistividad del suelo, sino de las estructuras, equipos, cableado y equipo que se desea proteger.

Se espera que este trabajo de graduación supla la necesidad de un manual y guía técnica, que le permita al diseñador de protecciones de estos equipos tener las consideraciones técnicas y fundamentos necesarios para poder realizar el diseño adecuado para cada caso dependiendo de los niveles isoceráunicos del sitio, así como el tipo de suelo en que se localice la radiobase.

1. CONCEPTOS Y DEFINICIONES

1.1. Tecnología CDMA

1.2. Introducción a la Tecnología CDMA

CDMA (Code Division Multiple Acces) Acceso múltiple de división por códigos. El acceso múltiple es el uso privado simultáneo de un medio de transmisión por varios usuarios independientes. Las ventajas del acceso múltiple son:

1. dar mayor capacidad, es decir, servir a más usuarios;
2. menores requisitos de costos, ya que el tráfico se puede transportar con menor cantidad de medios;
3. menor gasto por usuario;
4. y más fácil de gestionar.¹

Cada pareja de usuarios tienen un circuito dedicado y privado a través del medio de transmisión, sin saber que existen los otros usuarios.

Entonces CDMA es una tecnología de modulación de espectro esparcido donde se definen los canales por medio de códigos matemáticos y que comparten la misma banda de frecuencias simultáneamente.

La técnica CDMA se introdujo para atender los siguientes propósitos:

1. Obtener mayor eficiencia espectral en sistemas de múltiple acceso en telefonía celular digital (más conferencias telefónicas por banda ocupada).

¹ Curso 809: Teoría de CDMA y diseño/función de productos. 2000 Nortel Networks.P1.4.

2. Posibilitar una reutilización universal de las frecuencias, facilitando la planificación de redes celulares.
3. Disminuir los efectos del desvanecimiento por propagación en varias trayectorias.
4. Traspaso ininterrumpido entre celdas.

CDMA es una tecnología de espectro extendido para comunicaciones inalámbricas. La señal modulada ocupa una banda varias veces más ancha que la banda de la señal modulante, cada comunicación ocupa la misma banda de frecuencias y el mismo tiempo que las demás, la señal modulante es una señal digital, la portadora es una larga secuencia binaria pseudo aleatoria a una velocidad binaria varias veces superior a la señal modulante, la modulación en banda base es una multiplicación de la modulante y la portadora.

1.3. Descripción de partes constitutivas de una radiobase

Es necesario, antes de conocer una radio base, conocer las partes constitutivas del sistema completo para poder ubicarnos posteriormente en la radio base que el objeto de nuestro trabajo. Así que un sistema celular digital consta de las siguientes partes:

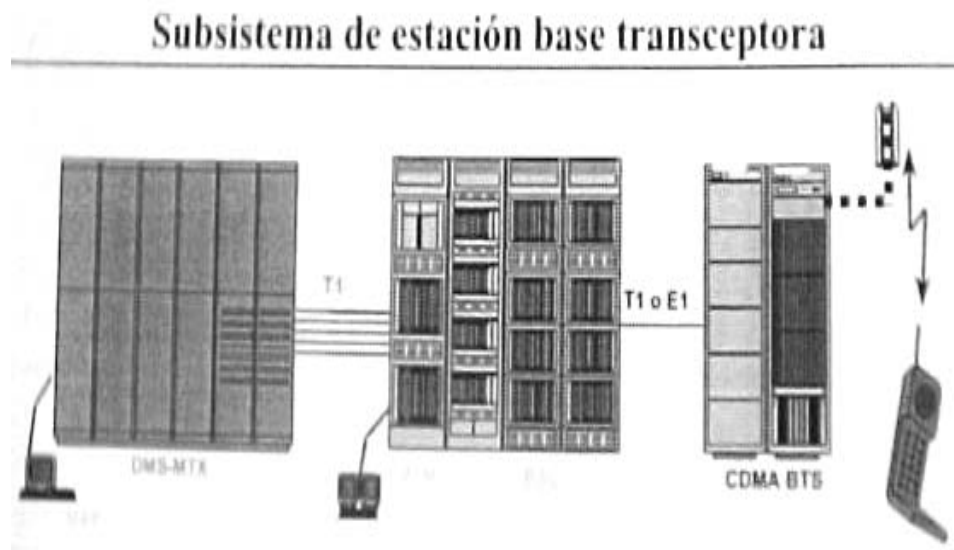
1. MTX es la central de telefonía móvil (MTX-Mobile Telephone Exchange) proporciona las funciones de procesamiento de llamadas para los sistemas celulares.
2. BSM es el gestor de estación base (BSM- Base Station Manager) proporciona una interfaz gráfica de usuario, para las operaciones, administración y mantenimiento del BSC, de las BTS y de sí mismo.
3. BSC es el controlador de estación base (BSC- Base Station Controller) proporciona enrutamiento de datos, codificación de voz y algunas funciones de traspaso entre sectores o celdas (handoff).

4. BTS es el subsistema de estación base transreceptora (BTS- Base Station Transceiver Subsystem) proporciona el enlace de radiofrecuencia hacia el abonado (teléfono celular).

El MTX, BSM y BSC constituyen la central, lo que comúnmente se conoce como Switch. La BTS es la radio base objeto de nuestro trabajo. Por lo que a continuación daremos más detalle de la misma.

La BTS incorpora las antenas, transmisores, receptores, amplificadores de potencia, unidades de temporización y frecuencia, hardware de interfaz y procesamiento de señales de canales necesarios para soportar la comunicación entre los teléfonos móviles y el conmutador de la central pública. También podemos incluir en esta la torre que soporta las antenas y equipo del sistema radiante.

Figura 1. Subsistema de estación base transreceptora



Fuente: Curso 809: Teoría de CDMA y diseño/función de productos. 2000 Nortel Networks.P2-110.

La radio base de 1900Mhz consta principalmente de dos armarios principales con contenedores digitales (DE, Digital Enclosure) un contenedor de radio (RE, Radio Enclosure) y una interfaz de contenedor digital (DEI, Digital Enclosure Interface).

1.4 Descripción del funcionamiento de las partes constitutivas de una radiobase

DE (Digital Enclosure) consta de los módulos de elementos de canales, módulos de control, módulos de recursos de configuración, módulos de temporización de sistema de posicionamiento global.

DEI (Digital Enclosure Interface) se encuentra junta al DE es la parte donde la energía externa y el cableado de señales hacen la interfaz con el subsistema.

RE (Radio Enclosure) es un armario independiente y se puede ubicar a distancia del contenedor digital DE, si se requiere; se pueden alojar hasta nueve módulos de radio flexibles (FRM) cada uno de los cuales soporta la interfaz aérea de radiofrecuencia.

Figura 2. Recinto digital, de interfase y de radio

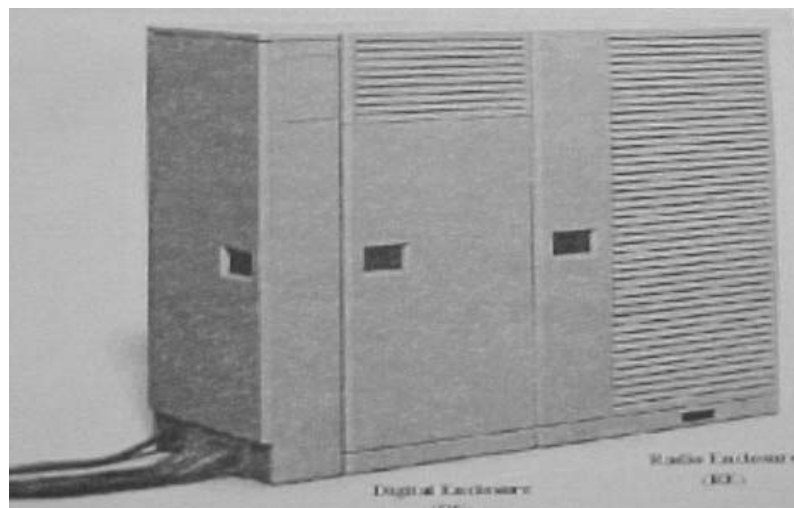
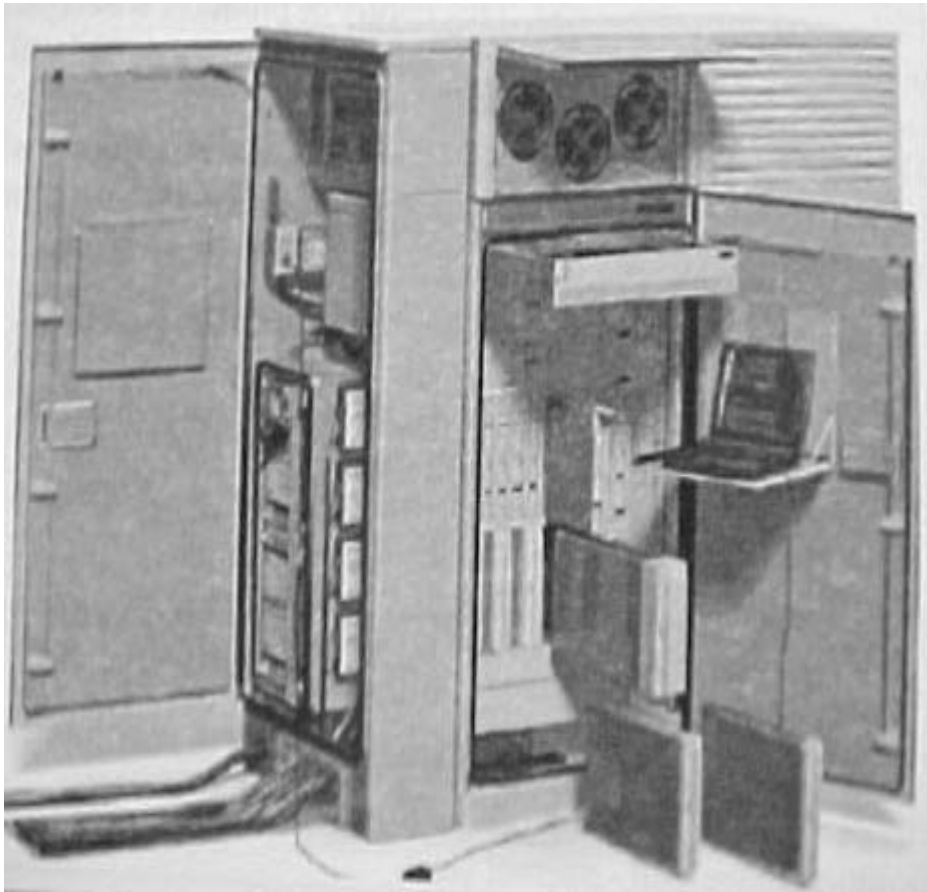


Figura 3. Interior del recinto digital de una radiobase CDMA



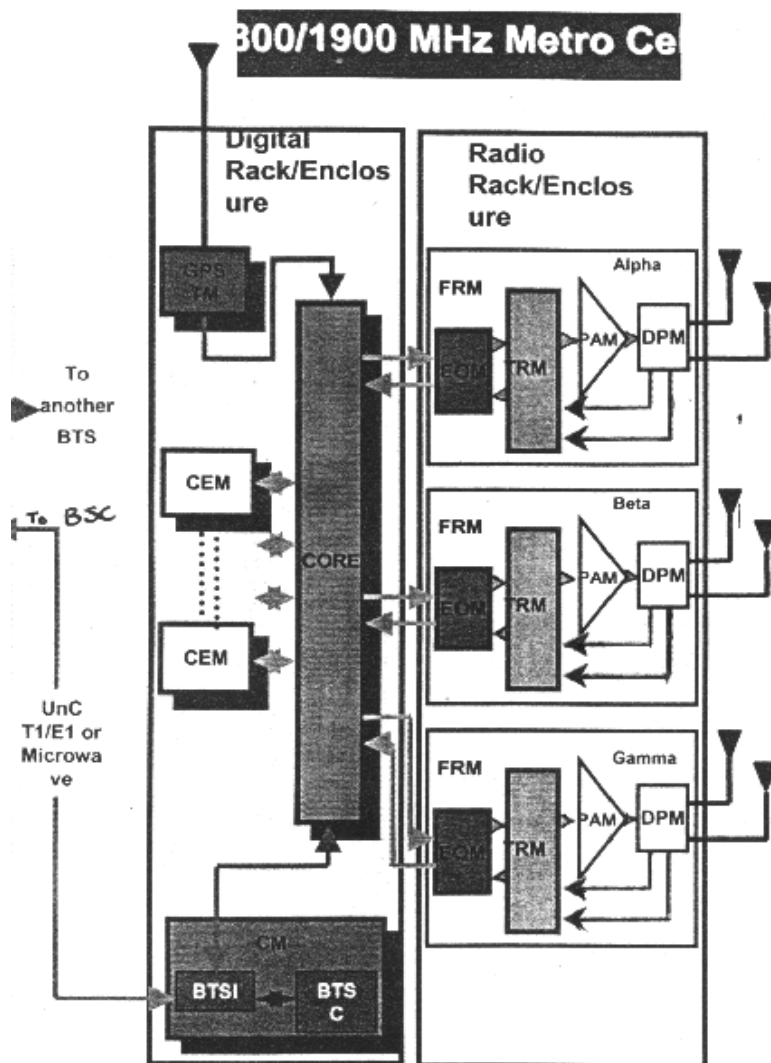
Fuente: CDMA Metro Cell Operation and Maintenance Student Guide NBSS8.1 Pag. 1-4

1.5 La operación CDMA según se define en los estándares ANSI 008 y IS-95A.

Los documentos de estándares ANSI 008 definen los requisitos de Radiofrecuencia en 1900Mhz y los IS95A corrige los defectos, y define el control de acceso de los abonados.

