

**PROPUESTA TÉCNICA QUE INCORPORA PARÁMETROS DE  
COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN EL DISEÑO DE SISTEMAS DE  
PUESTA A TIERRA PARA INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE USO FINAL.**

OSCAR RICARDO RODRÍGUEZ INFANTE



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2013**

**PROPUESTA TÉCNICA QUE INCORPORA PARÁMETROS DE  
COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN EL DISEÑO DE SISTEMAS DE  
PUESTA A TIERRA PARA INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE USO FINAL.**

**OSCAR RICARDO RODRÍGUEZ INFANTE**

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO  
ELECTRICISTA**

**DIRECTOR DEL PROYECTO**  
MSC. (C) GABRIEL ALEXIS MALAGÓN

**CODIRECTORES**  
DR. GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA  
MPE. WILSON GIRALDO PICÓN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2013**

## DEDICATORIA

A mi mamá.

## AGRADECIMIENTOS

Debo expresar mis más sinceros agradecimientos a mi director de proyecto MSc. (c) Gabriel Alexis Malagón Carvajal y a mis codirectores Dr. Gabriel Ordóñez Plata y MPE. Wilson Giraldo Picón, de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E<sup>3</sup>T) de la Universidad Industrial de Santander; por sus valiosas sugerencias, paciente orientación, continúa ayuda y ánimos durante el desarrollo de esta investigación.

A Mayra Delgado Martínez, por su colaboración y paciencia en la elaboración de este documento.

Adicionalmente a todas las personas que durante el desarrollo de mi carrera estuvieron a mi lado y me ayudaron a crecer tanto personal como profesionalmente.

Por último, desearía expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia por su amor, ánimo, apoyo moral y comprensión.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>27</b>
<b>1. CRITERIOS LEGALES, NORMATIVOS Y TÉCNICOS.....</b>	<b>29</b>
1.1. Perspectiva general.....	29
1.2. Reglamentación y normas relacionadas con CEM en Colombia.....	29
1.3. Normas internacionales relacionadas con CEM.....	31
1.4. Normas y reglamentos en Colombia asociados con los SPT.....	32
1.5. Normas relacionadas con CEM a nivel internacional asociadas con los SPT.....	35
<b>2. PROBLEMAS QUE GENERAN IEM EN LOS EQUIPOS ELECTRÓNICOS Y PRÁCTICAS EN EL DISEÑO DEL SPT PARA MITIGARLOS.....</b>	<b>37</b>
2.1. Equipos electrónicos y su sensibilidad a las perturbaciones electromagnéticas.....	37
2.2. Unidades de los equipos electrónicos que son conectadas a tierra.....	38
2.3. IEM en los equipos electrónicos originada por malas prácticas de cableado del SPT.....	39
2.3.1. Múltiples conexiones del conductor de tierra.....	39
2.3.2. Múltiples conexiones neutro–tierra.....	40
2.3.3. Tierra aislada o separada IG.....	41
2.3.4. Problemas de referencia en los equipos electrónicos.....	45
2.3.5. Incremento de la impedancia de las conexiones a tierra bajo altas frecuencias [2] IEEE Std. 1100.....	48
2.3.6. Perturbaciones electromagnéticas generadas por autoresonancia en los conductores del SPT.....	50
2.3.7. Inductancia de los caminos compuestos por los conductores del SPT.....	51
2.3.8. Perturbaciones de modo común en las líneas de alimentación.....	52
2.4. Buenas prácticas en el diseño de SPT para equipos sensibles, orientadas a la mitigación de los problemas de incompatibilidad electromagnética. ..	52
2.4.1. Único punto de conexión a tierra SPG.....	53
2.4.2. Configuración tipo árbol (TREE).....	56
2.4.3. Estructuras de referencia de señal SRS.....	59

2.5.	Buenas prácticas en el dimensionamiento de los conductores de equipotencialización en sistemas de puesta a tierra. ....	67
2.5.1.	Dimensionamiento de los conductores de equipotencialización para disminuir la impedancia expuestas a altas frecuencias. ....	67
2.5.2.	Dimensionamiento de los conductores de equipotencialización para mitigar fenómenos de autoresonancia. ....	68
2.5.3.	Dimensionamiento de los conductores del SPT para minimizar la inductancia de los caminos compuestos por los conductores del SPT. ....	69
2.5.4.	Aplicación del transformador de aislamiento para reducir las perturbaciones de modo común en las líneas de alimentación. ....	70
2.5.5.	Cambio de líneas a fibra óptica .....	71
<b>3.</b>	<b>PROBLEMAS DE INCOMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS (SIPRA) Y BUENAS PRACTICAS DE DISEÑO DEL SPT PARA MITIGARLOS. ....</b>	<b>73</b>
3.1.	Perspectiva general.....	73
3.2.	Naturaleza de las descargas atmosféricas.....	74
3.3.	Problemas de incompatibilidad electromagnética asociados al SPT de los SIPRA. ....	77
3.3.1.	Diferencias de potencial. ....	78
3.3.2.	Sobretensiones en el sistema.....	79
3.3.3.	IEM debida a los Campos magnéticos generados por el IER. ....	80
3.3.4.	Altas impedancias en los conductores del SPT.....	80
3.4.	Buenas prácticas en el diseño de los SPT para SIPRA, orientadas a la mitigación de los problemas de incompatibilidad electromagnética. ....	81
3.4.1.	Integración de los elementos metálicos de la estructura en una red de equipotencialización RE.....	81
3.4.2.	Posicionamiento de los conductores de puesta a tierra y conexión con la estructura de la edificación [15]......	86
3.4.3.	Dimensionamiento de los conductores del SPT de los SIPRA. ....	89
<b>4.</b>	<b>PROBLEMAS QUE GENERAN IEM EN LOS EQUIPOS DE POTENCIA Y BUENAS PRÁCTICAS EN EL DISEÑO DEL SPT DE POTENCIA PARA MITIGARLOS. ....</b>	<b>93</b>
4.1.	Perspectiva general.....	93
4.2.	Problemas de incompatibilidad electromagnética asociados al SPT de potencia.....	94
4.2.1.	Perturbaciones causadas por malas prácticas de cableado y conexión a tierra. ....	94

4.2.2.	Contenido de armónicos en la red.....	96
4.2.3.	Carga estática. ....	100
4.2.4.	Altas impedancias de puesta a tierra.....	101
4.3.	Buenas prácticas en el diseño del SPT y cableado de circuitos de potencia orientadas a mitigar los problemas de incompatibilidad electromagnética.....	102
4.3.1.	Disminución de la impedancia de puesta a tierra y mejoramiento de la distribución de potencial en el terreno.....	103
4.3.2.	Consideraciones en el tratamiento del terreno para reducir la impedancia de puesta a tierra [8], [5].....	110
4.3.3.	Consideraciones de cableado y conexión a tierra de equipos.....	113
4.3.4.	Separación de circuitos para mitigar la IEM debida a los armónicos de tensión [29]. ....	114
4.3.5.	Aplicación del transformador de aislamiento para bloquear el paso de armónicos triple-n [29]. ....	115
	Practica recomendada .....	116
	Buenas prácticas de conexión a tierra y cableado de circuitos de potencia. ....	116
	Buenas prácticas de conexión a tierra y cableado de circuitos de potencia. ....	116
	<b>CONCLUSIONES. ....</b>	<b>117</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>119</b>
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>120</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>124</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Elementos y clasificación de los SPT. ....	34
Figura 2. Errores típicos de cableado en circuitos ramales. ....	40
Figura 3. Configuración tierra aislada. ....	41
Figura 4. Diferencias de potencial entre la estructura de la construcción y los equipos electrónicos. ....	43
Figura 5. Diferencias de potencial en equipos remotos. ....	44
Figura 6. Problemas en la operación de protecciones con configuraciones aisladas del SPT. ....	45
Figura 7. Computador y las interfaces de periféricos con el cableado y las rutas de circuito de referencia de puesta a tierra. ....	46
Figura 8. Daño en un fax, debido al impacto de una sobretensión transitoria en la red telefónica. ....	47
Figura 9. Impedancia vs frecuencia de un electrodo de puesta a tierra para dos configuraciones A y B. ....	49
Figura 10. Resonancia característica de los conductores. ....	50
Figura 11. Conductor de puesta a tierra aislada para toma de equipos sensibles. ....	54
Figura 12. Toma convencional y toma de tierra aislado IGR. ....	55
Figura 13. Esquema configuración tipo árbol "TREE" ....	57
Figura 14. Impedancia de los conductores de puesta a tierra, en la configuración SPG. ....	58
Figura 15. Unidades de electrónicas conectadas usando las configuraciones SPG y SRS. ....	59
Figura 16. Impedancia de los conductores de puesta a tierra para un centro de cómputo. ....	61
Figura 17. Modelo del flujo de corriente a través de un SRP considerando el modelo de ohms por cuadrado. ....	62
Figura 18. . Construcción de una SRP utilizando hojas en acero galvanizado Steel Deck. ....	63
Figura 19. Pedestal para subestructura de piso elevado y conductores que componen la SRG. ....	65
Figura 20. Esquema de conexiones de una SRG utilizando una estructura con piso elevado. ....	66
Figura 21. Uso de varillas de acero estructural como alternativa para una SRG. ....	67

Figura 22. Requerimientos de puesta a tierra de un transformador de aislamiento. ....	71
Figura 23. Mapa de ISO-Niveles ceramicos para Colombia (Área de 30 km x30 km) – 1999. ....	76
Figura 24. Diferencias de potencial generadas por descargas atmosféricas entre puntos del terreno, elementos del sistema de puesta a tierra, la estructura metálica del edificio y equipos en su interior. ....	78
Figura 25. Ejemplo de una SPT tridimensional, que integra la estructura de la edificación en una y la cimentación como electrodos de puesta a tierra. ....	82
Figura 26. Limites en las ZPR que utilizan como blindaje la red equipotencial y un sistema coordinado de DPS de tal manera que ( $U_2 \ll U_0$ y $I_2 \ll I_0$ ) y la radiación de campos magnéticos ( $H_2 \ll H_0$ ). ....	83
Figura 27. Utilización de las varillas de refuerzo de una estructura para la unión equipotencial. ....	84
Figura 28. Unión equipotencial en una estructura con refuerzos de acero. ....	85
Figura 29. Conductores bajantes internos en estructuras industriales. ....	86
Figura 30. Modelo de la estructura de refuerzo de un edificio y los conductores de puesta a tierra. ....	87
Figura 31. Máxima sobretensión presentada entre el conductor de puesta a tierra y la estructura vs distancia entre ellos. ....	88
Figura 32. Distancia entre el conductor de puesta a tierra y la columna central de la construcción. ....	88
Figura 33. Bucle en un conductor bajante. ....	90
Figura 34. Instalación incorrecta e insegura de una tierra "aislada o dedicada" para una máquina CNC. ....	95
Figura 35. Espectro armónico de fuentes de alimentación conmutada (por modulación de ancho de pulso). ....	97
Figura 36. Espectro armónico de un variador de velocidad trifásico. ....	97
Figura 37. Espaciamiento no uniforme de los conductores de la malla de puesta a tierra. ....	104
Figura 38. Resistencia de puesta a tierra para diferentes configuraciones de rejillas y diferentes profundidades en un área dada. ....	104
Figura 39. Tensión de contacto para diferentes arreglos de rejillas y profundidad de enterramiento en un área dada. ....	105
Figura 40. Tensión de paso para diferentes arreglos de rejillas y profundidad de enterramiento en un área dada. ....	105