1.6 Diagrama de bloques de una radiobase de CDMA 1900Mhz.

Figura 4. Diagrama de bloques de una radiobase de CDMA 1900 Mhz.



Fuente: NORTHERN TELECOM Version 1.04 Wireless Networks Training and Documentation.

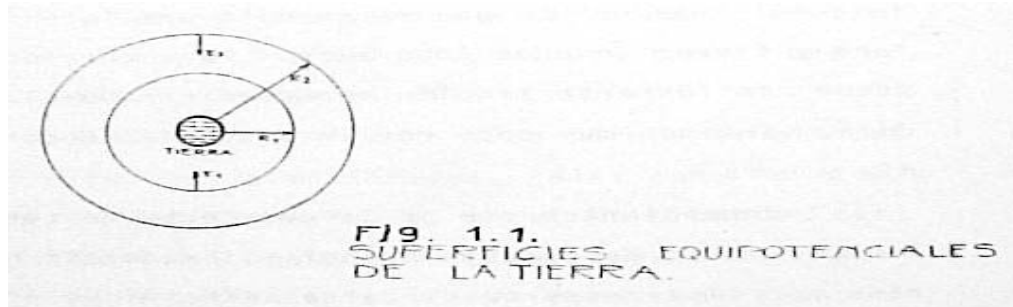
2. DESCARGA ELECTROATMOSFÉRICA

2.1. Comportamiento eléctrico de la atmósfera.

En condiciones normales de buen tiempo existe alrededor de la Tierra, en la atmósfera, un campo eléctrico permanente con superficies equipotenciales concéntricas, cuyo centro coincide con el de la tierra; por lo mismo el vector de intensidad de campo es vertical en cada punto y su sentido es tal que se dirige hacia el centro de la tierra, esto nos indica que esta posee una gran carga negativa.

Por lo tanto, las diferentes capas de la atmósfera tiene un potencial eléctrico mas positivo en la medida que se alejan del centro de la tierra, esto da lugar a que el gradiente de potencial o campo eléctrico decrezca en la misma dirección.

Figura 5. Superficies equipotenciales de la Tierra



Fuente: Protección contra descargas atmosféricas por medio de pararrayos ionizantes (Tesis).Alberto Duque Ortiz.1990
Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica. USAC.

Por la ley de Gauss tenemos que:

$$Q = \epsilon_0 \int E \cdot ds \quad \text{en donde:}$$

\int = integral cerrada

Q = carga negativa

E = campo eléctrico

ϵ_0 = permitividad eléctrica del aire

ds = diferencial de superficie

Resolviendo y tomando como área de la esfera $4\pi R^2$, en donde R = radio de la esfera, tendremos entonces que:

$$Q = \epsilon_0 E 4\pi R^2 \text{ de donde deducimos que } E = \frac{-Q}{4\pi\epsilon_0 R^2}$$

Al aumentar el radio, el campo eléctrico disminuye, por lo tanto; el potencial va haciéndose más positivo.

La existencia de este campo eléctrico, produce el movimiento de aniones hacia arriba y de cationes en dirección a la tierra, produciéndose una corriente de iones llamada corriente de conducción, que puede considerarse permanente, debido a campo que la produce.

Independiente de la corriente de conducción existe otra corriente, llamada de precipitación, que se caracteriza por el transporte de cargas por medio de las precipitaciones atmosféricas.

Estas dos corrientes, de conducción y de precipitación, por ser de mismo sentido, constantemente están aportando cargas positivas a la tierra. Debido a esto, y que la tierra es la referencia de carga negativa, se producen infinidad fenómenos compensatorios, sobre los cuales se establecen varias hipótesis, de estas podemos mencionar las siguientes:

1. Efecto Ebert: Debido a la alta temperatura del núcleo de la tierra, se escapa de éste, aire ionizado positivamente, el cual es llevado por corrientes convectivas a considerables alturas.
2. La radiación natural tanto de la tierra como del sol y las estrellas ionizan las moléculas de aire, los electrones libres originados por esta ionización, se escapan de la atmósfera, dejando en ésta una acumulación de cargas positivas.
3. Cuando las condiciones normales de buen tiempo se alteran por fenómenos atmosféricos, lluvias, nieve, granizo, etc., se producen por lo regular inversiones del campo eléctrico, lo que ocasiona la aportación de gran carga eléctrica negativa a la tierra.

2.2 Cómo se produce la descarga electroatmosférica

Existen varias teorías sobre la formación de una descarga electroatmosférica, también llamada comúnmente como rayo, de las cuales podemos mencionar las siguientes:

1. Teoría de Simpson: Las cargas eléctricas de las nubes se deben a el movimiento de aire en su interior; se dice que, las corrientes ascensionales transportan vapor húmedo el cual se condensa y produce gotas de agua que por su peso caen, en su descenso estas gotas de agua encuentran otras corrientes ascensionales que las dividen formando gotas mas pequeñas. En el proceso de división de las gotas de agua, en otras más pequeñas, se provoca la liberación de aniones que se dispersan en la atmósfera y son llevados a la parte inferior de la nube. Por lo tanto se carga la parte superior de la nube con carga positiva. Al encontrarse de esta forma polarizada la nube, entonces en la superficie terrestre próxima a ella se produce una acumulación de carga positiva, lo que da lugar a la

formación de un gran capacitor, cuyo dieléctrico es la capa de aire entre la tierra y la nube.

Al romperse el dieléctrico, o perder el aire sus propiedades de aislamiento, se produce la descarga o rayo.

2. Teoría de Elster Geitel: Se aplica un campo eléctrico de 100 v/m a una gota de agua, lo que hace que su superficie se polarice, positivamente en la parte superior y negativamente en la inferior; debido a la acción de las corrientes de aire se encuentra con otras gotas y aumenta su carga por adición; repitiéndose este proceso hasta que se tiene suficiente carga negativa para producir el rayo.
3. Teoría de Wilson: Considera que la formación de la descarga es debido al rompimiento de las gotas de agua de una tormenta, y por consiguiente, de la separación de su carga eléctrica debido a las corrientes de aire ascendentes y de la gravedad de la tierra. En el fenómeno de la lluvia las gotas hacen contacto con los iones presentes en la atmósfera, lo que aumenta la ionización lo que facilita la formación de la trayectoria del canal de rayo para descargarse a tierra.
4. Teoría de los Cristales de Hielo (teoría de Robinson y Simpson): Ha ce resaltar la importancia de la presencia de cristales de hielo en la parte superior de las nubes, los cuales al chocar permiten la disociación de cargas, quedando el aire con carga positiva y el cristal de hielo con carga negativa, lo que da lugar a la polarización en la nube que posteriormente, al romperse el aislamiento entre nube y tierra produce la descarga.

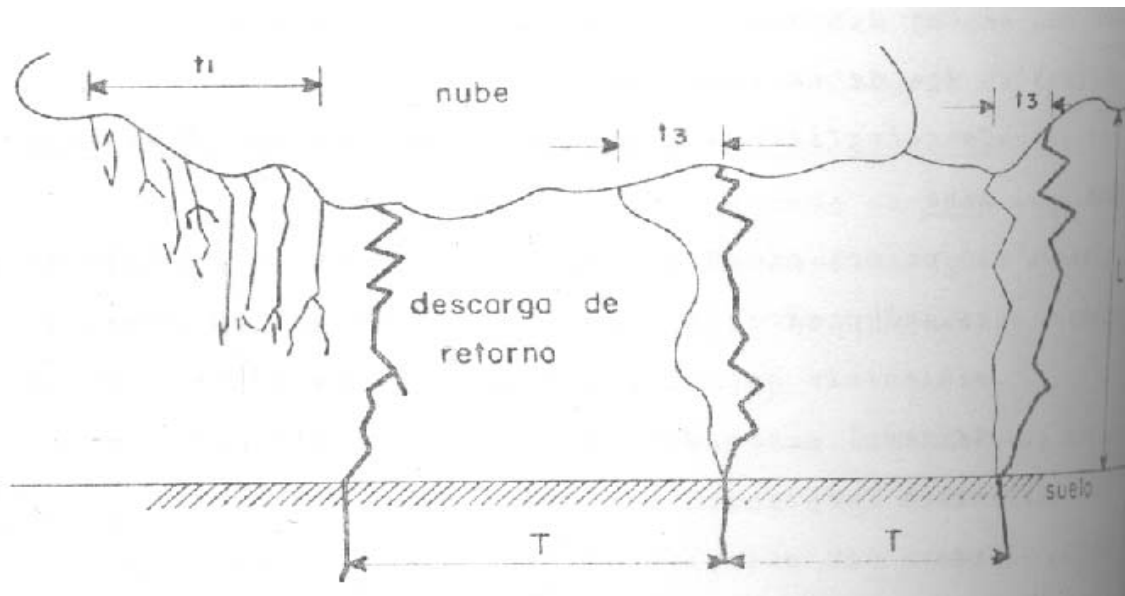
2.3 Forma de propagación de una descarga electroatmosférica

Una descarga atmosférica a tierra, se inicia con una predescarga luminiscente, la cual se propaga hacia tierra por medio de canales de descarga que pueden tener diferentes longitudes. La velocidad media de propagación de esta predescarga entre dos ondas sucesivas de $0.15 \text{ metros/ microsegundo}$.

La punta de la predescarga es una fuerte concentración de cargas en el aire, la cual crea un intenso campo electrostático, lo que origina cierto número de descargas por efecto corona en el área ionizada.

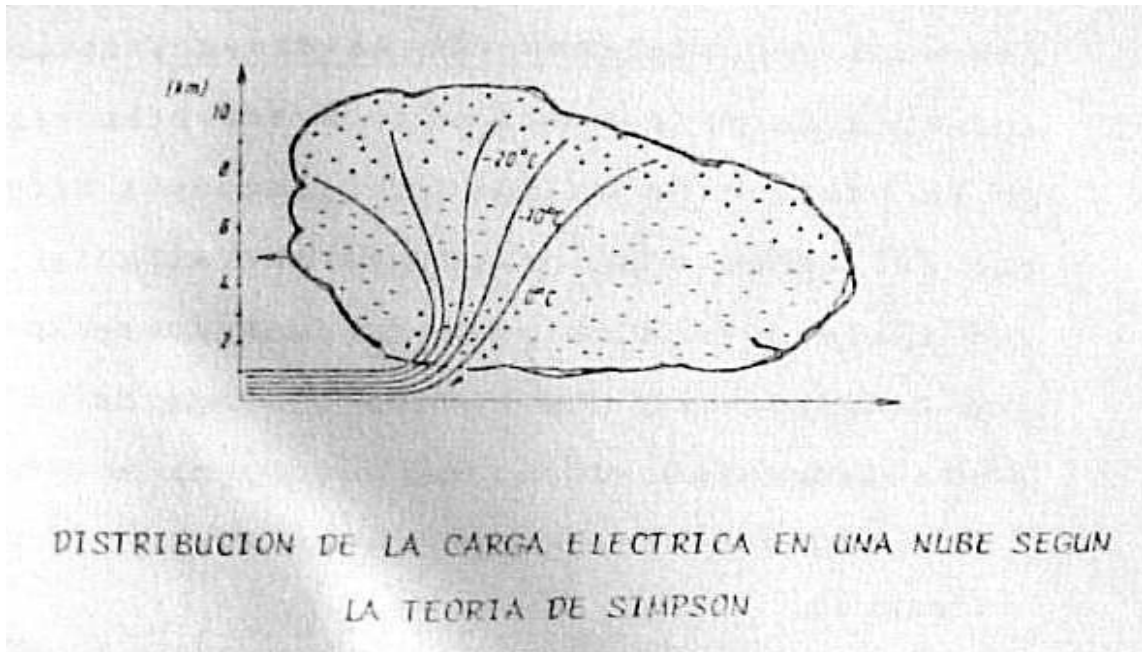
Cuando uno de los canales de descarga se aproxima al suelo, debido a que la rigidez dieléctrica del aire se está rompiendo, en el suelo se da una acumulación de cargas positivas, las que partiendo del suelo avanzan hacia arriba para encontrarse con el trazador o piloto de la predescarga; el encuentro se da a una altura de entre 15 y 20 metros del suelo aproximadamente, aquí es donde se produce el rayo, la descarga y retorno.

Figura 6. Forma de propagación de una descarga electroatmosférica



Fuente: Enriquez Harper, Gilberto. Elementos de Diseño de Subestaciones Eléctricas. Limusa.1994. Págs. 280.

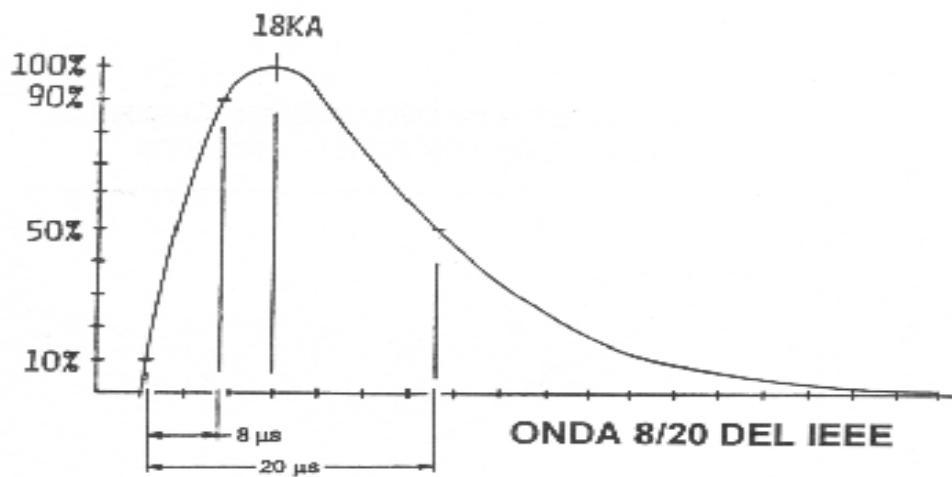
Figura 7. Distribución de la carga eléctrica en una nube según la teoría de Simpson



Fuente: Enriquez Harper, Gilberto. Elementos de Diseño de Subestaciones Eléctricas. Limusa.1994. Págs. 281.

2.4 Curva típica de una descarga electroatmosférica según IEEE onda 8/20

Figura 8. Curva típica de una descarga electroatmosférica según IEEE onda 8/20



2.5 Análisis de la onda 8/20 y sus componentes en frecuencia

La medición de la corriente de descarga se puede expresar matemáticamente como:

$$i = i_0 (e^{-at} - e^{-bt}) \quad \text{en donde}^2$$

i_0 = Valor de cresta de la corriente de rayo.

t = Instante de tiempo considerado desde el origen.

a = su valor es de alrededor de 4×10^4 .

b = su valor es de alrededor de 4×10^6 .

Aplicando transformada de Laplace tenemos que:

$I_{(s)} = I_0 (1/(s+a) - 1/(s+b))$ Aplicando a esta ecuación la transformada de Fourier

$$I_{(jw)} = I_0 (1/(jw+a) - 1/(jw+b)) = I_0 ((b-a) / (ab - w^2) + jw (a+b))$$

Haciendo las siguientes sustituciones para facilitar el trabajo algebraico:

$A = (ab - w^2)$; $B = w (a+b)$; $C = b-a$ tenemos:

$I_{(jw)} = C I_0 (1 / A + jB)$ multiplicando por su conjugado complejo $A - jB$

$I_{(jw)} = C I_0 ((A-jB)/(A^2 + B^2)) = C I_0 / (A^2 + B^2) * (A-jB)$ Sacando el modulo para tener la amplitud de la corriente en función de la frecuencia tenemos:

$$| I_{(jw)} | = (C I_0) / (A^2 + B^2)^{1/2} \quad \text{Sustituyendo por los valores de A, B y C tenemos:}$$

$$| I_{(jw)} | = ((b-a) I_0) / ((w^4 + w^2 a^2 b^2 + a^2 b^2)^{1/2})$$

² Enríquez Harper, Gilberto. Elementos de Diseño de Subestaciones Eléctricas. Limusa.1994. Pp. 283

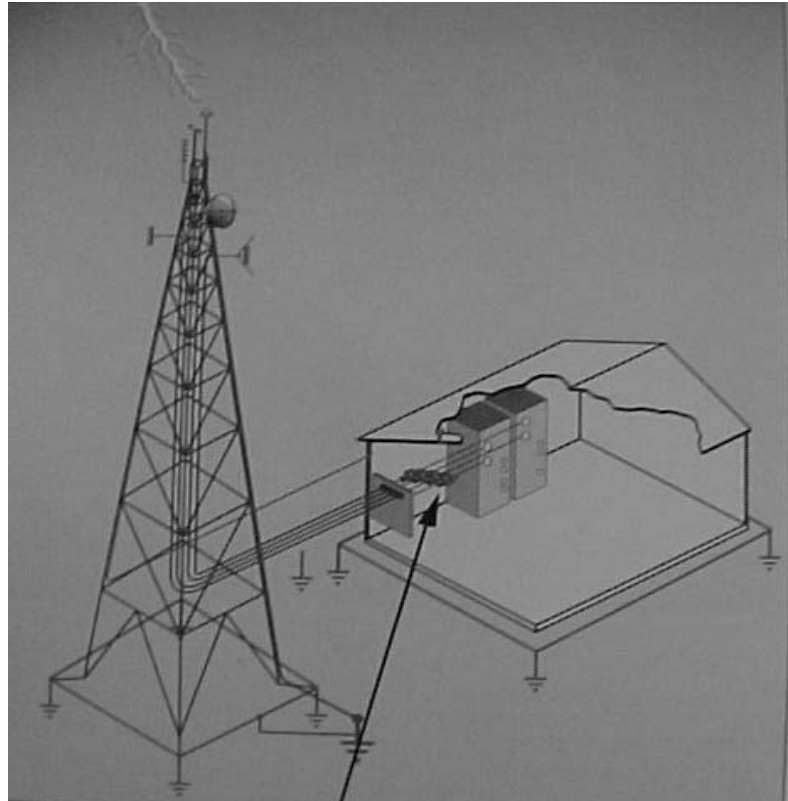
Dado que $\omega = 2\pi f$ entonces cuando $\omega \rightarrow 0$ también $f \rightarrow 0$ valuando tendremos:

$$|I_{(j\omega)}| = ((b-a) I_0) / ((a^2 + b^2)^{1/2}) = ((b-a) I_0) / (a + b) = ((b-a) / (a + b)) I_0$$

Siendo este el valor de la componente de corriente directa de la descarga.

3. COMPONENTES TÍPICOS DE UNA ESTACIÓN RADIOBASE

Figura 9. Componentes típicos de una estación radiobase



Fuente: ERICO.Facility Electrical Protection Solutions.1998. Pp. 29.

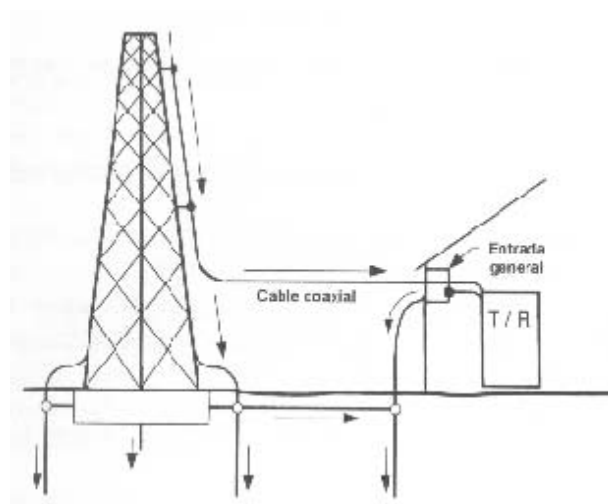
Como podemos observar en la gráfica anterior, una radiobase típica está compuesta principalmente por: la torre de sostén del sistema radiante, en donde se encuentran sostenidas las antenas tanto de transmisión como de recepción, los enlaces en el caso que fuera por microondas y las guías de ondas (cables coaxiales). La caseta de (equipo de radio enlace, aire acondicionado, moto generador, que no se muestran en esta gráfica pero que generalmente se encuentra dentro de la caseta.) equipo electrónico.

Y la BTS en sí o equipo electrónico de radio base con tecnología CDMA.

3.1 Torre de sostén del sistema radiante

La torre de sostén generalmente es una estructura metálica, que puede ser auto soportada o con cables de retención. En nuestro medio sólo se utilizan del tipo auto soportado, por lo que nuestro análisis se basará en este tipo de torre.

Figura 10. Torre de sostén del sistema radiante



3.1.1 Inductancia típica de una torre metálica

Dado que los rayos alcanzan con mayor frecuencia a las torres, porque estas son más altas que cualquier otra estructura alrededor de la estación de la radio base, y además, esta estructura metálica es un buen conductor. Normalmente la resistencia eléctrica de una torre es cercana a cero, sólo son considerables los valores de las uniones entre segmentos que oscilan alrededor de 0.001 ohms, tomando en cuenta una torre de 150 pies, que tiene divisiones cada 18 pies aproximadamente, tendremos una resistencia aproximada de 0.008 ohms, al presentarse una descarga de 18 kiloamperios, se produciría una diferencia de potencial de $V = IR = 18,000$

X 0.008 = 144 Voltios potencial no considerado dañino por su bajo valor. Si analizamos esta misma estructura desde el punto de vista de impedancia podremos ver que existen en el momento de la descarga otros voltajes, especialmente por el efecto inductivo, dado que la estructura metálica es un conductor.

Para calcular la inductancia de una torre metálica podemos utilizar la relación $W/H < 1\%$ donde W= ancho y H= altura; si se considera a la torre como una antena de $\frac{1}{4}$ de onda, así tendríamos que:

$$f = \frac{468 \times 10^6}{2 (H \text{ en pies})}$$

y la inductancia $L = \frac{377}{2\pi f}$

Una torre típica (estructura metálica auto soportada), de 150 pies de alto con costados de aproximadamente 40 pulgadas; tiene una inductancia aproximada de $40\mu\text{H}$; esto nos puede dar una idea de la diferencia de potencial de la punta de la torre a tierra, si tomamos el estándar de IEEE tendríamos lo siguiente, durante los primeros 8μ segundos:

$$E = L \delta i / \delta t = 40 \times 10^{-6} \text{ H } (18 \times 10^3 \text{ A} / 8 \times 10^{-6} \text{ seg.}) = 90 \times 10^3 \text{ Voltios}$$

Esto nos indica que durante los primeros 8μ segundos del impacto del rayo se inducirá en una torre típica un voltaje de 90,000 Voltios, sólo por el efecto inductivo de la torre. Comparando este voltaje inductivo con el resistivo de 144 voltios podemos darnos cuenta que el efecto inductivo de la torre es el que produce el potencial más elevado durante un rayo y el que puede ocasionarnos más daños a nuestro equipo que el voltaje por efecto resistivo, de allí que la mayoría de diseñadores, sólo se preocupan por encontrar un camino, para la corriente de rayo, que sea el de menor resistencia; ya que no toman en cuenta el efecto inductivo.

Una diferencia de potencial de esta magnitud puede dañar a los equipos y al personal, por lo tanto es necesario hacer un estudio de los efectos de la impedancia de todo el sistema, en el momento de la descarga electro atmosférica. Es necesario además hacer un estudio en frecuencia de la onda estándar del IEEE, para determinar los efectos nocivos de las componentes a frecuencias similares a la de transmisión a la cual resuenan los equipos, para nuestro caso la tecnología CDMA, y así poder reducir los riesgos o daños a los mismos.

Además es necesario determinar la impedancia total de la torre de sostén del sistema radiante, analizándolo en conjunto con los cables coaxiales de transmisión y recepción, cables de bajada de pararrayos, etc. Debe tomarse en cuenta también las frecuencias de las componentes de la onda 8/20 de IEEE a las cuales se transmite y recibe información, esto para determinar el voltaje inducido en el momento de la descarga y buscar la mejor manera de drenar este a tierra. Así también para realizar el circuito equivalente y determinar el valor de la inductancia de la torre a estas frecuencias.

CDMA (Code División Múltiple Access) es una técnica de acceso múltiple por división de códigos, es decir; es un uso privado simultáneo de un medio de transmisión por múltiples usuarios independientes a los que se les asignan un código para poder establecer la comunicación. CDMA es una tecnología de modulación de espectro esparcido donde se definen los canales por medio de códigos matemáticos y que comparten la misma banda de frecuencias simultáneamente.

El espectro de PCS es de 1900 MHz. La conversación bidireccional simultánea requiere trayectos de voz en ambas direcciones, se usa banda de frecuencias de 60 MHz (1850 a 1910 MHz) para transmisión de teléfono móvil (uplink) y también banda de 60 MHz (1930 a 1990 MHz.) para transmisión de estación base celular (downlink).

El espectro se divide en bloques, A y B, para uso en las área principales de comercialización; los cuales tienen 30 MHz de espectro (15 MHz en ambas direcciones)

Podemos entonces establecer el rango de frecuencias en las que estos equipos operan y por lo tanto a las frecuencias a las que resuenan o permiten la máxima transferencia de potencia. Por lo mismo es necesario analizar los componentes a estas frecuencias de la onda de descarga y determinar la intensidad de los mismos y si la potencia que portan no es dañina para los equipos; de lo contrario es necesario entonces diseñar un camino de menor impedancia para dichos componentes a estas frecuencias, y minimizar los riesgos de daño para dichos equipos.

3.1.2 Diagrama eléctrico

Dado que es necesario establecer un circuito de referencia para hacer nuestro análisis, mostraremos a continuación algunas formas para calcular la inductancia para cables de cobre, así como una tabla de referencia para inductancias de cables coaxiales en función de su diámetro y su longitud.