Figura 41. Puesta a tierra de una subestación aérea. ....	109
Figura 42. Curva de respuesta de electrodos de puesta a tierra conectados en paralelo. ....	110
Figura 43. Desarrollo de la resistencia de un electrodo. ....	111
Figura 44. Separación de las cargas lineales de las no lineales. ....	114
Figura 45. Las corrientes de tierra inducidas y el ruido de los variadores regresan a través del devanado secundario de un transformador de aislamiento. ....	115

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Problemas de incompatibilidad de electromagnética y buenas prácticas en el diseño de los SPT de equipos sensibles, para mitigarlas. ....	72
Tabla 2. Valores típicos de distancia entre conductores bajantes. ....	90
Tabla 3. Aislamiento entre elementos del SIPRA externo – Valores de coeficientes $k_i$ . ....	91
Tabla 4. Aislamiento entre elementos del SIPRA externo – Valores de coeficientes $k_c$ .....	91
Tabla 5. Aislamiento entre elementos del SIPRA externo – Valores de coeficientes $k_m$ .....	91
Tabla 6. Problemas de incompatibilidad de electromagnética y buenas prácticas en el diseño de los SPT de SIPRA, para mitigarlas. ....	92
Tabla 7. Rango de tensiones estáticas producidas por diferentes procesos. ....	101
Tabla 8. Valores de referencia para resistencia de puesta a tierra. ....	101
Tabla 9. Requisitos para los electrodos de puesta a tierra. ....	107
Tabla 10. Impedancias de puesta a tierra. ....	108
Tabla 11. Porcentaje aproximado del desarrollo de la resistencia de puesta a tierra de un electrodo de 3m de longitud y 15.88 mm de diámetro. ....	112
Tabla 12. Problemas de incompatibilidad de electromagnética y buenas prácticas en el diseño de los SPT de potencia, para mitigarlos. ....	116

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: ASPECTOS GENERALES DE LA COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA.....	124
ANEXO B: CURVA CBEMA.....	134
ANEXO C: RECOMENDACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS MALLAS DE REFERENCIA DE SEÑAL SRG [2]. ....	135
ANEXO D: BARRAS DE EQUIPOTENCIALIZACIÓN [18], [2].....	137
ANEXO E: MÉTODOS DE CONEXIÓN A TIERRA [8]. ....	143

## LISTA DE FIGURAS – ANEXOS.

Figura 1. Componentes de la CEM.....	125
Figura 2. Origen de las perturbaciones electromagnéticas.....	126
Figura 3. Puertos de entrada de las perturbaciones electromagnéticas conducidas.....	130
Figura 4. Circuito en modo diferencial. ....	131
Figura 5. Circuito en modo común. ....	131
Figura 6. Curva CBEMA, tolerancia de los equipos a variaciones de tensión del sistema de alimentación 2000.....	134
Figura 7. Configuración de para una barra de equipotencialización. ....	138
Figura 8. Equipotencialización en anillo de los electrodos de puesta a tierra. ...	140
Figura 9. Concepto de barra de equipotencialización principal para sistemas de telecomunicaciones. ....	141
Figura 10. Configuración de la red de equipotencialización para edificios de telecomunicaciones. ....	142
Figura 11. Métodos de puesta a tierra del neutro y sus diagramas equivalentes. ....	143
Figura 12. Sistema no puesto a tierra: (A) Configuración del circuito, (B) Diagrama vectorial. ....	144
Figura 13. Limitación de la corriente de falla mediante el método de puesta a tierra mediante resistencia. ....	146
Figura 14. Falla monofásica a tierra en un sistema puesto a tierra mediante una reactancia. A) Configuración del circuito, B) Diagrama fasorial. ....	147
Figura 15. Falla monofásica a tierra en un sistema de puesta a tierra resonante. A) Configuración del circuito B) Diagrama vectorial. ....	150

## LISTA DE TABLAS – ANEXOS.

Tabla 1. Clasificación de las perturbaciones electromagnéticas.....	128
Tabla 2. Ejemplos de fuentes de perturbaciones conducidas y su espectro de frecuencia. ....	129
Tabla 3. Tipos y características de las perturbaciones radiadas. ....	132
Tabla 4. Fuentes de perturbación electromagnética por radiación y espectros de frecuencia. ....	133
Tabla 5. Características de los métodos de conexión a tierra.....	152

## RESUMEN

**TÍTULO:** PROPUESTA TÉCNICA QUE INCORPORA PARÁMETROS DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN EL DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE USO FINAL \*

**AUTOR:** OSCAR RICARDO RODRÍGUEZ INFANTE\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Compatibilidad electromagnética (CEM), Sistema de puesta a tierra, Equipo electrónico, Buenas prácticas, perturbaciones electromagnéticas, interferencia electromagnética (IEM).

**CONTENIDO:** El crecimiento de cargas desbalanceadas y no lineales en la red eléctrica, además de la presencia de rayos, fallas de potencia y la operación de otros equipos, hacen que los sistemas eléctricos deban operar en un ambiente que contiene diversas perturbaciones electromagnéticas. Estas perturbaciones se presentan en un amplio rango de frecuencias y con una variedad de amplitudes que pueden interferir, deteriorar o causar el mal funcionamiento de los equipos involucrados. Los SPT son un componente de la instalación eléctrica que cumple un papel importante en la atenuación de estos efectos.

Es por ello, que el objetivo de esta investigación es la identificación de unas buenas prácticas de ingeniería en el diseño de sistemas de puesta a tierra, que permitan mitigar los problemas de incompatibilidad electromagnética al interior de las instalaciones eléctricas de uso final. Para este fin, este documento expone; en primer lugar los estándares técnicos y normativos que sirvieron de soporte para esta investigación. A continuación se describen los problemas de incompatibilidad electromagnética y las prácticas de diseño del sistema de puesta a tierra recomendadas para mitigarlos en: equipos electrónicos, sistemas de protección contra rayos SIPRA y sistemas de potencia. Finalmente, se presentan las conclusiones, recomendaciones y propuestas a futuro.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Gabriel Alexis Malagón.

## ABSTRACT

**TITLE:** TECHNICAL PROPOSAL WHICH INCLUDE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY PARAMETERS IN THE DESIGN OF GROUNDING SYSTEMS FOR FINAL USE ELECTRICAL INSTALLATIONS.

**AUTHOR:** OSCA RICARDO RODRÍGUEZ INFANTE\*\*

**KEYWORDS:** Grounding system, Electromagnetic compatibility (EMC), Grounding, Best practices, Electromagnetic interference (EMI), recommended practices.

**DESCRIPTION:** With the growing number of unbalanced and nonlinear charges on the electrical network, besides de presence of atmospheric discharges, power fault and the operation of other equipment, force the electrical systems operate in an environment containing several electromagnetic disturbances. These disturbances are presented in a wide frequency range and a variety of amplitudes that interfere, damage or cause malfunction of the equipment involved. The grounding system is a component of the electrical system that plays an important role in mitigating these effects.

Therefore, the objective of this research is the identification of good engineering practices in grounding systems design, to mitigate the electromagnetic compatibility problems within the final use electrical installations. For this purpose, this document presents, firstly the technical and regulatory standards that supported this research. The following describes the electromagnetic compatibility problems and the grounding system design practices recommended to mitigate them. These recommended practices are identified for each application scenario of the grounding systems, like lightning protection systems, electronic grounding systems and power circuits and equipment grounding systems. Finally, this paper presents the conclusions, recommendations and forward-looking solutions and proposals.

---

\*\* Faculty of Physical-Mechanic Engineering. School of Electrical, Electronical and Telecommunications Engineering. Director: Gabriel Alexis Malagón.

## GLOSARIO

Este glosario se construyó a partir de los documentos que hacen parte del soporte técnico, normativo y legal de esta investigación. En el ámbito nacional se incluyen definiciones tomadas del RETIE, la NTC 2050 y el Proyecto de Norma Técnica en Sistemas de Puesta a Tierra NTC 389. También se describen términos tomados de estándares internacionales como el Green Book IEEE 142 y el Esmerald book IEEE 1100.

**Apantallamiento (Shielding):** Elementos metálicos que se instalan alrededor de dispositivos que se desean proteger contra los efectos de una perturbación electromagnética.

**Barraje equipotencial-BE (Ground Busbar, Ground Bar, Ground Bus):** 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.

**Cable apantallado:** Cable con una envoltura conductora que permite controlar fenómenos electromagnéticos inducidos. Es lo mismo que cable blindado.

**Circuito dedicado:** Es aquel que tiene el conductor del neutro exclusivo y tiene uno o más dispositivos conectados a éste, además posee un conductor de puesta a tierra de equipo que puede o no ser compartido.

**Circuito en modo común:** Es un lazo cerrado de corriente formado por conductores activos y conductores del sistema de puesta a tierra. Incluye el cable, el aparato y las partes cercanas del sistema de puesta a tierra.

**Circuito en modo diferencial:** Es un lazo cerrado de corriente formado por conductores activos únicamente. Incluye el cable y el aparato conectado en ambos extremos.

**Compatibilidad electromagnética:** Se define como la capacidad de una máquina, aparato o sistema eléctrico o electrónico de operar sin problemas en un entorno electromagnético perturbador, sin perjudicar el funcionamiento de otros componentes del sistema y sin perjudicarse así mismo.

**Conductor de protección o de puesta a tierra de equipo** (Grounding Equipment Conductor): Conductor usado para conectar partes metálicas que no transportan corriente como canalizaciones y gabinetes con el punto neutro o con el conductor del electrodo de puesta a tierra.

**Conductor a tierra.** (Grounding Electrode Conductor): También llamado Conductor del electrodo de Puesta a tierra, es aquel que conecta un sistema o circuito eléctrico intencionalmente a una puesta a tierra.

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

**Conexión equipotencial** (Bonding): Unión permanente de partes metálicas para formar una trayectoria eléctricamente conductora, que asegure la continuidad eléctrica y la capacidad para conducir con seguridad cualquier corriente que pudiera pasar.

**Conexión de puesta a tierra** (Connection, Grounding Terminal o Ground Clamp) : Soldadura exotérmica, lengüeta certificada, conector a presión o de cuña certificados o abrazadera certificada. Elementos que están destinados a asegurar, por medio de una conexión especialmente diseñada, dos o más componentes de un sistema de puesta a tierra.

**Contacto directo:** Es el contacto de personas o animales con conductores activos de una instalación eléctrica.

**Corriente a tierra:** Es una corriente que fluye hacia o desde el terreno o su equivalente.

**Corrientes espurias** (Spurious o Straight o Telluric Currents): Corrientes que circulan en el terreno o en conductores conectados a dos puntos puestos a tierra, sometidos a una diferencia de potencial.

**Corriente de falla a tierra:** Aquella corriente que se presenta durante una falla y que fluye por la puesta a tierra.

**Corrosión:** Ataque a una materia y destrucción progresiva de la misma, mediante una acción química, electroquímica o bacteriana.

**Cortocircuito** (Short Circuit): Fenómeno eléctrico ocasionado por una unión accidental o intencional de muy baja resistencia entre dos o más puntos de diferente potencial de un mismo circuito.

**Dispositivo de protección contra sobretensiones transitorias - DPS** (Surge Protective Device): Dispositivo diseñado para limitar las sobretensiones transitorias y conducir las corrientes de impulso. Contiene al menos un elemento no lineal.

**Equipo electrónico** (Electronic Equipment): Hace referencia a todos los equipos analógicos y digitales compuestos por semiconductores. Incluye a los procesadores de datos, los sistemas de telecomunicaciones, los procesos de medición y control, y otros equipos relacionados con electrónica y sistemas.

**Electrodo de puesta a tierra** (Grounding Electrode): Conductor o grupo de ellos en contacto con el suelo, para proporcionar una conexión eléctrica con el terreno. Puede ser una varilla, un tubo, una placa o un cable, resistentes a la humedad y a la acción química del terreno.

**Máximo potencial de tierra -G.P.R** (Ground Potential Rise): Máxima elevación del potencial de una puesta a tierra con respecto a otra remota, cuando fluye a través de la primera una corriente desde o hacia el terreno.

**Equipotencialidad:** Estado real de interconexión eléctrica, determinado por mediciones, entre partes conductoras.

**Equipotencialización:** Concepto que debe ser aplicado ampliamente en SPT. Indica que todos los puntos deben estar aproximadamente al mismo potencial.

**Equipotencializar** (Bonding): Es el acto, proceso, práctica o acción de conectar partes conductoras 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.

**Impedancia limitadora:** Es una resistencia o una reactancia de potencia, dimensionada adecuadamente para conectar el punto neutro del transformador (o generador) y el punto de puesta a tierra. Su función es proteger el equipo y la instalación, al limitar la corriente de cortocircuito.

**Instalación eléctrica de uso final:** De acuerdo al Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, las instalaciones eléctricas de uso final son las destinadas a la conexión de equipos o aparatos para el uso final de la electricidad en todo tipo de construcciones, ya sean de carácter público o privado. Comprenden los sistemas eléctricos que van desde la acometida de servicio hacia el interior de la edificación o al punto de conexión de los equipos o elementos de consumo. En los casos de instalaciones de propiedad distinta al operador de red, que incluyan subestación, la acometida y la subestación se considerarán como parte de la instalación de uso final.

**Interruptor de falla a tierra (Ground Fault Circuit Interrupter – GFCI or Residual Current Operated devices-RCD):** Interruptor diferencial accionado por corrientes de fuga a tierra, cuya función es interrumpir la corriente hacia la carga cuando se excede algún valor determinado por la soportabilidad de las personas.

**Lazo de tierra (Ground Loop):** Es una trayectoria formada por dos o más equipos interconectados a un mismo sistema de puesta a tierra, con probabilidad de causar interferencia.

**Malla de alta frecuencia (Signal Reference Grid-SRG):** Malla de conductores que se instala bajo el piso de centros de cómputo, para apantallar señales de alta frecuencia y evitar interferencias electromagnéticas.

**Malla de puesta a tierra:** Sistema de electrodos horizontales conformado por conductores desnudos interconectados y enterrados, proporcionando una referencia común para dispositivos eléctricos o estructuras metálicas.

**Masa (Mass, ground or Chassis):** Conjunto de partes metálicas de un equipo, que en condiciones normales, están aisladas de las partes activas y se toma como referencia para las señales y tensiones de un circuito electrónico. Las masas pueden estar o no estar conectadas a tierra.

**Neutro (Neutral o Grounded Service Conductor):** Conductor activo conectado intencionalmente al punto neutro de un transformador o instalación y que contribuye a cerrar un circuito de corriente.

**Poner a tierra (To earth or To ground):** Realizar una conexión eléctrica entre un nodo de una instalación eléctrica y el suelo o terreno. Puede ser intencional o accidental y permanente o temporal.

**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.

**Puesta a tierra (Grounding or Earthing or earth termination system or grounding electrode):** 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 drenar hacia el terreno las cargas originadas en fenómenos de electricidad estática, por su gran riesgo de producir incendios o daños en equipos electrónicos.

**Puesta a tierra de protección contra rayos:** Subsistema de puesta a tierra que debe garantizar la dispersión y disipación en el terreno de las corrientes provenientes de las descargas eléctricas atmosféricas directas sobre la instalación considerada.

**Puesta a tierra permanente o funcional:** Aquella asociada al sistema eléctrico de alimentación o circuito normal de trabajo; sirve tanto para condiciones de funcionamiento normal, como de falla. Pueden ser de subestación, de comunicaciones, de estática, de equipo sensible, de protección contra rayos o requerida por las disposiciones de los fabricantes de equipo electrónico.

**Puesto a tierra (Grounded):** Se refiere a la condición de un sistema, circuito o aparato conectado a tierra intencional o accidentalmente. No deben utilizarse términos como aterrado o aterrizado.

**Punto neutro:** Punto común de un sistema polifásico conectado en estrella o el punto medio puesto a tierra de un sistema monofásico trifilar.

**Red equipotencial** o red de equipotencialización (Earthing Network, bonding network o equipotential bonding network): Conjunto de conductores del SPT que no están en contacto con el suelo o terreno y que conectan sistemas eléctricos, equipos o instalaciones con la puesta a tierra.

**Régimen de conexión a tierra-RCT o Régimen de neutro** (Neutral Point Treatment): Modo de conexión del punto neutro con la puesta a tierra. Normalmente se regula para cada país. En Colombia es TNC-S.

**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): 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 1 m x 1 m x 1 m, medida entre dos caras opuestas. Se da en ohmio metro ( $\Omega.m$ ).

**Shock:** Estado patológico súbito de falla cardio-circulatoria. Entre otras manifestaciones se reconoce por palidez cutánea, sudoración fría, obnubilación mental e hipotensión arterial.

**Sistema:** Conjunto de elementos organizados y relacionados que interactúan entre sí para cumplir una función.

**Sistema de puesta a tierra-SPT** (Earthing or Grounding System): Conjunto de elementos conductores de un sistema eléctrico específico, sin riesgo de interrupción involuntaria, que conectan los equipos eléctricos con el terreno o una masa metálica. Comprende la puesta a tierra y la red equipotencial.

**Sistema flotante:** Sistema eléctrico no puesto a tierra intencionalmente.

**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): Régimen de conexión a una puesta a tierra, sin otra impedancia que la del cable.

**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.

**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 interferencia:** Elevación del potencial de tierra que aparece en los sistemas de tierra de forma permanente, debido a corrientes que circulan por el sistema de puesta a tierra.

**Tensión de Paso** (Step Voltage): Diferencia de potencial que durante una falla se presenta entre dos puntos de la superficie del terreno, separados por un paso (aproximadamente un metro).

**Tensión de malla:** Es la diferencia entre el GPR y la tensión de superficie.

**Tensión neutro-tierra:** Diferencia de potencial en un circuito, entre los conductores de neutro y de puesta a tierra.

**Tensión transferida:** Caso especial de la tensión de contacto donde un potencial es conducido hasta un punto remoto respecto a la subestación o a una puesta a tierra.

**Tiempo de despeje de falla:** Tiempo que transcurre desde el inicio de una falla, hasta el momento en que se desconecte al ser accionado por un dispositivo de protección.

**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. Se le considera como la referencia de potencial de cero voltios en condiciones de operación normal.

**Tierra aislada** (Insulated Grounding Equipment Conductor or Noiseless Earth): Es un conductor de tierra para equipos electrónicos que debe ser aislado y que recorre las mismas conducciones o canalizaciones que los conductores de alimentación.

**Tierra de referencia.** Barraje interno de los equipos electrónicos, que fija el potencial de referencia cero para sus circuitos internos. También se le conoce como tierra lógica o terminal común de circuitos.

**Tierra remota** (Earth Remote) Puesta a tierra lejana, respecto a la puesta tierra considerada, para la cual se asume que su potencial es cero y que no causa interferencia.

**Toma de tierra aislada IGR** (insulated grounding receptacle IGR): Corresponde a los tomacorrientes previstos para la reducción del ruido eléctrico (interferencias electromagnéticas). Se identifican usando un triángulo naranja ubicado en su cara frontal.

**Tomacorrientes con polo a tierra** (Receptacle); 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).

**Zona de protección contra rayos ZPR** (Lightening protection zone): Zona en la que se define el ambiente electromagnético del rayo.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el diseño de instalaciones eléctricas parte de la base de considerar parámetros específicos como cargas lineales y balanceadas [1], entre otros supuestos, que en algún momento sirven para describir los fenómenos eléctricos de una manera mucho más sencilla y al mismo tiempo permiten la simplificación de los cálculos para el dimensionamiento de materiales y equipos. Con la incorporación de cargas no lineales y desbalanceadas (producto del uso masivo de equipos electrónicos), junto con la presencia de rayos, corrientes de falla y la operación de otros equipos, hacen que los sistemas eléctricos deban operar en un ambiente que contiene diversas perturbaciones electromagnéticas. Estas perturbaciones son la causa de problemas en la operación, así como el deterioro de las instalaciones eléctricas y de los equipos conectados a la red de suministro.

Por estas razones, se hace imperativo el estudio de los efectos que la compatibilidad electromagnética causa sobre la adecuada y conveniente operación de los sistemas eléctricos de uso final. El resultado de este análisis permitirá identificar buenas prácticas que se propone deban incorporarse a la etapa de diseño, con el firme propósito de mitigar los efectos adversos en el funcionamiento de la instalación, así como la consolidación de una instalación eléctrica de uso final electromagnéticamente compatible<sup>1</sup>.

En este sentido, uno de los aspectos a considerar y a analizar es el sistema de puesta a tierra –SPT-. Este sistema, como parte esencial de una instalación eléctrica de uso final permite alcanzar una configuración segura y eficiente de la misma. También, se puede considerar como una de las principales herramientas para combatir los problemas de incompatibilidad electromagnética y calidad de la energía al interior de las instalaciones eléctricas de uso final [2].

---

<sup>1</sup> Este conocimiento puede ser obtenido por métodos diversos, incluyendo una inspección de la ubicación prevista, la proyección del tipo de carga en el nuevo proyecto eléctrico, la evaluación técnica de los equipos y sistemas, así como las recomendaciones citadas en estándares y documentos técnicos.

Para alcanzar seguridad, confiabilidad y operatividad de las instalaciones y garantizar el adecuado control sobre los fenómenos de incompatibilidad y calidad de la energía, hay que reorientar los objetivos del SPT, puesto que los equipos y procesos productivos deben continuar en funcionamiento, aun bajo condiciones adversas [3]. De esta manera, el diseño del STP adquiere gran importancia y debe hacerse de forma conveniente desde el principio, con el fin de evitar sobrecostos adicionales, así como problemas operativos [4].

Es por ello, que el objetivo de esta investigación es la identificación de unas buenas prácticas de ingeniería en el diseño de sistemas de puesta a tierra, que permitan mitigar los problemas de incompatibilidad electromagnética al interior de las instalaciones eléctricas de uso final. Para este fin, este documento expone; en primer lugar (Capítulo 1), los estándares técnicos y normativos que sirvieron de soporte para esta investigación. A continuación se describen los problemas de incompatibilidad electromagnética y las prácticas de diseño del sistema de puesta a tierra recomendadas para mitigarlos en: equipos electrónicos (Capítulo 2), sistemas de protección contra rayos SIPRA (Capítulo 3) y sistemas de potencia (Capítulo 4). Finalmente en el capítulo 5, se presentan las conclusiones, recomendaciones y propuestas a futuro.