Tabla I. Inductancia aproximada en microhenries para líneas coaxiales

		Diámetro de las líneas coaxiales					
		½"	7/8"	1-1/4"	1-5/8"	2"	3"
Longitud en pies	100	51.0	48.0	45.7	44.2	43.0	40.4
	150	81.0	76.0	72.3	70.0	68.0	64.3
	200	111.0	104.0	100.0	97.0	94.2	89.2
	300	174.0	164.0	157.3	152.5	148.7	141.2
	500	306.0	289.0	277.8	270.0	263.4	251.0

Para calcular la inductancia de un alambre use la siguiente fórmula:

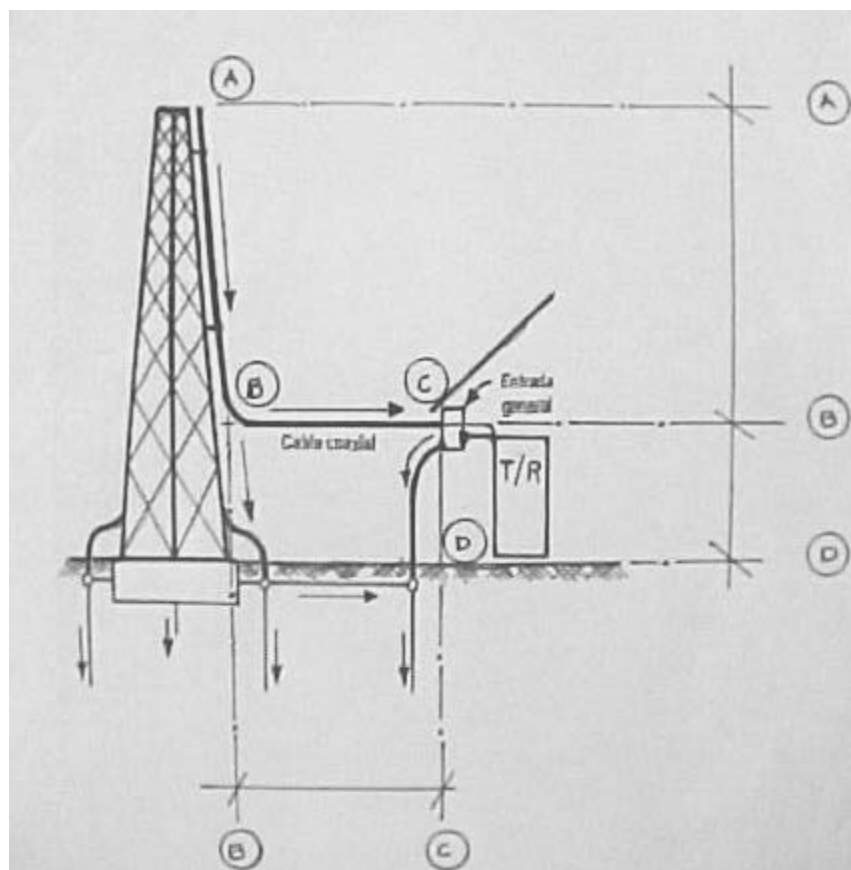
$$L = 0.508 s [2.303 \log_{10}(4 s / d) - 0.75] \times 10^{-2} \mu\text{H.}$$

En donde:

s = longitud en pulgadas

d = diámetro en pulgadas

Figura 11. Cables coaxiales en una torre de sostén del sistema radiante



Si tomamos en consideración nuestra torre de 150 pies, y tres cables coaxiales de 1-5/8", uno para cada sector; y además, consideramos que la mayoría hace la introducción de los coaxiales hacia la caseta, a una altura de aproximadamente 10 pies; tendríamos una inductancia de coaxiales así:

Utilizando la tabla anterior

150 pies : 70 μ H :: 140 : L_{AB} entonces $L_{AB} = 65.33 \mu$ H

para cada cable, dado que son tres cables que están en paralelo

$$L_{AB} = [(1/65.33) + (1/65.33) + (1/65.33)]^{-1} \text{ entonces } L_{AB} = 21.777 \mu\text{H}$$

para los primeros 140 pies de tres cables coaxiales en paralelo.

Si las líneas coaxiales se separaran de la torre 15 pies para llegar al equipo y se aterrizaran a una placa de tierras, debemos entonces calcular la inductancia para este trayecto sumando $0.15\mu\text{H}$ aproximadamente por dobléz a 90° y el mismo valor de inductancia por conexión a barra de tierras.

Entonces tendremos:

$150 \text{ pies} : 70\mu\text{H} :: 15 : L_{BC}$ $L_{BC} = 7\mu\text{H}$ dado que nuevamente estos tres coaxiales están en paralelo tendremos $L_{BC} = [(1/7) + (1/7) + (1/7)]^{-1} = 2.333\mu\text{H}$ ahora debemos sumarles $0.30\mu\text{H}$ por la impedancia del dobléz y conexión a tierra tenemos $L_{BC} = 2.633\mu\text{H}$ para el trayecto de la torre hacia la caseta.

Nótese que en este punto de entrada de los coaxiales hacia la caseta, regularmente se encuentra la barra de tierras, de la cual sale un conductor o varios hacia la Tierra; calculando la inductancia de este conductor a tierra, haciendo uso de la fórmula anterior, tenemos:

$$L_{BD} = 0.508 \text{ s} [2.303 \log_{10}(4 \text{ s} / d) - 0.75] \times 10^{-2} \mu\text{H}.$$

$$L_{BD} = 0.508 (100) [2.303 \log_{10}(4(100) / 0.5) - 0.75] \times 10^{-2} \mu\text{H}.$$

$$L_{BD} = 50.8 [2.303 (2) - 0.75] \times 10^{-2} \mu\text{H}.$$

$$L_{BD} = 50.8 [2.303 (2) - 0.75] \times 10^{-2} \mu\text{H} = 195.8848 \times 10^{-2} \mu\text{H}$$

$$L_{BD} = 1.96 \mu\text{H}.$$

Dado que la resistencia de la torre de 150 pies es de aproximadamente 0.008Ω podemos calcular las resistencias en cada tramo que consideramos anteriormente en las inductancias:

$$150 \text{ pies} : 0.008\Omega :: 140 : R_{AB} \Rightarrow R_{AB} = (140 \times 0.008) / 150$$

$$R_{AB} = 7.467 \times 10^{-3}\Omega.$$

Por sustracción podemos calcular que $R_{BD} = 5.33 \times 10^{-4}\Omega$.

3.1.3 Consideraciones técnicas de aterrizamiento de equipo de transmisión y recepción en enlaces y cables coaxiales en torres

Un sistema digital de radio enlace de punto a punto de pequeña y de mediana capacidad, permite la transmisión con n afluentes de 2Mbit/s ($1 \leq n \leq 16$) o 1 afluente de 34 Mbit/s; de canales de servicio y de señales de tele señalización y de control remoto.

Estos equipos normalmente cubre la banda de frecuencias entre 7.1 y 8.5 GHz. Consta de:

1. Bloques de mando de Unidad Indoor (IDU)
2. Bloques de radio de Unidad Outdoor (ODU)
3. Bloque de conexión de una o más unidades ODU.

Las unidades IDU son compactas y aseguran la interfaz con las diferentes señales de entrada y salida, así como las funciones de supervisión con el sistema de gestión de la red.

Para nuestros propósitos es suficiente con saber que existe una conexión cable IDU/ODU que va de la caseta hasta la altura en la torre a la que esté colocada la antena del radio enlace. Un cable coaxial de una impedancia de 50Ω , conecta la IDU con la ODU, el cual debe transportar:

1. Los trenes de datos digitales que se transmiten en el sentido IDU→ODU y viceversa.
2. La tensión continua de alimentación primaria de la ODU.

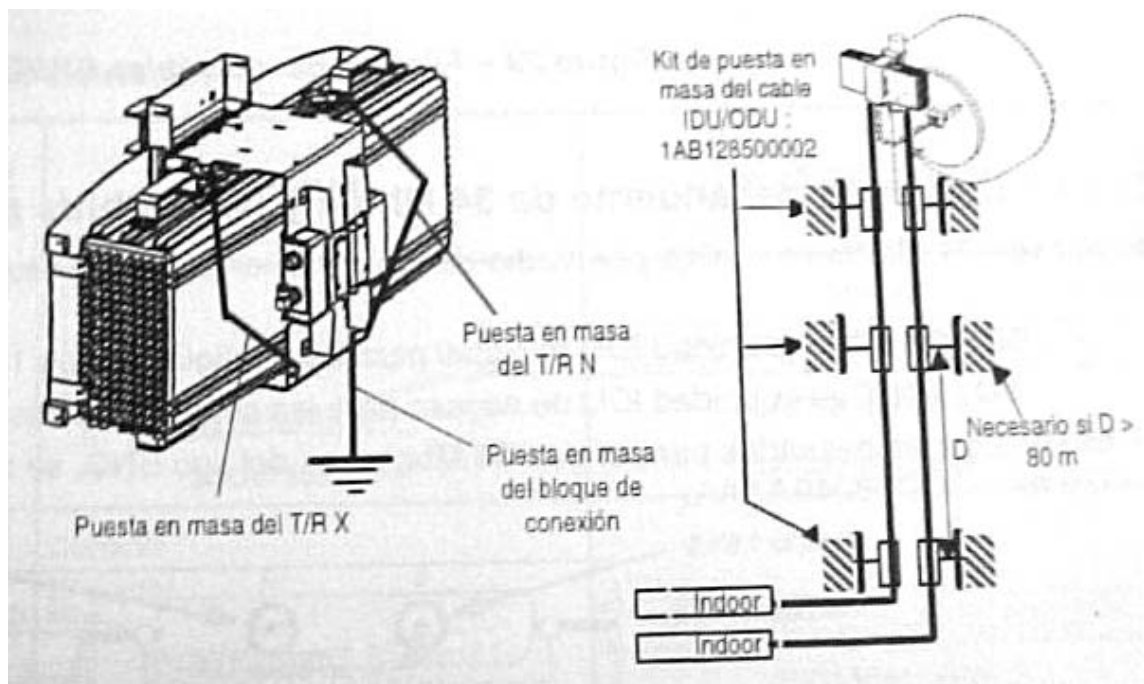
La puesta a tierra de estos equipos debe hacerse en tres partes distintas:

1. La unidad Indoor,
2. La unidad Outdoor,
3. El bloque de conexión IDU/ODU.

Normalmente las unidades Indoor y Outdoor traen en la parte posterior de las mismas un borne roscado señalado para conectar a tierra.

El bloque de conexión debe ser aterrizado en lo alto en la torre, así como en la parte baja, lo más próximo que se pueda de la Indoor; si la distancia a la mitad entre los dos puntos de conexión a tierra es mayor que 80 metros debe hacerse una conexión adicional intermedia como se muestra en la siguiente gráfica:

Figura 12. Radio enlace digital de pequeña y mediana capacidad

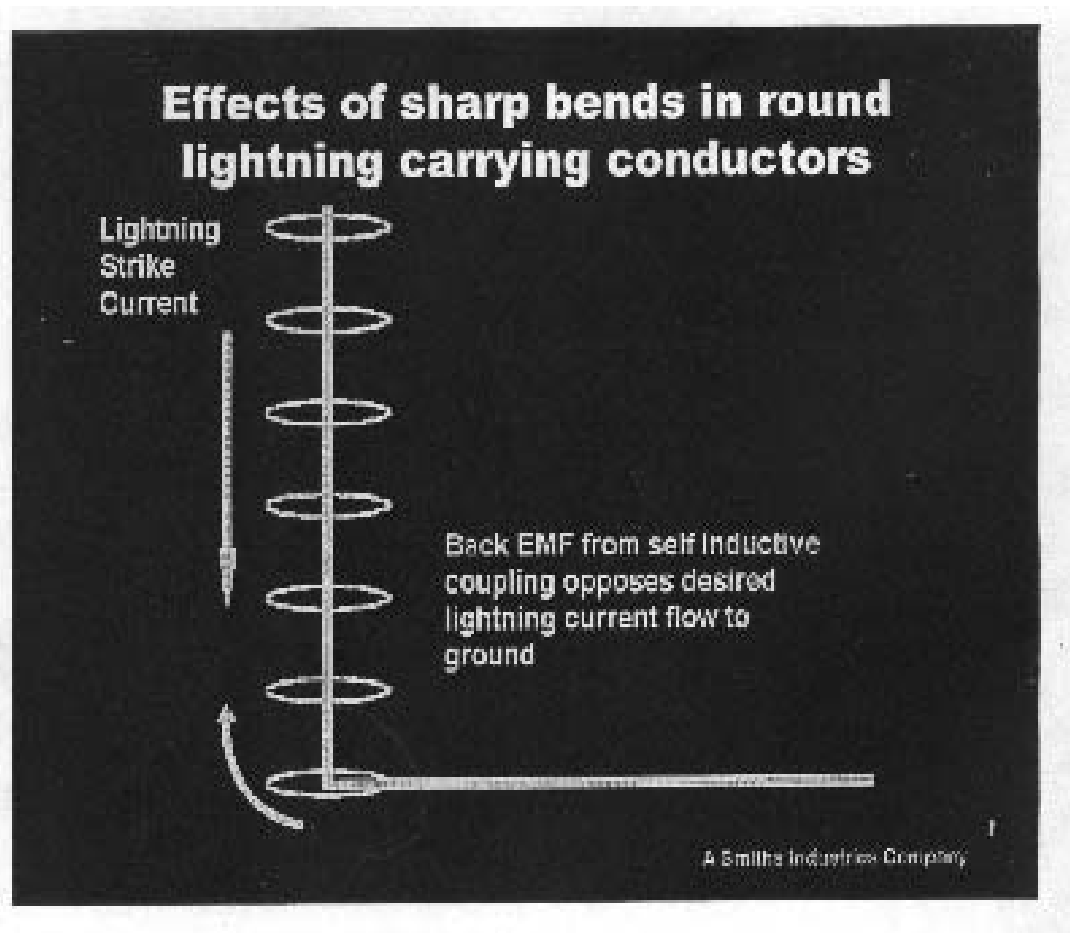


Fuente: ALCATEL. Radio enlace digital de Pequeña y Mediana Capacidad. Manual de Usuario. Pp.61.

3.1.4 Efectos del campo magnético en conductor de bajada de una torre

Normalmente los conductores de bajada utilizados en las torres de comunicaciones son cilíndricos de varios hilos, es importante poner atención en las líneas de campo magnético que se formarán alrededor de éste, en el momento en que la corriente de descarga viene bajando a través de él. Como vemos en la gráfica los cruces a 90° pueden provocar una corriente inversa en el conductor, lo que se traduce en una alta impedancia en el punto del cruce a 90° . Esta corriente inversa se produce al cortar la línea de campo magnética de forma transversal el área del conductor.