## **1. CRITERIOS LEGALES, NORMATIVOS Y TÉCNICOS.**

### **1.1. Perspectiva general.**

Los criterios legales, normativos y técnicos son establecidos para definir las metodologías básicas para el diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento de cualquier proyecto de ingeniería. A través de estos criterios se identifican las exigencias mínimas de obligatorio cumplimiento para garantizar la seguridad, eficiencia y calidad del producto. Del mismo modo, esos aspectos proporcionan las herramientas legales para la fiscalización de aquellos que incumplan estos requisitos mínimos.

Este capítulo está enfocado a identificar los principales estándares, normas y reglamentos en los que se definen los alcances técnicos, temáticos y legales relacionados con la CEM<sup>2</sup>, como soporte para el diseño, desde la perspectiva vigente en Colombia y en el mundo. Para ello, en la sección 1.2 se describirán las normas y reglamentos relacionados con CEM en Colombia. Enseguida, en la sección 1.3, se enumeran las normas internacionales relacionadas con CEM. En lo que respecta con la normativa relacionada con los Sistemas de Puesta a Tierra, en el numeral 1.4 se revisan las publicaciones nacionales, y finalmente en la sección 1.5 se especifican las normas relacionadas con CEM de implicación directa sobre los sistemas de puesta a tierra.

### **1.2. Reglamentación y normas relacionadas con CEM en Colombia.**

El Ministerio de Minas y Energía, como máxima autoridad en materia energética en nuestro país, establece el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) como el documento que rige el diseño, instalación, montaje, operación y mantenimiento de las instalaciones eléctricas. La más reciente actualización corresponde a la Resolución No. 18 1294 de Agosto 06 del 2008 y en él se especifican las diferentes condiciones y parámetros de diseño que se deben cumplir en una instalación eléctrica de uso final, con el objetivo de garantizar el adecuado funcionamiento de las instalaciones y la seguridad de quienes las operan.

---

<sup>2</sup> CEM: Compatibilidad Electromagnética.

El RETIE desde la perspectiva de la CEM, presenta un avance significativo con la inclusión del Artículo 6°. Análisis de compatibilidad electromagnética. En este artículo se dan algunas definiciones importantes relacionadas con la compatibilidad electromagnética. Adicional a esto, el Artículo 15°. Puestas a tierra, expresa textualmente: *“Los objetivos de un sistema de puesta a tierra (SPT) son: La seguridad de las personas, la protección de las instalaciones y la compatibilidad electromagnética.”* De esta manera, además de darle importancia a la seguridad de las personas y las instalaciones, incluye la relación directa del sistema de puesta a tierra con la compatibilidad electromagnética de la instalación, representando una herramienta para la mitigación de las perturbaciones electromagnéticas que generan dificultades en la operación de los equipos y riesgo eléctrico sobre las personas.

Por su parte, el Instituto Colombiano de Normas Técnicas –ICONTEC- con el fin de estructurar una base técnica en torno al tema de compatibilidad electromagnética y calidad de la energía, ha publicado normas en las que han revisado algunos estándares internacionales tales como IEEE e IEC y se han estructurado conforme al modelo colombiano. A continuación se relaciona el trabajo del ICONTEC:

1. NTC 5000 Calidad de la potencia eléctrica CPE. Definiciones y términos fundamentales. ICONTEC. 2002.
2. NTC 5001 Calidad de la potencia eléctrica, límites y metodología de evaluación en punto de conexión común. ICONTEC. 2008.
3. NTC-IEC 61000-1-1 Compatibilidad electromagnética CEM parte I Generalidades. Sección 1. Aplicación y presentación de definiciones y términos fundamentales. ICONTEC. 2000.

Estas normas brindan importantes definiciones, además de un soporte técnico para establecer estándares de calidad de la energía, pero no especifican prácticas de ingeniería orientadas a la mitigación de los problemas de incompatibilidad electromagnética.

### 1.3. Normas internacionales relacionadas con CEM.

En el ámbito Internacional se han presentado grandes avances con relación a la identificación, estudio, medición y la estructuración de lineamientos de mitigación frente a los parámetros que generan incompatibilidad electromagnética en una instalación eléctrica. El principal comité normativo a nivel internacional que ha tratado el tema de la CEM es la Comisión Electrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission - IEC), con las siguientes publicaciones:

- IEC 61000-Electromagnetic compatibility (EMC).
- IEC CISPR 16 - Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods.

La norma IEC 61000. Se encuentra dividida en nueve partes, pero hasta ahora han sido publicadas seis, que son:

1. General.
2. Environment.
3. Limits.
4. Testing and measurement techniques.
5. Installation and mitigation guidelines.
6. Generic standars.

La norma IEC CISPR 16. Se encuentra dividida en cuatro partes:

1. Instrumentos de medición.
2. Métodos de medición.
3. Recomendaciones e informes técnicos de CISPR.
4. Incertidumbre de las mediciones.

Por otra parte, las normas de algunos comités como la NFPA<sup>3</sup>, CENELEC<sup>4</sup>, AENOR<sup>5</sup> y la EC<sup>6</sup> son establecidas por comités regionales que toman como

---

<sup>3</sup> NFPA. National Fire Protection Association.

referencia las publicaciones de las normas IEC, reflejando la importancia que le ha dado a la CEM la Comunidad Europea no solo en el escenario industrial sino, en gran cantidad de equipos como electrodomésticos, máquinas de baja tensión e instalaciones eléctricas de uso final. Así mismo, en julio de 2007 en el Reino Unido y Europa se dio un gran paso con la inclusión en la versión de borrador de la EMC Directive 2004/108/EC (y recientemente en abril de 2010 la versión revisada), en la que por primera vez se incluyen requisitos legales y estándares técnicos específicos no solo para equipos sino también para instalaciones, incluyendo la documentación sobre CEM. Esta normativa derogaba la anterior EMC 89/336/CEE Directive, segunda edición y sus modificaciones. En esta última versión de la directiva, aunque aún no se establece ninguna obligación jurídica para la construcción de instalaciones eléctricas, la mayoría de los usuarios sí tienen la obligación legal con respecto a ellas.

De acuerdo con la directiva CEM de la UE 89/336/CEE (modificada por las Directivas 91/263/CEE, 92/31/CEE, 93/68/CEE, 93/97/CEE), cualquier instalación eléctrica en edificios o construcciones también tiene que coincidir con las normas internacionales sobre la susceptibilidad de la CEM y de emisión. La persona o personas responsables del diseño, mantenimiento, construcción y montaje e instalación se convierten ahora en el "fabricante", que hasta hacía pocos años era el que construía equipos eléctricos y electrónicos.

#### **1.4. Normas y reglamentos en Colombia asociados con los SPT<sup>7</sup>.**

El RETIE en el capítulo II, especifica tanto en el Artículo 8° “Requerimientos generales de las instalaciones eléctricas” numeral 8.1, como en el Artículo 15° “Puesta a tierra”, el diseño del SPT como uno de los requerimientos de cualquier instalación eléctrica de uso final.

Por otra parte, el ICONTEC especifica aspectos relacionados con el diseño a través de la NTC 2050 Código Eléctrico Colombiano, en la sección 250 “PUESTA A TIERRA” y brinda información relevante en cuanto a la configuración y requisitos de los SPT y conexiones equipotenciales en las series:

- ✓ NTC 4552. Protección contra descargas eléctricas atmosféricas.

---

<sup>4</sup> CENELEC. Comité Europeo de Normalización Electrotécnica.

<sup>5</sup> AENOR. Asociación Española de Certificación y Normalización.

<sup>6</sup> EC American Standard Code for Information interchange.

<sup>7</sup> SPT: Sistemas de Puesta a Tierra.

- ✓ NTC 4628. Calificación de conexiones permanentes usadas en puestas a tierra en subestaciones.
- ✓ NTC 4171. Telecomunicaciones. Nuevas tecnologías. Requisitos para la conexión y continuidad de tierra para telecomunicaciones en construcciones comerciales.
- ✓ NTC 2155. Conectores de potencia para subestaciones eléctricas.
- ✓ NTC 2206. Equipo de conexión y puesta a tierra.

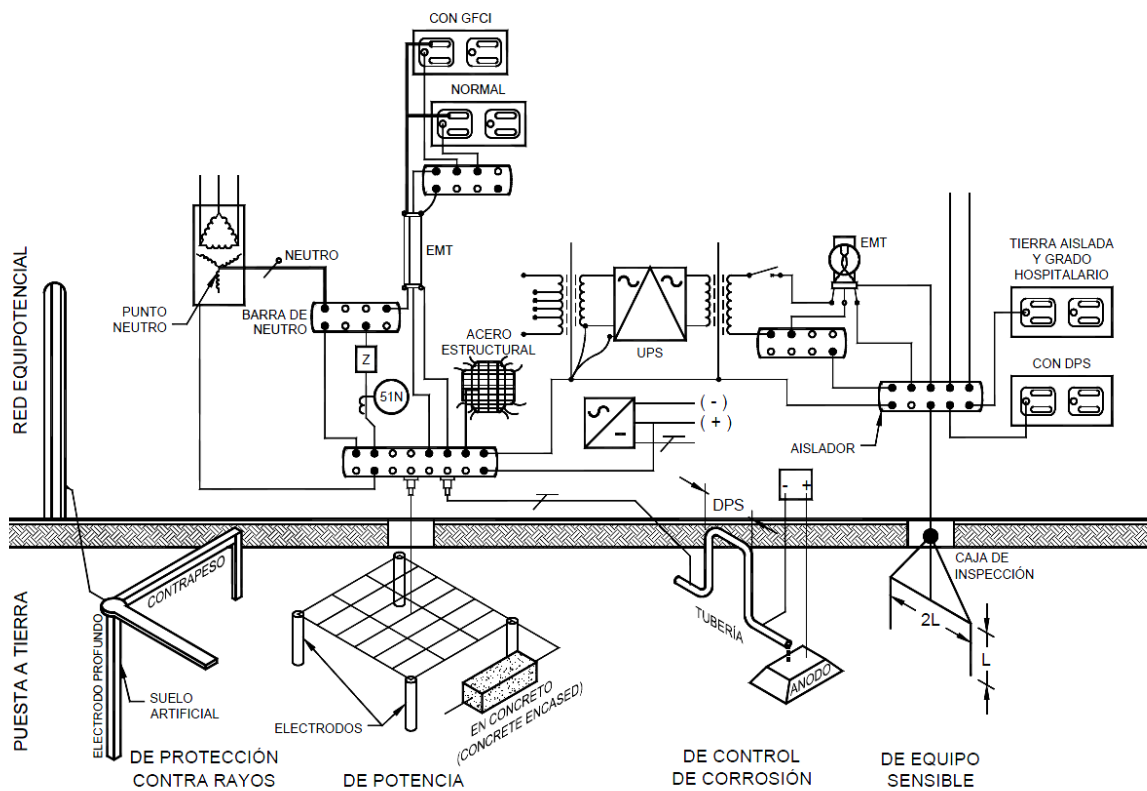
Adicionalmente el ICONTEC, respondiendo a la necesidad de desarrollar una norma técnica específica sobre este tema, desarrolla el Proyecto de Norma Técnica en SPT 389/03, el cual se encuentra en estudio y está presentado de la siguiente manera:

1. Capítulo I : OBJETO
2. Capítulo II : DEFINICIONES
3. Capítulo III : GENERALIDADES
4. Capítulo IV : CRITERIOS DE SEGURIDAD
5. Capítulo V : MEDICIÓN Y MODELAMIENTO DEL SUELO
6. Capítulo VI : DISEÑO
7. Capítulo VII : MATERIALES
8. Capítulo VIII : CONSTRUCCIÓN
9. Capítulo IX : MEDICIONES EN UN SPT
10. Capítulo X : MANTENIMIENTO DE UN SPT
11. Capítulo XI : MEJORAMIENTO DE UN SPT

Todos los documentos relacionados en los párrafos anteriores, representan un gran avance en Colombia en el ámbito de los sistemas de puesta a tierra, brindando una serie de recomendaciones y buenas prácticas que deben tenerse en cuenta durante su planeación, diseño, construcción, puesta en marcha y mantenimiento. Aunque no profundizan en prácticas enfocadas a mitigar los fenómenos que causan incompatibilidad electromagnética en las instalaciones eléctricas de uso final, tanto el RETIE como la NTC 2050 y el proyecto de norma técnica en sistemas de puesta a tierra NTC 389-3 referenciada como [5], reconocen la aplicación de los sistemas de puesta a tierra en diferentes escenarios (Ver Figura 1), permitiendo clasificarlos de la siguiente manera:

1. SPT equipos sensibles.
2. SPT de sistemas de potencia.
3. SPT de protección contra rayos.
4. SPT de control de corrosión.

**Figura 1. Elementos y clasificación de los SPT.**



Fuente: [5]. NTC 389-3.

Esta clasificación está ligada a la función que debe cumplir el SPT en cada escenario, y concuerda con la estructuración de estándares internacionales publicados en torno a cada tipo de SPT.

Teniendo en cuenta que el principal objetivo de este documento es establecer buenas prácticas de ingeniería con el fin de diseñar instalaciones eléctricas de uso final que sean compatibles con su entorno electromagnético, este documento se

enfocará en los primeros tres tipos de SPT<sup>8</sup>, haciendo de lado los SPT de control de corrosión ya que no se considera dentro de los alcances de una instalación eléctrica de uso final y adicionalmente no se identificaron documentos técnicos en cuanto a su diseño, relacionados con la compatibilidad electromagnética.

### **1.5. Normas relacionadas con CEM a nivel internacional asociadas con los SPT.**

De acuerdo con los escenarios de aplicación de los sistemas de puesta a tierra mencionados en el numeral anterior, en el presente trabajo de grado se abordan las siguientes normas internacionales:

- IEEE Std. 1100 Esmerald Book. Powering and grounding electronic equipment.

En los capítulos 3 y 4 este estándar se indica cómo se deben aterrizar los equipos electrónicos. Así mismo, en la sección 9.9 se profundiza en las configuraciones recomendadas para las instalaciones de telecomunicaciones y centros de cómputo, teniendo en cuenta su susceptibilidad a los problemas calidad de la energía e incompatibilidad electromagnética debido a las prácticas de cableado de SPT habituales.

- IEEE Std. 142 Green Book. Grounding of industrial and commercial power systems.

Además de incluir en el capítulo 5 buenas prácticas en el diseño de SPT de equipos electrónicos, este estándar hace énfasis en cómo se deben aterrizar los sistemas de potencia con el fin de evitar los problemas de cargas estáticas. Del mismo modo en él se aborda el tema de protección respecto a descargas atmosféricas y fenómenos de incompatibilidad electromagnética que afectan seriamente las instalaciones eléctricas.

---

<sup>8</sup> SPT Sistema de puesta a tierra.

- IEEE Std. 80-2000. Guide for Safety in AC substation grounding.

Este estándar corresponde a uno de los documentos más relevantes en el diseño de sistemas de puesta a tierra en el continente americano. El propósito del mismo, es brindar información pertinente y establecer parámetros de diseño de SPT para subestaciones de corriente alterna orientados a la seguridad de las instalaciones eléctricas. Para el alcance de este trabajo de grado, en el que se abordan únicamente las instalaciones de uso final no será contemplada.

- IEC 60364 2011 Low-voltage electrical installations –Part 5-54: Selection and erection of electrical equipment – Earthing arrangements and protective conductors
- IEC 62305 Protection against lightning – Part 4: Electrical and electronic systems within structures

En estas normas IEC se aborda los mecanismos de mitigación de las perturbaciones asociadas al IER<sup>9</sup>, este último como el principal causante de incompatibilidad electromagnética en un sistema de puesta a tierra de protección contra rayos.

Es de anotar que aunque el alcance principal de estos estándares no es la CEM<sup>10</sup>, presentan un consenso de buenas prácticas, enfocadas a lograr la seguridad y un buen desempeño de las instalaciones eléctricas y los equipos en su interior, tratando inherentemente los problemas de incompatibilidad electromagnética. De esta manera, a partir de la documentación técnica se identificaran prácticas de ingeniería en el diseño de SPT enfocadas a la compatibilidad electromagnética.

---

<sup>9</sup> IER: Impulso Electromagnético del Rayo. -LEMP-“Lightning Electromagnetic Impulse”.

<sup>10</sup> CEM: Compatibilidad Electromagnética.

## **2. PROBLEMAS QUE GENERAN IEM<sup>11</sup> EN LOS EQUIPOS ELECTRÓNICOS Y PRÁCTICAS EN EL DISEÑO DEL SPT<sup>12</sup> PARA MITIGARLOS.**

En este capítulo, luego de una descripción de las características de los equipos electrónicos y la sensibilidad a las perturbaciones electromagnéticas (Secciones 2.1 y 2.2.), se expondrán los escenarios en los cuales se generan estas perturbaciones y de qué manera afectan la operación de los equipos electrónicos (Sección 2.3.). A continuación se abordarán las prácticas de diseño de los SPT, orientadas a la atenuación de las perturbaciones que generan incompatibilidad electromagnética (Sección 2.4). Finalmente, en la Sección 2.5 se expondrán las consideraciones especiales necesarias para un correcto dimensionamiento de los conductores de equipotencialización.

### **2.1. Equipos electrónicos y su sensibilidad a las perturbaciones electromagnéticas.**

El desarrollo de los sistemas electrónicos, ha desencadenado un cambio radical en la naturaleza de las cargas presentes en las instalaciones eléctricas de uso final. En el entorno industrial encontramos aplicaciones de control basadas en microprocesadores, PLC's, variadores de velocidad y en general sistemas que operan utilizando variables digitales y sensores, y demás equipos electrónicos. En el sector comercial nos encontramos con los computadores personales (PCs), máquinas de fax, fotocopiadoras, iluminación electrónica tipo LED y fluorescente<sup>13</sup>, así como equipos de telecomunicaciones. Incluso en el sector residencial, se observa el desarrollo de equipos electrónicos en cada habitación que van desde juguetes hasta las herramientas de cocina, ordenadores personales, Smartphone, tabletas, sistemas de entretenimiento doméstico, consolas de vídeo juegos, videograbadoras, reproductores de DVD, y relojes digitales entre otros.

Estos sistemas electrónicos presentes en cualquier tipo de instalación eléctrica de uso final utilizan señales con niveles de potencia muy bajos, lo cual los hace susceptibles a tensiones muy por debajo de los niveles perceptibles por los seres

---

<sup>11</sup> IEM: Interferencia Electromagnética. Para más claridad sobre aspectos de la compatibilidad electromagnética consulte el Anexo A.

<sup>12</sup> SPT: Sistemas de puesta a tierra.

<sup>13</sup> La iluminación fluorescente y tipo LED son cargas lineales muy comunes al interior de las instalaciones eléctricas de uso final.

humanos y que no tienen ningún efecto sobre los equipos de potencia eléctrica. Por ejemplo, el equipo electrónico más moderno, es altamente sensible a cargas estáticas de tensión generadas por los seres humanos mediante movimientos simples del cuerpo. Por otra parte, las corrientes inyectadas en la tierra por efecto de las descargas atmosféricas pueden causar serios daños en los equipos electrónicos, incluso si la descarga se presenta a varios kilómetros, a menos que exista un mecanismo de mitigación. En el ANEXO B se presenta la tolerancia de aplicaciones electrónicas en tecnologías de la información, con respecto a perturbaciones asociadas a la calidad de la energía.

Debido al gran número de problemas de incompatibilidad electromagnética presentados en los equipos sensibles<sup>14</sup>, durante los últimos años se ha incrementado notablemente el interés en el diseño de sistemas eléctricos eficientes y seguros que involucren este tipo de cargas. Este interés se ve materializado después de la puesta en marcha de la instalación, pues es en este momento cuando los problemas en los equipos empiezan a ocurrir, situación que en muchos casos genera prácticas improvisadas e inseguras que siguen sin resolver los problemas de operación.

Con el fin de dar solución a esta problemática, se ha encontrado que una adecuada conexión a tierra permite enfrentar los problemas de calidad de la energía y en general mitigar las perturbaciones electromagnéticas en los equipos y sistemas electrónicos, manteniendo la seguridad de la instalación [2], pues el sistema de puesta a tierra SPT, además de ser un requerimiento de seguridad, cumple el papel de referenciar los sistemas electrónicos.

## **2.2. Unidades de los equipos electrónicos que son conectadas a tierra.**

Generalmente al interior de los equipos electrónicos, pueden definirse los siguientes tipos de sistemas<sup>15</sup> para ser aterrizados:

a) *Tierra de referencia de señal*: El sistema de referencia cero para las líneas de datos y para señales en general, es uno de los sistemas que es sensible a las

---

<sup>14</sup> Debido a la susceptibilidad de los equipos electrónicos a las perturbaciones electromagnéticas, son considerados equipos sensibles.

<sup>15</sup> Sistema: Conjunto de elementos organizados y relacionados que interactúan entre si para cumplir una función.

tensiones transitorias y requiere un punto de referencia estable, con respecto a un a una tensión de referencia.

b) *Tierra de referencia de alimentación DC*: Los equipos electrónicos pueden poseer componentes que trabajan a diferentes niveles de tensión DC como: 12 V/0 V/-12V, 5V/0 V /-5 V, 3V/0 V /-3 V.

c) *Tierra del chasis*: Esta corresponde a la caja metálica, o cubierta, de los equipos electrónicos. Esto puede incluir la cubierta de los elementos del equipo electrónico, así como el recinto externo o armario. Algunos fabricantes de equipos electrónicos se refieren a la tierra de chasis como la barra de tierra de seguridad.

### **2.3. IEM<sup>16</sup> en los equipos electrónicos originada por malas prácticas de cableado del SPT<sup>17</sup>.**

#### **2.3.1. Múltiples conexiones del conductor de tierra.**

Teniendo en cuenta los requerimientos de seguridad consignados en el NEC [6] y adaptados en Colombia por el Código Eléctrico Colombiano [7], los equipos electrónicos comenzaron a ser conectados a tierra. Inicialmente fueron equipontencializados<sup>18</sup> al SPT de los equipos de potencia de la construcción o la instalación donde estaban ubicados. El conductor de tierra de los equipos electrónicos EGC<sup>19</sup> bien podía ser un conductor verde aislado o desnudo. En muchos casos, los ductos metálicos se utilizaban como EGC. Bajo estas condiciones la tierra de los equipos terminaba conectada al conductor de tierra (conectado al neutro en el tablero principal), que ingresa al edificio junto con los conductores de alimentación.