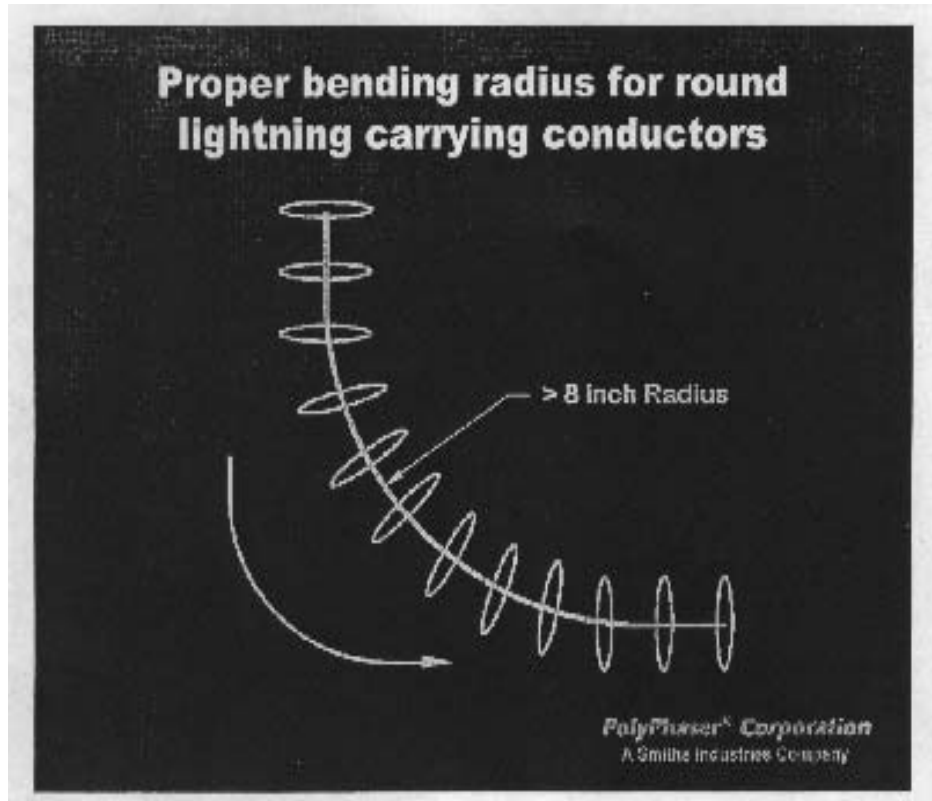
Figura 13. Efectos de curvas cerradas en conductores de bajada de rayos



Fuente: Lightning Protection Course for Communications Sites. PolyPhaser Corporation. 1999. Pp.14.

Para evitar este problema es necesario que los cruces a 90° tengan una curvatura de radio no menor de 8" como se puede ver en la gráfica siguiente:

Figura 14. Radios apropiados en conductores de bajada de rayos

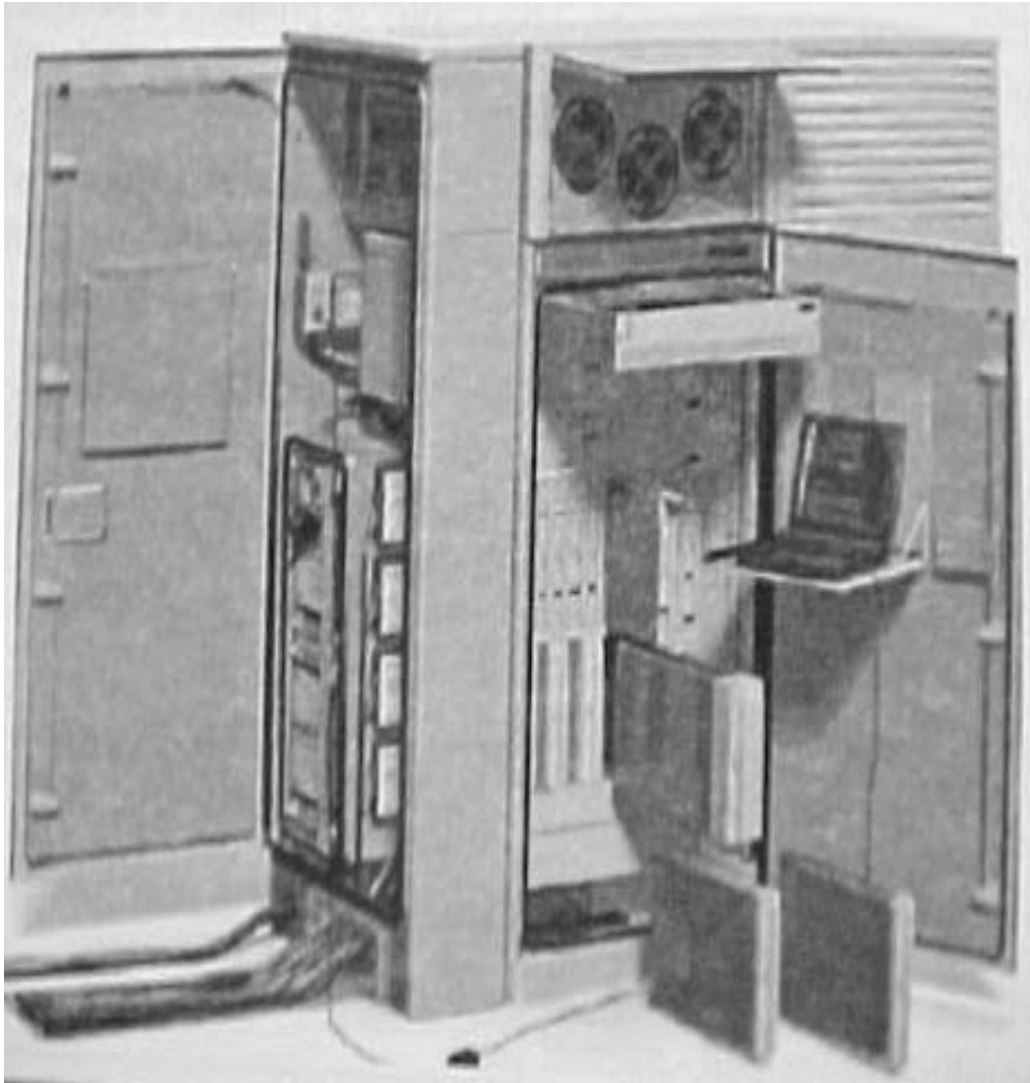


Fuente: Lightning Protection Course for Communications Sites. PolyPhaser Corporation. 1999. Pp.15.

3.2 Equipo electrónico de radiobase con tecnología CDMA

Las dos unidades, RE (radio enclosure) y DE (digital enclosure) pueden ser de uso a la intemperie o de uso interno, en la gráfica siguiente se muestra la de uso externo. En la parte izquierda se encuentra la entrada de los cables coaxiales y de alimentación de AC, en esta misma parte también se encuentra la pletina de tierras, a la cual van conectados todos los equipos electrónicos de los módulos de radio y modulo digital.

Figura 15. Interior del equipo electrónico de radiobase CDMA



4. PUESTA A TIERRA Y MATERIALES

4.1 Varillas a tierra de baja inductancia

La impedancia a la corriente de rayo a través del electrodo a tierra puede tener tres componentes:

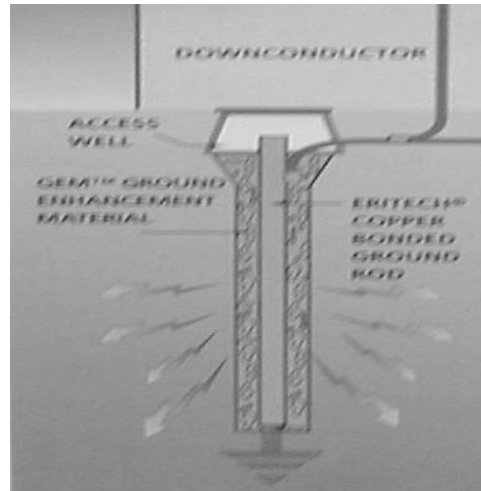
1. Impedancia de contacto entre el electrodo y el suelo junto a él.
2. Impedancia propia del electrodo y la ocasionada por las conexiones a él.
3. Impedancia de la tierra alrededor.

La primera puede despreciarse si el electrodo está libre de grasa o pintura; la impedancia propia del electrodo es la que menos contribuye, pues los electrodos han sido diseñados para tener una impedancia muy pequeña, pero es necesario que se tome en cuenta el efecto que podría ocasionar las conexiones a él; pues las conexiones de diferentes metales, los espacios que quedan entre el perno roscado y la varilla, menor área de contacto entre conector y varilla, etc. pueden ocasionar que aumente la impedancia en forma significativa.

La impedancia de la tierra alrededor del electrodo de puesta a tierra, es la más significativa, por lo que es importante tenerle un cuidado especial, los factores que pueden afectar la resistividad de un suelo son: el tipo de suelo, contenido de humedad, compactación del suelo, etc.

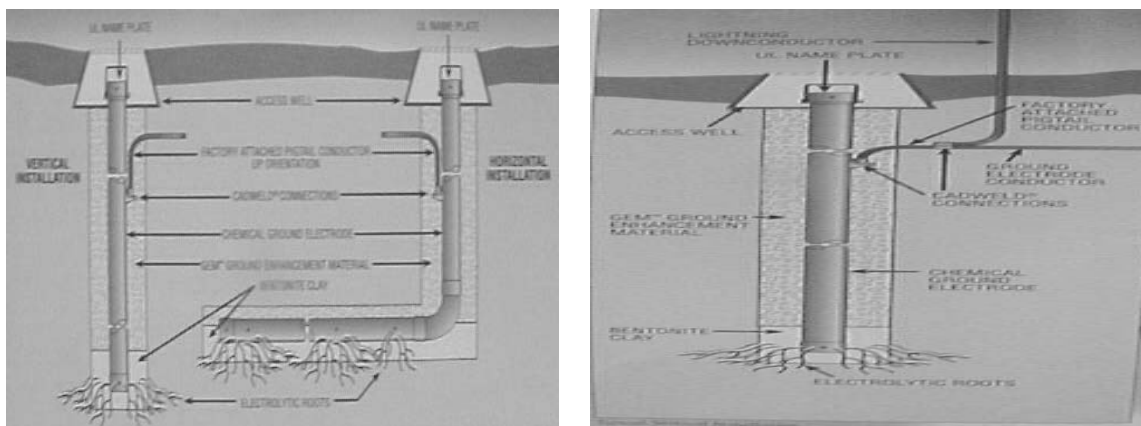
Por su maniobrabilidad, fácil montaje y transportación, bajo costo, etc. la varilla de acero recubierta de cobre es la más utilizada

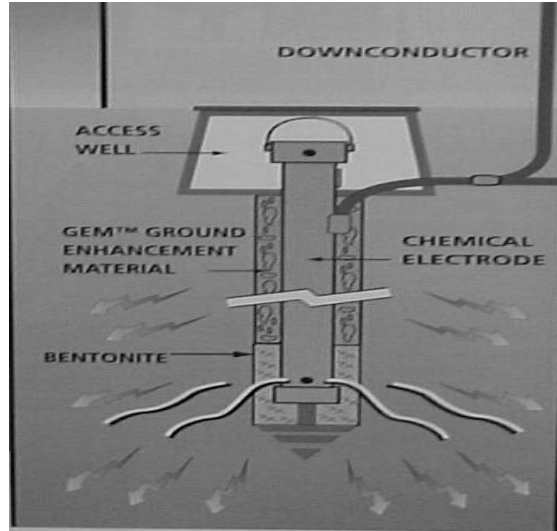
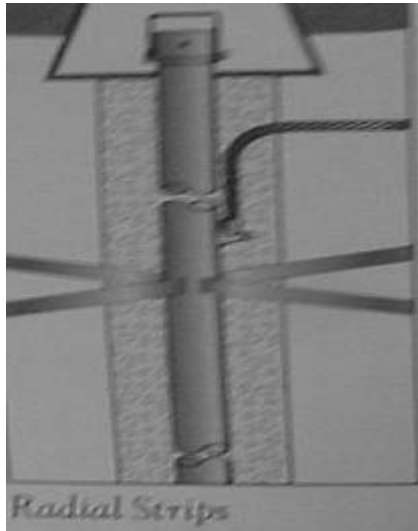
Figura 16. Varillas a tierra de baja inductancia



4.2 Tubos químicos como bajadas a tierra

Figura 17. Tubos químicos como bajadas a tierra

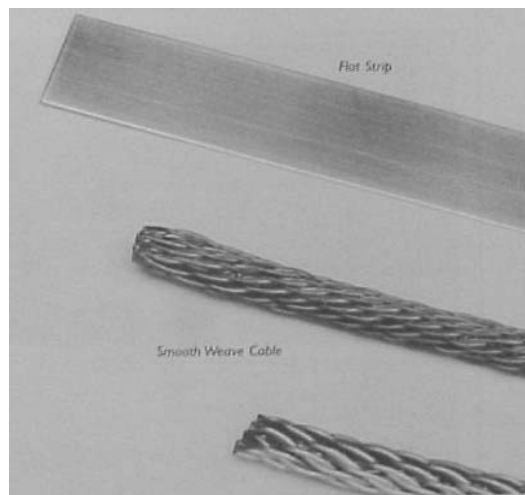




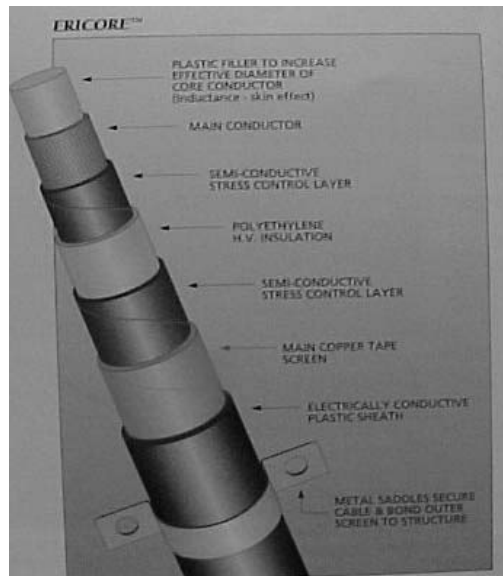
4.3 Tipos de cables para bajada a tierra en las torres

Los hay de diferentes formas y tamaños, pero es importante que se tome en cuenta la impedancia del conductor de bajada. Es muy importante además, tomar en consideración los problemas de capacidad de conducción por efecto piel.

Figura 18. Tipos de cables para bajada a tierra en las torres



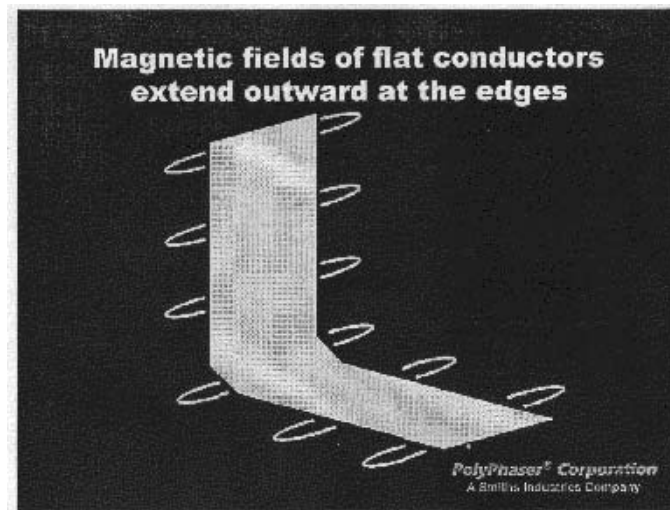
ERICO® fabrica un conductor de bajada ERICORE® del cual mostramos una fotografía a continuación:



4.4 Utilización de láminas de cobre para contrarrestar el efecto de alta impedancia debido a campo magnético de corriente a tierra

Como se estudio en el punto 3.1.4 es necesario tener una curvatura mínima de 8” de radio en los conductores de bajada, en las partes donde esto no sea posible por espacio se recomienda usar láminas de cobre con las cuales la curvatura se puede minimizar debido a su pequeña sección transversal, como puede verse en la siguiente gráfica:

Figura 19. Láminas de cobre para bajadas a tierra



Fuente: Lightning Protection Course for Communications Sites. PolyPhaser Corporation. 1999. Pp.16.

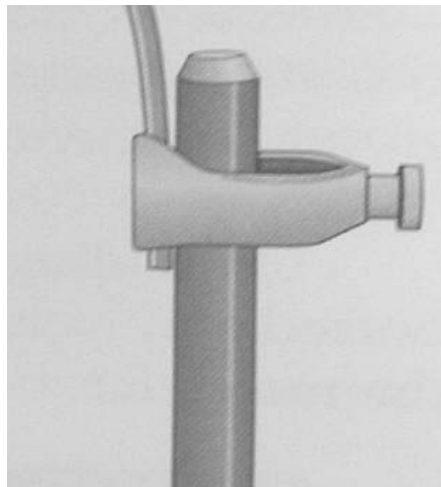
La mayor parte de la energía de un rayo es DC, pero siempre hay componentes en RF, por lo que debemos tomar en cuenta lo siguiente:

1. Aunque la mayoría de la energía es DC, el pulso con una pendiente rápida de tiempo, de 2 a $8\mu\text{s}$, genera una significativa energía de RF.
2. La energía de RF es radiada y la componente de campo magnético puede acoplarse con los conductores próximos.
3. Debido a la existencia de una significativa componente de RF, la energía viaja en la superficie del conductor, por efecto piel, y la capacidad de conducción del mismo disminuye.
4. No doble cualquier conductor de bajada de corriente de rayo a un radio menor de 8".
5. Gran área superficial de un conductor, tal como la de una lámina, puede ser el mejor conductor para una corriente de rayo.

4.5 Ventajas de conexiones de tipo soldadas con respecto a conexiones tradicionales de perno roscado

Como puede verse en la gráfica siguiente, las conexiones tradicionales de perno roscado (de chuchos) tienen las siguientes desventajas:

Figura 20. Conexión típica a tierra de perno roscado



1. Diferencia del diámetro entre conductor y varilla o conductor y conductor según sea el caso.
2. La base del perno roscado y la tuerca no tienen la forma del conductor ni de la varilla.
3. Debido a la forma de la varilla y del conductor existe menor superficie de contacto entre ellos.
4. Algunas veces el metal del perno roscado no es del mismo que de la varilla o conductor, lo que puede ocasionar desgaste del material menos noble.
5. El torque al que debe ir ajustada la tuerca, puede sufrir variaciones por efectos mecánicos y aflojarse la conexión ocasionando falsos contactos.

Estas desventajas pueden superarse utilizando conexiones soldadas, como puede verse en las gráficas siguientes:

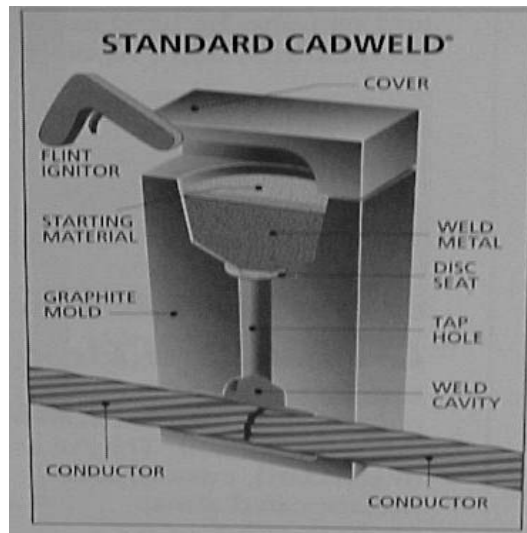
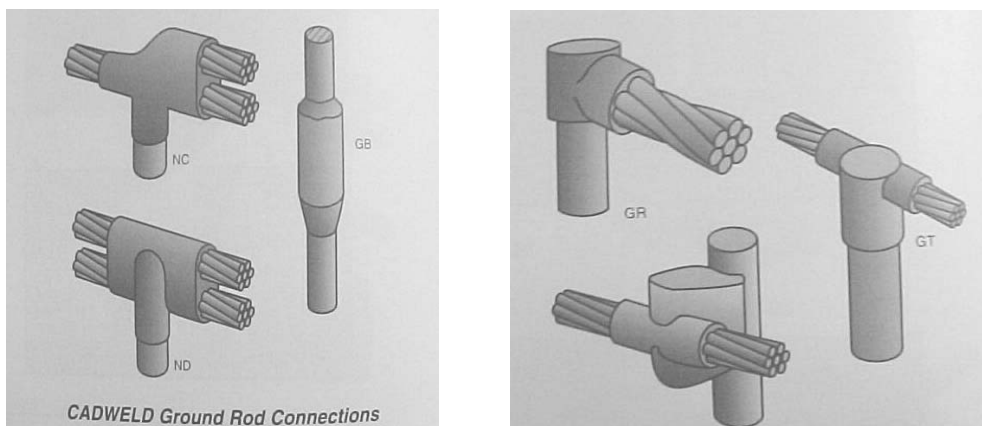


Figura 21. Conexiones del tipo soldada



Además provee las siguientes ventajas:

1. Puede soportar mayor corriente que los propios conductores.
2. No se deteriora con el tiempo tan fácilmente.

3. Provee una mejor unión molecular del elemento de aporte de la soldadura con los conductores o varilla, lo que nos da una mejor conducción y mejor resistencia mecánica.
4. Pueden ser revisadas fácilmente con una inspección visual.
5. Estas conexiones soldadas permiten baja impedancia permanente y mayor ampacidad.

4.6 Tipos de suelos

Además de las mediciones con el telurómetro es necesario saber la clase de terreno en la que se hará el sistema de tierra, esto debido a que con las estaciones, durante un año; las condiciones de humedad del suelo cambian y por ende su resistencia específica, es necesario entonces diseñar para el peor de los casos de resistividad del suelo, generalmente durante la época seca del año. A continuación se da una tabla con algunos suelos y su resistividad promedio:

Tabla II. Resistividad promedio de suelos

CLASE DE SUELO	RESISTIVIDAD PROMEDIO
Cienegoso	30 Ω X metro.
Barrosos	100 Ω X metro.
Arenoso	200 Ω X metro.
Grava Húmeda	500 Ω X metro.
Grava Seca	1000 Ω X metro.
Rocoso	3000 Ω X metro.

4.7 Acidez de los suelos y corrosión de los materiales de puesta a tierra

Antes de realizar un sistema de tierras es necesario analizar el suelo y especialmente su acidez, debido a que los materiales conductores utilizados comúnmente

para la red de tierras son el cobre y el aluminio. Es, entonces, de extrema necesidad medir el pH del suelo; esto nos ayudará a la selección del mejor material a usar para que el sistema de tierras tenga el mejor tiempo de vida útil. Es necesario poner atención especial a las siguientes recomendaciones:

1. Mida el pH del suelo a la profundidad a la que será instalada la red de tierra.
2. El valor del pH determina cual tipo de cobre utilizar. El cobre dura más en un suelo alcalino (pH de 7 o más). El estaño, aluminio y hierro galvanizado es mejor en un suelo ácido (pH de 7 o menos).

Para suelos altamente corrosivos es necesario hacer un tratamiento especial a los mismos y en algunos casos es necesario utilizar cobre estañado para aumentar su vida útil.

Las varillas regularmente están recubiertas de una película de cobre para mejorar su conductividad y evitar la oxidación. El espesor del recubrimiento de cobre es importante cuando se colocará en un suelo ácido. Es importante también poner atención en los métodos para ensartar la varilla en la tierra, en los casos de un suelo rocoso o arenoso, el cobre se puede raspar o perderse esta capa de cobre, dejando al descubierto el hierro, el cual se oxidará; este oxido tiene la desventaja de que no es buen conductor cuando se encuentra seco, aunque en época de humedad se convierte en buen conductor.

En un suelo ácido, en lugares de mucha vegetación, el cobre es atacado, por lo que se debe utilizar varillas con un recubrimiento de cobre más grueso. En casos más severos será necesario utilizar cobre estañado.

La corrosión es un proceso electromecánico que provoca como resultado la degradación de un metal o aleación. La corrosión es la pérdida acelerada del menos noble de los metales (en una unión) llamado ánodo, y al mismo tiempo protege a un metal más noble llamado cátodo. Es importante por esto que se evalúe y se verifique en los empalmes o uniones roscadas, si no se tiene una unión de diferentes metales; normalmente en las conexiones de los cables a las platinas se usan conectores, tornillos y tuercas de otros metales.

El aluminio pica al cobre, dejando menos superficie de contacto, por lo que la conexión se afloja y puede permitir arcos eléctricos, o tornarse en un valor alto de impedancia. Estos problemas de corrosión se pueden evitar se utiliza un compuesto de uniones que pueda evitar el puenteo debido a la humedad entre los metales; los más comunes usan algún tipo de grasa con partículas conductoras de grafito o de cobre. A medida que la presión de la unión aumenta, las partículas conductoras en la grasa se incrustan en los metales y forman una unión virgen de baja resistividad, sin aire y sin humedad.

El óxido de cobre (cardenillo, que es de color verde) no es un buen conductor, por lo que es necesario utilizar un compuesto de uniones en éstas, para evitar la oxidación.

El estaño, plomo, cinc, y aluminio son todos más anódicos que el cobre; por lo tanto, es necesario poner atención a las uniones donde se empleen estos metales.

A continuación mostramos una tabla de metales nobles que puede sernos de utilidad al seleccionar el metal del conductor a utilizar en nuestra red de tierra.