---

<sup>16</sup> IEM: Interferencia electromagnética; mal funcionamiento de un sistema. Para más detalles ver ANEXOS

ANEXO A.

<sup>17</sup> SPT: Sistema de puesta a tierra.

<sup>18</sup> Ver definición de equipotencializar, en el glosario.

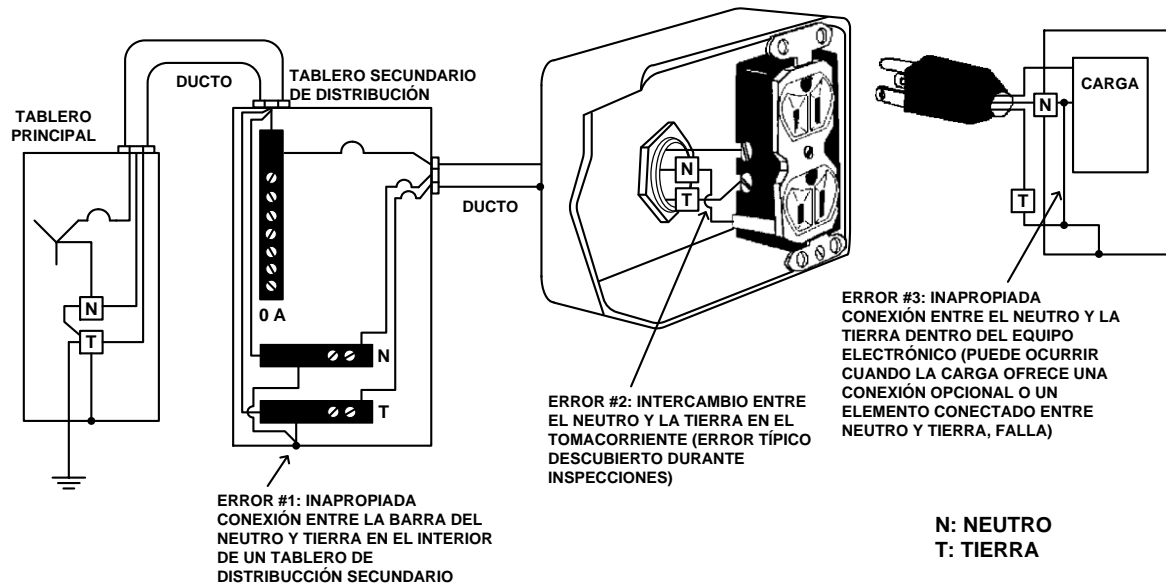
<sup>19</sup> EGC (Equipment Grounding Conductor): Conductor de puesta a tierra de equipos.

Ya que no existía un requerimiento particular sobre a qué parte del SPT de potencia debían conectarse los equipos electrónicos, las conexiones al conductor de tierra fueron hechas generalmente en la clavija, tomacorriente o en el panel que alimentaba al equipo electrónico. Esta configuración cumplía con los requerimientos de la NTC 2050 [7] sección 250, en donde se especifica que nadie puede estar expuesto a un choque eléctrico al tocar la carcasa de un equipo bajo condiciones de falla de fase a tierra. A medida que los equipos electrónicos se hacían más complejos y sensibles a tensiones más pequeñas, se encontró que tensiones transitorias generadas por las múltiples conexiones del conductor de tierra, podían ser nocivas y causar serios daños en los elementos electrónicos [2].

### 2.3.2. Múltiples conexiones neutro–tierra.

A pesar de que la NTC 2050 [7], exige que el neutro de una instalación eléctrica debe conectarse a tierra únicamente en el tablero de distribución principal de la construcción o en el secundario de un sistema derivado, tal como un transformador de aislamiento; es muy común encontrar en instalaciones con malas prácticas de cableado, múltiples conexiones del conductor neutro a tierra, permitiendo que una parte de la corriente de la carga fluya a través del SPT al que está referenciado. Esta situación genera tensiones y corrientes parasitas nocivas para el desempeño de los equipos, causando errores o lentitud en la transferencia de datos, bloqueo de equipos y daños en los puertos de entrada/salida.

Figura 2. Errores típicos de cableado en circuitos ramales.



Fuente: [2]. IEEE Std. 1100.

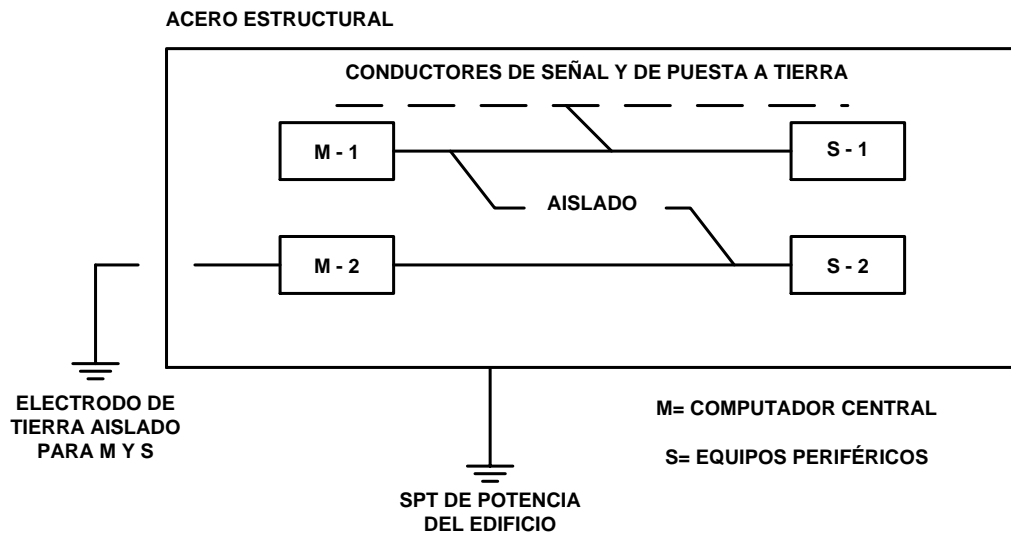
En la Figura 2, se muestran algunos errores típicos de cableado que generan tensiones y corrientes parasitas, a tierra. El error 1, muestra uniones neutro-tierra tales como un conductor, que de forma descuidada conecta el barraje del neutro con la carcasa de un tablero de distribución aguas abajo del tablero principal, permitiendo el desvío de la corriente normal de la carga a través del SPT. El error 2, describe otra fuente de corrientes parasitas, a partir de una inversión entre el neutro y la tierra dentro de un tomacorriente.

En el error 3, expone el caso en el que errores de cableado o averías al interior de los equipos, crean una conexión neutro tierra que generara corrientes parasitas.

### 2.3.3. Tierra aislada o separada IG<sup>20</sup>.

Teniendo en cuenta que la conexión de la puesta a tierra de potencia de la instalación causa mal funcionamiento y fallas en los equipos electrónicos, la solución lógica fue no usar este sistema para aterrizar los equipos electrónicos específicos.

Figura 3. Configuración tierra aislada.



Fuente: [8]. IEEE Std. 142.

<sup>20</sup> IG (Insulated Grounding), representa un sistema de tierra aislado, no permitido por [7].

Una posible falta de comprensión de la función y operación del conductor neutro y del SPT por parte de los fabricantes de equipos sensibles, los llevo a incurrir en requerimientos de instalación erróneos. Por ejemplo, se especificó que los equipos electrónicos se aterrizarán a una malla de tierra aislada, conformada por uno o más electrodos (aislados del SPT de potencia) como lo indica la Figura 3. Esta malla debía ubicarse a pocos metros del edificio y con una resistencia de puesta a tierra que oscilaba entre los 10 hasta 30 Ohm o más [8]<sup>21</sup>. Esta configuración, aunque reduce el ruido proveniente del SPT de potencia, introduce graves problemas de operación y seguridad debido a la impedancia adicional introducida en el circuito. A continuación, se explicarán con mayor detalle estos problemas de operación y seguridad por causa de la impedancia introducida por la exigencia ejemplo.

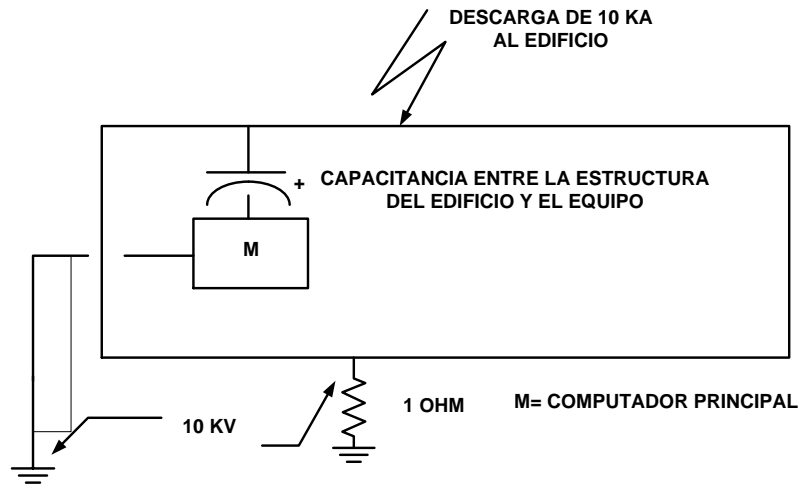
- **Diferencias de potencial**

La separación de los electrodos es responsable de altas tensiones inducidas en los componentes electrónicos durante condiciones de tormenta y de descarga a tierra de rayos. Debido a la resistencia del SPT de la instalación, el potencial de la construcción se puede elevar a niveles substancialmente altos por encima del potencial de los equipos electrónicos, que se mantienen al nivel del sistema de tierra aislado (ver Figura 4). De acuerdo a la referencia [8] IEEE Std 142, la diferencia de potencial debida a campos electrostáticos y descargas atmosféricas puede llegar a ser de hasta cientos de volts entre la construcción y un SPT aislado a 1 m del edificio. Esta diferencia de potencial y la capacitancia entre los equipos electrónicos y la estructura de la construcción, pueden inducir en los componentes de los equipos electrónicos potenciales que pueden estar muy por encima de sus tensiones admisibles.

---

<sup>21</sup> El ejemplo citado, es tomado del estándar IEEE Std. 142 Green Book que corresponde a la referencia [8].

**Figura 4. Diferencias de potencial entre la estructura de la construcción y los equipos electrónicos.**



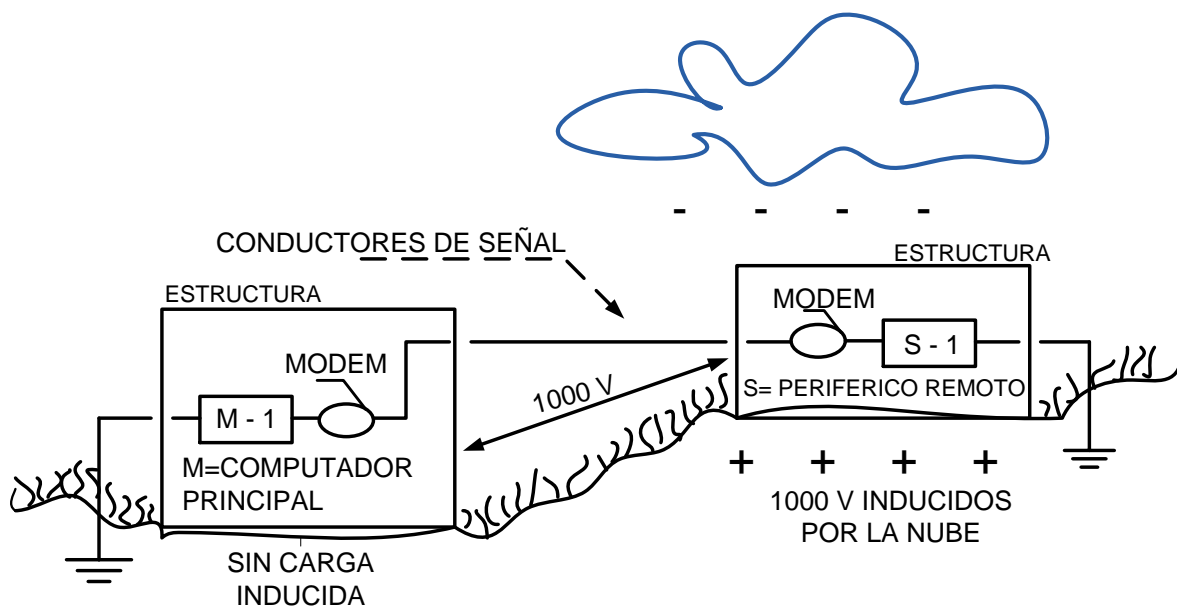
Fuente: [8]. IEEE Std. 142.

De forma similar cuando existen unidades, componentes o periféricos remotos<sup>22</sup>, ubicados en una edificación separada de la principal (ver Figura 5), conectados a una tierra aislada en su ubicación, la presencia de nubes cargadas puede inducir potenciales destructivos (sin la presencia de descargas) entre el equipo remoto y el equipo principal ([8] IEEE Std. 142).

---

<sup>22</sup> Elemento de un sistema electrónico que se sitúa alejado del ordenador principal.

Figura 5. Diferencias de potencial en equipos remotos.



Fuente: [8]. IEEE Std. 142.

- **Operación de las protecciones.**

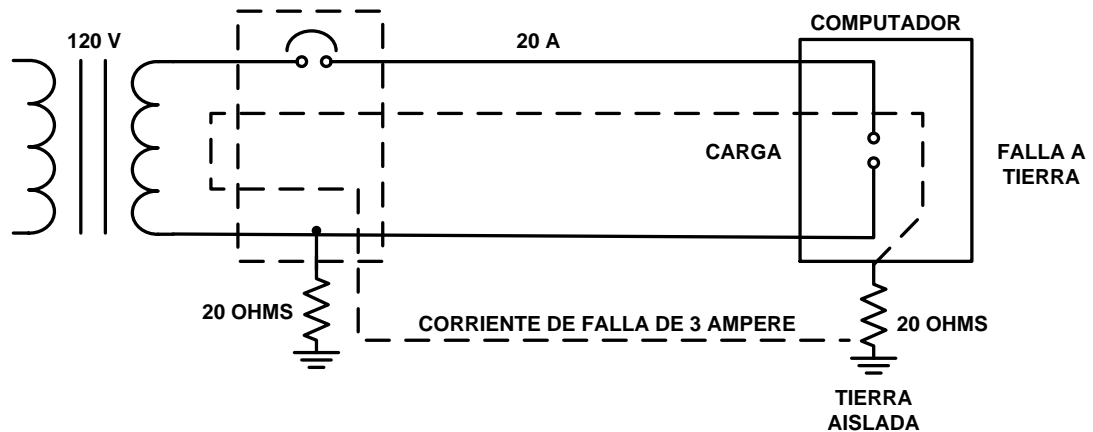
Adicionalmente, la instalación de un sistema de puesta a tierra aislado, genera graves problemas cuando ocurre una falla a tierra en el equipo remoto a través de su carcasa. Con el electrodo de puesta a tierra aislado, una falla en el equipo remoto requiere que la corriente de falla fluya hacia la fuente de señal o de alimentación, a través de la resistencia en serie tanto del SPT aislado, como el instalado para la unidad principal. Suponiendo que tanto la resistencia de puesta a tierra de la unidad principal como la de la unidad remota es  $20 \text{ Ohm}^{23}$  (Ver Figura 6), cuando ocurra una falla a tierra un periférico remoto conectado a  $120 \text{ V}$ ; la corriente de falla que circulara por el lazo de será de  $3 \text{ A}$  ( $120\text{V}/40 \text{ Ohm}$ ). Esta magnitud será insuficiente incluso para operar un elemento de protección de  $15 \text{ A}$ .

---

<sup>23</sup> Este valor corresponde al ejemplo mencionado por el estándar IEEE Std. 142 Green book [8] en la sección 5.5.3.5.

Claramente, cuando se utiliza un SPT aislado para los equipos electrónicos, se incurre en una violación de los requerimientos del Código Eléctrico Colombiano sección 250-23 y el NEC [6], ya que se requiere que todos los equipos alimentados por una fuente eléctrica estén unidos o conectados a tierra en el punto de la puesta a tierra de la fuente [8].

**Figura 6. Problemas en la operación de protecciones con configuraciones aisladas del SPT.**



Fuente: [8]. IEEE Std. 142.

#### 2.3.4. Problemas de referencia en los equipos electrónicos.

En la práctica, los requerimientos para conectar a tierra los equipos electrónicos de forma segura están más claros, que los requerimientos necesarios para que tengan una referencia efectiva y operen de forma adecuada. El hecho de no dedicar una especial atención a estos últimos requerimientos durante el diseño del SPT de los equipos electrónicos, puede generar graves problemas en la operación de los mismos a pesar de cumplir con los requisitos de seguridad.

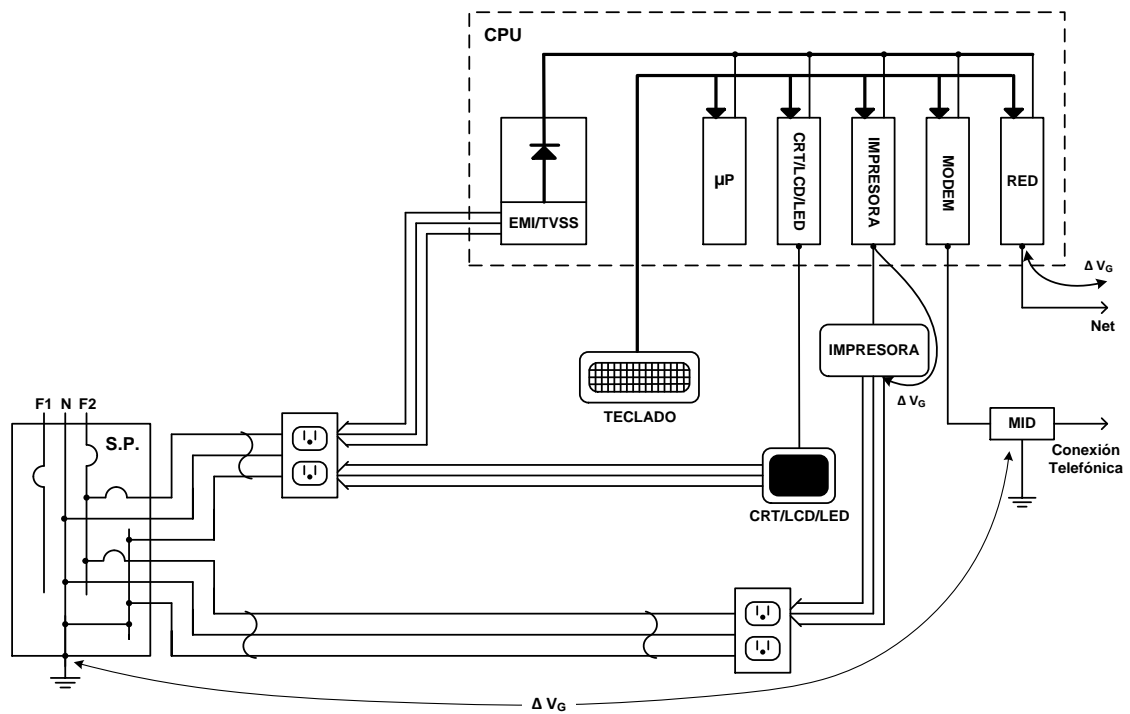
Tres escenarios en particular tienden a experimentar un mayor número de problemas relacionados con la referencia de los sistemas electrónicos, presentando daños y operaciones indeseables en el procesamiento de datos, más que en otras circunstancias (IEEE Std. 1100 [2]).

- **Escenario 1: Periféricos de un sistema interconectados por cables de datos o control y alimentados desde diferentes puntos del sistema de alimentación.**

Este escenario hace referencia a las perturbaciones presentes cuando diferentes componentes de un sistema (computador, impresora, red de datos y procesos industriales de control, entre otros), están interconectados por cables de datos,

pero alimentados desde diferentes puntos del sistema de alimentación (ramales, tableros de distribución o en el peor caso, diferentes alimentadores de la construcción), dentro de la misma instalación eléctrica de la edificación. La Figura 7 ejemplifica esta situación, mostrando una impresora, referenciada a tierra con otro componente del sistema como el computador, a través de la línea de datos y al mismo tiempo tanto el computador como la impresora están alimentados por diferentes circuitos ramales o por diferentes puntos del sistema de alimentación.

**Figura 7. Computador y las interfaces de periféricos con el cableado y las rutas de circuito de referencia de puesta a tierra.**



Fuente: [2]. IEEE Std. 1100.

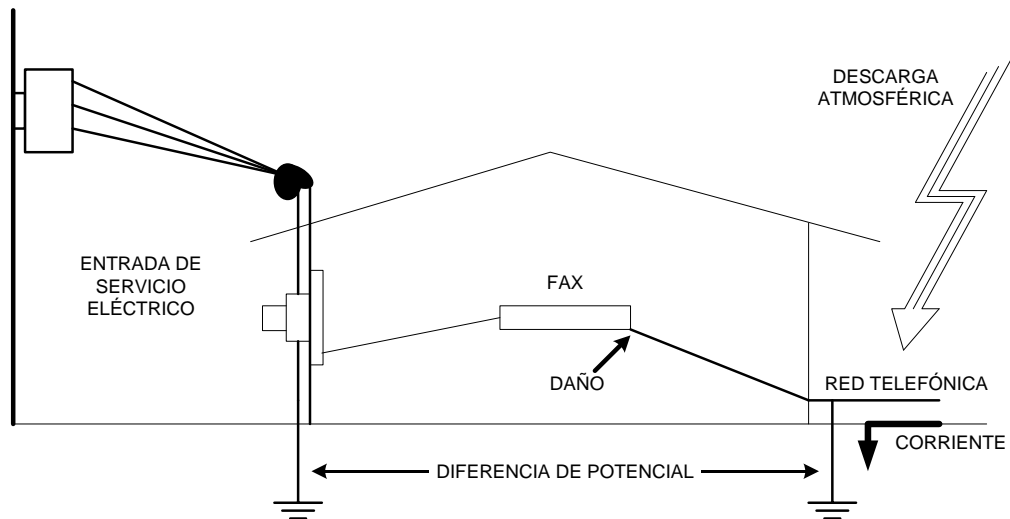
Este escenario, es a menudo vulnerable a diferencias en los niveles de referencia a tierra entre componentes ya que el enlace de datos (conductores de señal entre los periféricos) puede tener uno o ambos extremos conectados al chasis de los equipos. Con ambos extremos puestos a tierra, corrientes transitorias o continuas pueden fluir a través del enlace. Con un solo extremo conectado, aparecerán tensiones estáticas o transitorias en el otro extremo. Estas condiciones causan problemas en la transferencia de datos, durante eventos transitorios tales como sobre tensiones o sobre corrientes en los conductores de tierra.