Tabla III. Tabla de metales nobles

TABLA DE METALES NOBLES

		Magnesio	Aluminio	Cinc	Hierro	Cadmio	Niquel	Estaño	Plomo	Cobre	Plata	Paladio	Oro
Menos Noble →	Magnesio	0	-0.71	-1.61	-1.93	-1.97	-2.12	-2.23	-2.24	-2.71	-3.17	-3.36	-3.87
	Aluminio	0.71	0	-0.9	-1.22	-1.26	-1.41	-1.52	-1.53	-2	-2.46	-2.65	-3.16
	Cinc	1.61	0.9	0	-0.32	-0.36	-0.51	-0.63	-0.64	-1.1	-1.56	-1.75	-2.26
	Hierro	1.93	1.22	0.32	0	-0.04	-0.19	-0.3	-0.31	-0.78	-1.24	-1.43	-1.94
	Cadmio	1.97	1.26	0.36	0.04	0	-0.15	-0.27	-0.28	-0.74	-1.2	-1.39	-1.9
	Niquel	2.12	1.41	0.51	0.19	0.15	0	-0.11	-0.12	-0.59	-1.05	-1.24	-1.75
	Estaño	2.23	1.52	0.63	0.3	0.27	0.11	0	-0.01	-0.47	-0.94	-1.12	-1.64
	Plomo	2.24	1.53	0.64	0.31	0.28	0.12	0.01	0	-0.46	-0.93	-1.11	-1.63
	Cobre	2.71	2	1.1	0.78	0.74	0.59	0.47	0.46	0	-0.46	-0.65	-1.16
	Plata	3.17	2.46	1.56	1.24	1.2	1.05	0.94	0.93	0.46	0	-0.19	-0.7
	Paladio	3.36	2.65	1.75	1.43	1.39	1.24	1.12	1.11	0.65	0.19	0	-0.51
Oro	3.87	3.16	2.26	1.94	1.9	1.75	1.64	1.63	1.16	0.7	0.51	0	
← Menos Noble													
Se puede presentar una corrosión acelerada entre las uniones sin protección si la diferencia algebraica del potencial atómico es mayor de +/- 0.3 voltios													

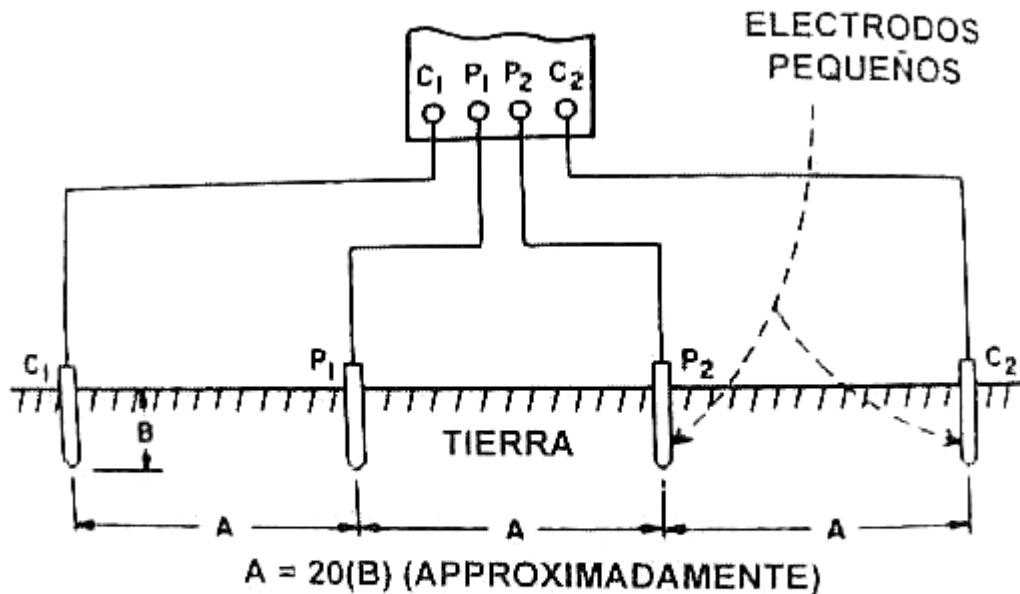
Fuente: Polyphaser Corporation. Roger R. Block. Fundamentos de Protección contra Descargas Eléctricas y Pulsaciones Electromagnéticas. Segunda Edición. 1995. Pag. 18.

4.8 Medición de resistencia y resistividad del suelo

A continuación se expondrá un método sencillo para determinar la resistividad del suelo:

Se introducen en la tierra cuatro electrodos de la misma longitud y a la misma separación. La profundidad de penetración (B) debe ser mucho menor que la separación entre electrodos (A) de tal forma que se cumpla siguiente relación: $A \geq 20B$.

Figura 22. Método de cuatro picas para medir la resistividad del suelo



Método de cuatro picas para medir la resistividad del suelo.

Fuente: Polyphaser Corporation. Roger R. Block. Fundamentos de Protección contra Descargas Eléctricas y Pulsaciones Electromagnéticas. Segunda Edición. 1995. Pag. 26

Observando la gráfica podemos decir que se debe aplicar una corriente conocida entre los dos electrodos exteriores (C_1 y C_2) y se mide el potencial entre el par de electrodos interiores (P_1 y P_2). Si “A” está medida en metros entonces utilice la fórmula siguiente:

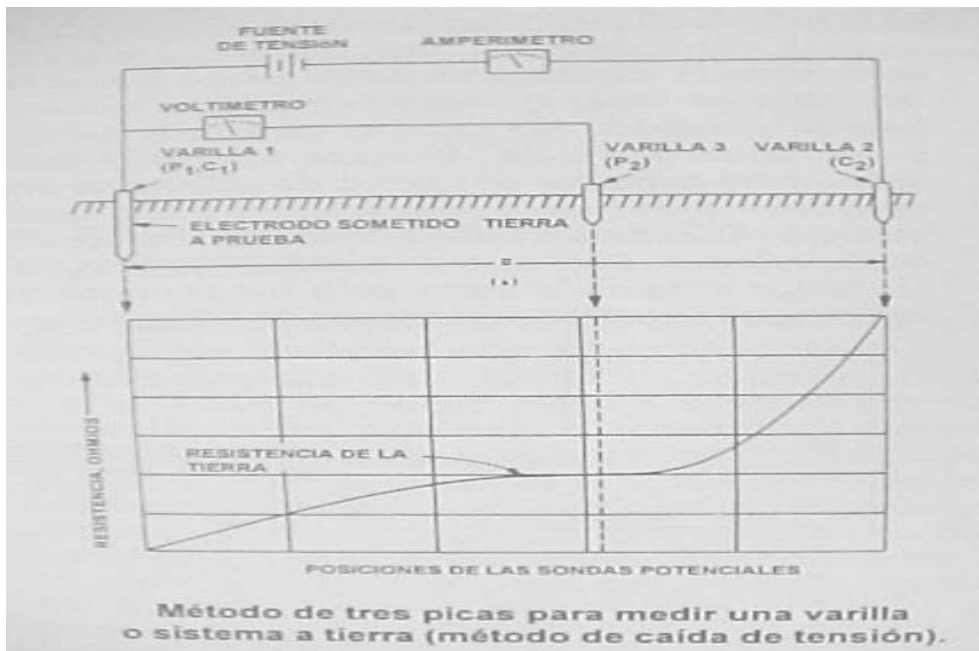
$\rho = (6.28 A) (V / I)$ lo que nos dará el resultado en ohm-metros.

En la actualidad las técnicas para la medición de tierras emplean equipos con ondas de corriente directa, o de corriente alterna de baja frecuencia (entre 60 y 120 Hz.). Por lo que la medición no corresponde al comportamiento real de la tierra a las frecuencias de operación de los equipos de comunicaciones, por lo mismo, no podemos

simular las condiciones de una onda irruptiva dinámica en la que se desarrollan las caídas de tensión inductiva; es decir, con los instrumentos actuales sólo podemos medir la resistencia o resistividad del suelo en condiciones de alto voltaje a frecuencias pequeñas. No podemos entonces medir la impedancia de la tierra y su comportamiento inductivo a altas frecuencias; es necesario entonces diseñar un generador de señal, similar a la del rayo, con frecuencias de operación de los equipos de comunicaciones, para determinar la impedancia de la tierra y no sólo la resistividad de la misma.

El método de tres picas que se conoce como el Método de Caída de Tensión, es utilizado para medir la resistencia de una varilla o sistema de tierras. Como se ve en la gráfica, se unen P_1 y C_1 y se mueve el electrodo P_2 a intervalos discretos a lo largo de la línea formada por los puntos en P_1 , C_1 y C_2 e ir registrando las mediciones de la tensión.

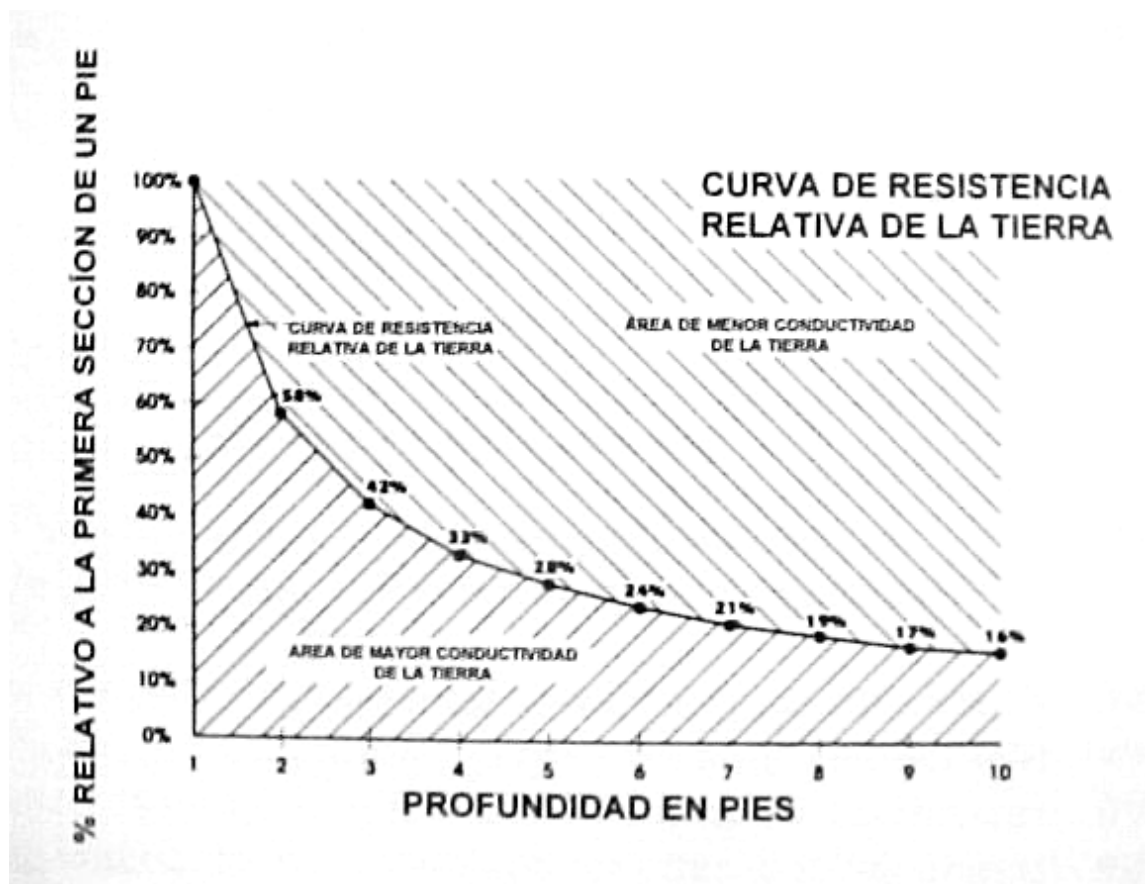
Figura 23. Método de tres picas para medir una varilla o sistema a tierra



Fuente: Polyphaser Corporation. Roger R. Block. Fundamentos de Protección contra Descargas Eléctricas y Pulsaciones Electromagnéticas. Segunda Edición. 1995. Pag. 27.

Debido a que la mayoría, sino todos, de medidores trabajan a frecuencias entre 60 y 120 Hz. No toman en consideración cualquier inductancia que pudiera haber en el sistema a tierra, como por ejemplo la inductancia que se presenta cuando una varilla pasa a una capa arenosa en el suelo. Una forma de darse una idea de las capas subterráneas del suelo es mediante la medición de caída de tensión y llevar un registro de las mismas para cada pie de penetración de la varilla en el suelo; a continuación mostramos una curva típica de resistencia relativa de la tierra:

Figura 24. Curva de resistencia relativa de la tierra



Fuente: Polyphaser Corporation. Roger R. Block. Fundamentos de Protección contra Descargas Eléctricas y Pulsaciones Electromagnéticas. Segunda Edición. 1995. Pag. 28.

4.9 Medición de acidez de suelo y selección de tipo de material para conductores de puesta a tierra

A continuación se da un procedimiento para medir el pH del suelo por medio de un kit de prueba:

1. Tome la muestra de suelo a la profundidad a la que va ir instalado el cable del anillo de la red de tierra, aproximadamente una cucharada.
2. Coloque la muestra en un papel limpio, retire materiales que no sean parte del suelo, como basura o rocas. No toque con las manos la muestra.
3. Ponga la muestra en un tubo de ensayo, o si tiene un equipo de prueba, a un tercio del tubo de prueba. Asegúrese que el tubo este completamente limpio antes de utilizarlo.
4. Agregue agua neutra (pH de 7) hasta llenar el tubo de ensayo a un 100%
5. Agite el tubo con la mezcla durante aproximadamente 1 minuto, luego déjelo reposar por lo menos 2 minutos.
6. Introduzca la cinta indicadora dentro del tubo de ensayo por un tiempo aproximado de 5 a 10 segundos.
7. Saque la cinta indicadora y compare el cambio del color de la misma con la tabla de comparación que trae su equipo de medición y determine por medio del color y la tabla que valor de pH le corresponde al suelo objeto de la medición.

Figura 25. Medición de acidez del suelo



1



2



3



4



5



6



7

Fuente: PolyPhaser Corporation. Product Catalog. Appendix D. Pp. 105.

5. PROTECCIÓN CONTRA TRANSIENTES

En la actualidad la tecnología de circuitos utilizada para comunicaciones es de una muy gran de escala de integración y son altamente susceptibles a daños por transientes de las descargas electro atmosféricas o cualquier otro sobrevoltaje de duración momentánea.

5.1 Definición de transientes

Son sobretensiones transitorias (condición eléctrica de sobre-esfuerzo que tiene una duración menor a unos milisegundos), que pueden ser causadas por efectos directos e indirectos de las descargas eléctricas atmosféricas, por maniobras de interruptores en las redes de distribución eléctrica o por la operación normal, arranque o paro de equipos eléctricos como motores, compresores, etc.

5.2 Supresores de transientes

Son dispositivos, eléctrico-electrónicos, cuya función principal es limitar las sobre tensiones transitorias y desviar las sobre corrientes por un camino seguro y de menor impedancia a tierra, protegiendo así al equipo.

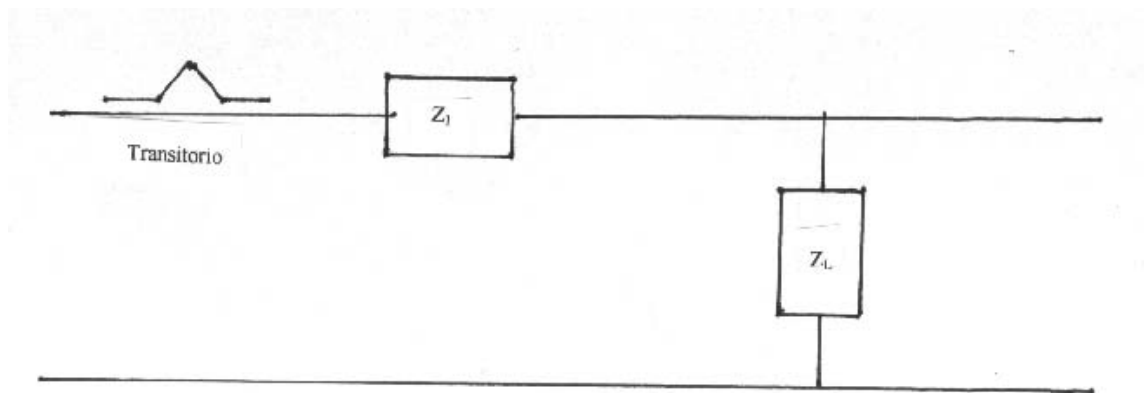
5.3 Tipos de conexión de supresores de transientes

Estos dispositivos son fabricados en arreglos que pueden ser conectados a las líneas de alimentación, ya sea de potencia o de señal, de los equipos a proteger; en formas tales como en serie, en paralelo o mixtas que es una combinación de las dos anteriores: Cada una por supuesto con sus ventajas y desventajas.

5.3.1 Conexión en serie

El dispositivo de protección debe influir mínimamente en la operación normal del equipo a proteger, por lo tanto, la impedancia en serie debe ser mucho más pequeña que la impedancia del equipo a proteger; $Z_1 \ll Z_L$ en donde Z_1 es la impedancia del dispositivo de protección y Z_L es la impedancia del equipo a proteger, pero en el momento del transitorio se deben bloquear o limitar las corrientes transitorias a través de impedancias serie de gran tamaño. Estos dispositivos en serie tienen la ventaja de que reaccionan más rápidamente al presentarse un sobrevoltaje transitorio, pero tiene la desventaja que al ser la tensión o corriente demasiado grande para su capacidad lo destruye y deja el equipo a proteger fuera de servicio.

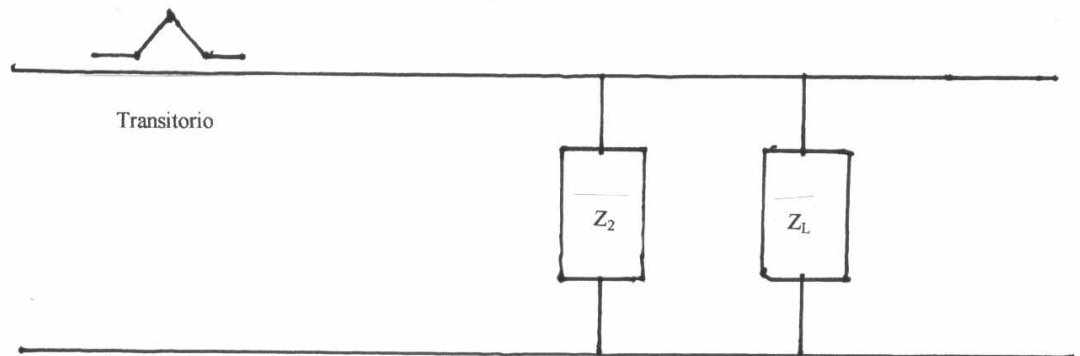
Figura 26. Conexión en serie de supresores de transientes



5.3.2 Conexión en paralelo

La impedancia en paralelo, del dispositivo de protección, debe ser muy grande para las señales de operación normal del equipo a proteger, es decir; $Z_2 \gg \gg Z_L$, pero en el momento del transitorio se deben drenar las corrientes transitorias a través de una impedancia en paralelo casi nula. Estos dispositivos tienen la ventaja de que al dañarse por efecto de una sobretensión, no dejan al equipo a proteger fuera de servicio, pero, permiten que una parte de la corriente transitoria pase directamente al equipo.

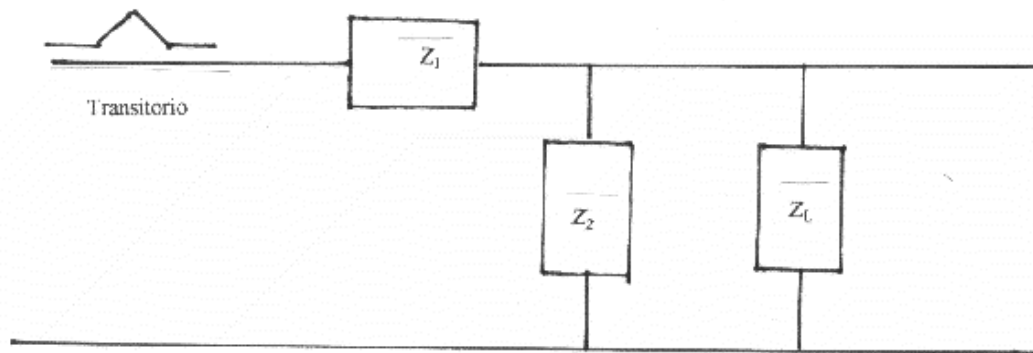
Figura 27. Conexión en paralelo de supresores de transientes



5.3.3 Conexión mixta

Esta es una combinación de los dos métodos anteriores: Durante las condiciones transitorias la impedancia serie debe ser muy grande $Z_1 \gg \gg Z_L$, para limitar la corriente transitoria y la impedancia paralelo debe ser muy pequeña $Z_2 \ll \ll Z_L$, para drenar la corriente a tierra.

Figura 28. Conexión mixta de supresores de transientes



Las formas de onda de las señales de sobrevoltaje tienen un tiempo de subida y de bajada muy corto (es decir, una razón de cambio (pendiente en la curva), muy elevada) por lo que se hace necesario que los elementos en paralelo del dispositivo de protección respondan muy rápido, en el orden de los nanosegundos; la onda 8/20 del IEEE tiene un tiempo de subida de 8μ segundos desde cero a 8 Kiloamperios y un tiempo para bajar a un 50% de este valor de 12μ segundos, por lo que el tiempo de respuesta de los dispositivos de protección debe ser más rápido que esta onda.

6. DISEÑO DE PROTECCIONES CONTRA DESCARGAS ELECTROATMOSFÉRICAS Y PULSACIONES ELECTROMAGNÉTICAS DE UNA RADIOBASE TÍPICA CON TECNOLOGÍA CDMA

Basándonos en la teoría planteada en los capítulos precedentes, procederemos al diseño de un caso típico específico:

Lo primero a definir y a medir será lo siguiente:

1. Determinar las dimensiones del terreno.
2. Medir la resistividad del suelo.
3. Medir la acidez del suelo.
4. Determinar la resistencia de suelo mínima requerida por el fabricante del equipo para perfecta operación de los mismos.
5. Determinar la altura de la torre auto soportada, par a poder calcular su impedancia.
6. Determinar la impedancia del sistema radiante, impedancia de antenas, conectadores de cables coaxiales, cables coaxiales, impedancia del equipo.
7. Determinar la impedancia del cable de bajada del pararrayos.
8. Hacer un diseño preliminar, (sólo cálculos) para la red de tierras y calcular su impedancia, si es necesario, por no tener el valor de impedancia requerido por el fabricante, repetir el proceso agregando más tomas de puesta a tierra.
9. Si por el tipo de terreno no se lograra la impedancia requerida, debe tratarse el mismo.

CONCLUSIONES

1. Debe existir un solo sistema de tierra. No se debe permitir varillas de tierra separadas que no estén conectadas al sistema de tierra principal, debido a que esto ocasionaría en el momento de la descarga una diferencia de potencial entre ambos sistemas y no se tendrá una referencia a tierra igual a cero, sino que se presentaría la diferencia de potencial mencionada, la que produciría corrientes de retorno que podrían dañar los equipos.
2. El suelo se hace conductivo añadiendo humedad y sales iónicas, por lo que es necesario poner atención a los lugares en donde se llega a temperaturas de congelación, ya que a estas temperaturas el suelo tratado disminuye su conductividad; es decir, la resistividad aumenta de manera drástica.
3. Las componentes de energía de alta frecuencia de un rayo se detienen menos en conductores de grandes superficies, por efecto piel o pelicular.
4. Todos los conductores de bajada de rayos deben estar separados por los menos 12 pulgadas de cualquier otro conductor o material conductivo, para evitar el acoplamiento inductivo y la inductancia mutua, ya que esto aumentaría la inductancia total.

5. La velocidad de propagación determina el tiempo mínimo necesario para absorber la energía de la descarga; mientras más lejos esté la caseta de la torre, más tiempo tiene el sistema de tierras para dispersar la energía del impacto antes que ésta alcance el equipo.

6. Las líneas coaxiales más largas son más inductivas, por lo tanto, neutralizan la corriente del impacto y obligan a la energía de la descarga a que se dirija a la tierra de la base de la torre.

RECOMENDACIONES

1. Es necesario que se diseñe un equipo de medición de impedancia de tierras, los equipos actuales en el mercado son equipos que fueron diseñados para medir la resistencia de los suelos sin tomar en cuenta los efectos capacitivos e inductivos de los mismos. Esto hace que la medición realizada con estos medidores, es sólo de la resistencia del suelo y no de la impedancia, por lo que no se pueden analizar los efectos de las variaciones en las frecuencias de las diferentes componentes de la onda de rayo.
2. En la actualidad, con el auge de los sistemas de comunicaciones, es necesario que se analicen los efectos de altas frecuencias.
3. Debe utilizarse nuevos criterios para el análisis de las protecciones contra descargas electro atmosféricas, en el pasado la mayoría de estudios se han hecho para proteger instalaciones eléctricas de potencia, en las cuales, la frecuencia no es un factor apremiante, pues en los sistemas de potencia se utiliza las frecuencias normalizadas de 60 Hz o 50 Hz. Por lo que el análisis en altas frecuencias no era una necesidad para la protección de equipos de potencia.
4. En las radiobases con tecnología CDMA se debe considerar el fenómeno de una descarga electro atmosférica como un disturbio rápido (de 2 a 20 μ seg.) de alta potencia y alta frecuencia y por lo mismo se sugiere estudiar el circuito con impedancias y no sólo con resistencias.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALCATEL. **Radioenlace Digital de Pequeña y Mediana Capacidad.** Manual de Usuario.
2. BARRIOS TORRES, Edwin Rolando. **Comparación de Sistemas de Puesta a Tierra Tradicionales Contra el Uso de Bentonita.** Tesis. USAC, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica. 1992.
3. BLOCK, Roger R. **Fundamentos de Protección Contra Descargas Eléctricas y Pulsaciones Electromagnéticas.** Segunda Edición. 1993.
4. DE LEON MONTENEGRO, César Humberto. **Análisis de Tierras para la Industria.** Tesis. USAC, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica. 1996.
5. DUQUE ORTIZ, Hebert Alberto. **Protección Contra Descargas Atmosféricas por Medio de Pararrayos Ionizantes.** Tesis. USAC, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica. 1990.
6. EDMINISTER, Joseph A. **Circuitos Eléctricos, Teoría y 50 Problemas Resueltos.** Serie de Compendios Schaum. McGraw Hill. 1975.
7. ENRIQUEZ HARPER, Gilberto. **Elementos de Diseño de Subestaciones Eléctricas.** Editorial Limusa S.A. de C.V.México. 1994.
8. ERICO. *Cadweld, Welded Electrical Connections.* Manual.

9. FONG GONZALEZ, Justo Francisco. **Protección de Puesta a Tierra para Sistemas de Comunicaciones**. Tesis. USAC, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica. 1992.
10. HAYT, William H. Jr. **Teoría Electromagnética**. McGraw Hill. 1979.
11. INTERNATIONAL POWER ASSOCIATION. *Power Quality Solutions*. Technical Guide.
12. LIGHTNING ELIMINATORS & CONSULTANTS, INC. *Engineering Solutions to Lighting, Grounding and Surge Problems*. 1996.
13. MARTIN, José Raúl. **Diseño de Subestaciones Eléctricas**. McGraw Hill. México. 1987.
14. NORTEL NETWORKS, *CDMA Metro Cell Operations and Maintenance*. NBSS8.1 Final 04.01. September 1999.
15. NORTEL NETWORKS, **Teoría de CDMA y diseño/función de productos de Nortel Networks**. Edición 2.4.1 Enero de 2000.
16. POLYPHASER CORPORATION. *The Grounds for Lightning and EMP Protection*. 1986.
17. POLYPHASER CORPORATION. *Lightning Protection Solutions*. Product Catalog.
18. VALKENBURG, M.E. Van. **Análisis de Redes**. Editorial Limusa. México. 1983.