- **Escenario 2. Equipo electrónico conectado a más de una redes externas con diferentes referencias.**

En este escenario, un equipo electrónico (como un modem o un computador) está referenciado a más de un sistema externo (tales como redes telefónicas, TV cable, redes LAN<sup>24</sup> e incluso los circuitos de alimentación) generando tensiones o corrientes transitorias entre estos sistemas. Mantener todos los elementos en el mismo nivel de referencia, es especialmente difícil si las unidades remotas están aterrizadas en diferentes sitios y entran a la edificación o al área donde están los equipos desde diferentes ubicaciones. Esta situación hace que el equipo electrónico experimente tensiones y corrientes transitorias y perturbaciones que generan lentitud en la transferencia de datos, reinicio, bloqueo y daños en los equipos.

La Figura 8 muestra el ejemplo típico de la exposición a tensiones transitorias para una máquina de fax conectada a la red telefónica y a la red de suministro de energía.

**Figura 8. Daño en un fax, debido al impacto de una sobretensión transitoria en la red telefónica.**



Fuente: [2]. IEEE Std. 1100.

<sup>24</sup> LAN: Local Area Networks.

- **Escenario 3. Sistema de procesamiento electrónico con conductores de alimentación, líneas de datos o control, expuestos a corrientes parásitas.**

En este escenario, el problema ocurre cuando varios componentes de un sistema de procesamiento (computador, impresora, red de datos, servidores), están físicamente separados pero interconectados a través de cables de datos y alimentados por diferentes circuitos ramales del mismo sistema eléctrico. Esta conexión genera en los conductores de alimentación o de datos, corrientes parásitas que ingresan a través de las uniones con el SPT de potencia y red de equipotencialización, o las conexiones entre la tierra de señal de los conductores de datos y los apantallamientos. Por ejemplo, un cable RS-232<sup>25</sup> de una impresora o los blindajes de una red de cables coaxiales aterrizados en ambos extremos.

Estas corrientes de tierra parásitas y el ruido de modo común entre los componentes del sistema, acarrea ya sea diferencias de potencial o interferencia electromagnética en la comunicación de los datos. Estas corrientes son más comunes cuando los circuitos ramales alimentan una variedad de equipos electrónicos junto con otros equipos y hay poco o ningún control sobre el tipo y el estado de los otros equipos que comparten los circuitos.

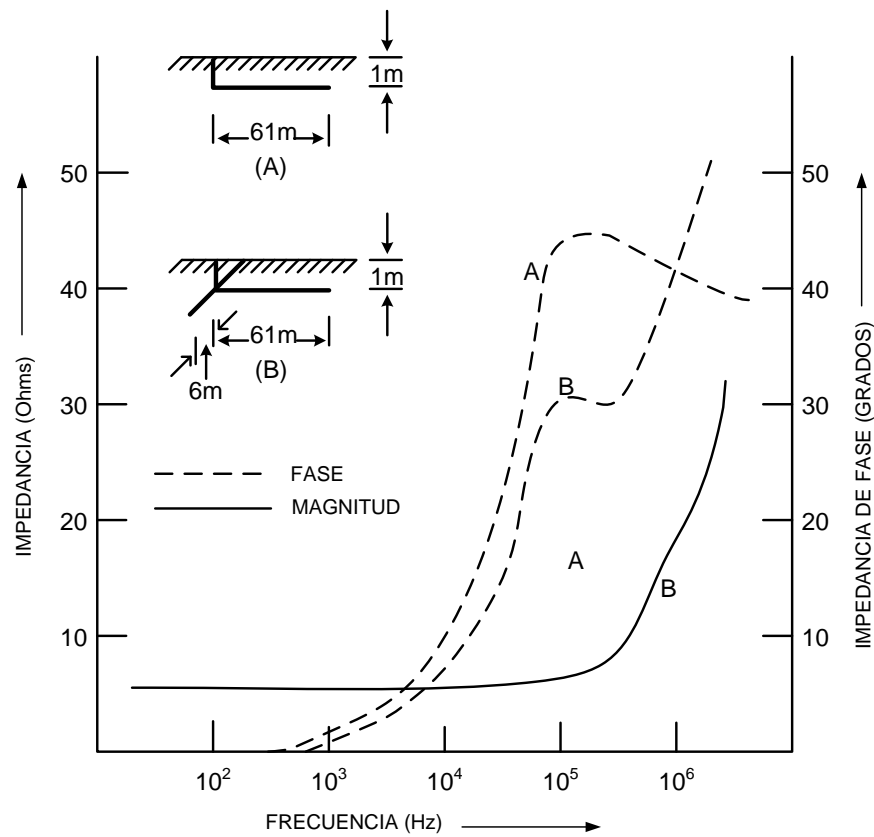
### **2.3.5. Incremento de la impedancia de las conexiones a tierra bajo altas frecuencias [2] IEEE Std. 1100.**

La particularidad del problema de los SPT de equipos digitales, radica en el amplio rango de frecuencias presentes en las señales propias de su operación y su interacción con el sistema de puesta a tierra, ya que las señales de alta frecuencia como los impulsos de corta duración utilizados en los procesadores de señal, e incluso las interferencias de alta frecuencia, se propagan a lo largo de los conductores que conforman los caminos de conexión a tierra, existentes en medio de los equipos que conforman un sistema digital interconectado.

---

<sup>25</sup> RS232 Recommended Standard 232, es una interfaz designada para intercambio serie de datos.

**Figura 9. Impedancia vs frecuencia de un electrodo de puesta a tierra para dos configuraciones A y B.**



Fuente: [2]. IEEE Std. 1100.

Estas rutas incluyen los conductores de puesta a tierra de los equipos electrónicos, y en general cualquier tipo de conexión de la red de equipotencialización. Estas conexiones del sistema de puesta a tierra producen un incremento en la impedancia con la frecuencia (Ver Figura 9), limitando de forma significativa la efectividad del sistema de puesta a tierra en relación con el control del ruido de alta frecuencia. Esta condición hace que el electrodo (o malla) de puesta a tierra por sí solo no sea un medio eficaz para controlar los efectos no deseados, asociados con las componentes de alta frecuencia; por ejemplo, de un evento de descarga atmosférica o para el caso de una descarga con alto contenido armónico.

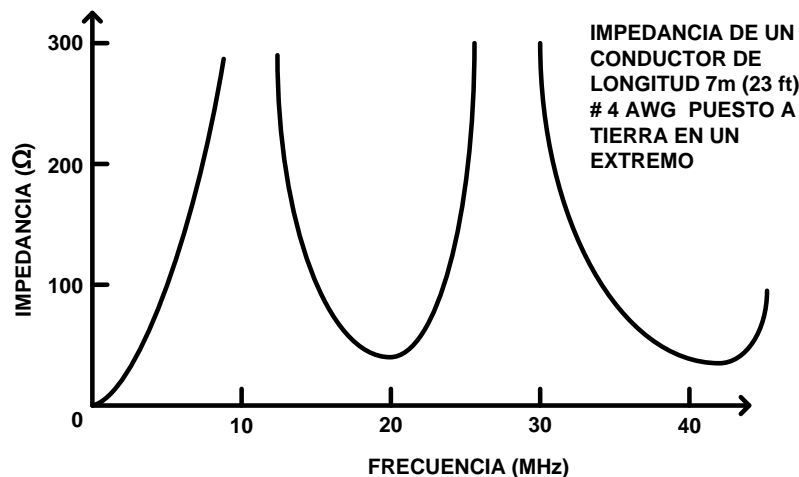
Las componentes de alta frecuencia presentes en el sistema requieren caminos de retorno que sean de baja impedancia para el rango de frecuencia correspondiente. De lo contrario, potenciales desarrollados a través de la alta impedancia presentada en una o más de las frecuencias contenidas pueden interferir o dañar

los equipos electrónicos conectados. Por lo tanto, para que el sistema de puesta a tierra cumpla efectivamente con su función de referencia de señal, debe estar diseñado para proporcionar caminos de retorno de baja impedancia para una amplia gama de frecuencias (por ejemplo DC a decenas de mega Hertz).

### 2.3.6. Perturbaciones electromagnéticas generadas por autoresonancia en los conductores del SPT<sup>26</sup>

La resonancia en los conductores ocurre debido a la capacitancia distribuida y la inductancia a lo largo de los conductores del sistema de puesta a tierra. Por esta razón, los conductores de sistemas de distribución AC oscilan cuando son excitados a frecuencias especificadas. La frecuencia de resonancia es una función de la inductancia y capacitancia del conductor, y en la mayoría de los casos es mucho mayor que la frecuencia de operación o sus armónicos (60 Hz). Sin embargo, la autoresonancia toma relevancia en los conductores de equipotencialización y puesta a tierra en el rango de los MHz, cerca de las frecuencias de operación de los equipos relacionados con tecnologías de la información.

Figura 10. Resonancia característica de los conductores.



Fuente: [2]. IEEE Std. 1100.

---

<sup>26</sup> SPT: Sistema de puesta a tierra.

La autoresonancia ocurre cuando la longitud de los conductores es igual o múltiplo par o impar de  $\frac{1}{4}$  de la longitud de onda  $\lambda$  de la señal de tensión aplicada. Teniendo en cuenta que los conductores en esencia pueden actuar de forma inadvertida como fuentes (o receptores) de ruido debido a campos cercanos, esta señal puede aplicarse al conductor de forma conducida o radiada. Cuando un conductor está bajo condiciones de auto resonancia, el resultado es un circuito abierto virtual, con una impedancia casi infinita y una diferencia de potencial alta entre los extremos del conductor. Esta situación se ilustra en la Figura 10.

### **2.3.7. Inductancia de los caminos compuestos por los conductores del SPT.**

Tanto los conductores de conexión a tierra como los conductores de equipotencialización, están sujetos a efectos de magnetismo cuando corrientes de impulso transitorias, como las asociadas a ruido y descargas atmosféricas, circulan a través de ellos. Por esta razón, los conductores deben ser dispuestos de tal manera que se minimice la producción de tensiones transitorias a lo largo de su longitud, cuando transportan las corrientes de impulso transitorias.

La relación  $V = L \frac{di}{dt}$  es muy útil para representar la tensión desarrollada en una inductancia, cuando una corriente es forzada a fluir en ella. Cuando la corriente que circula por la misma es interrumpida de forma abrupta, se pueden presentar impulsos de corriente, que circulan por el camino inductivo de los conductores del SPT, como tensiones que pueden ser desarrolladas a través de la capacitancia distribuida o de lazo.

En la práctica el problema es representado mediante la siguiente expresión [2].

$$V = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt$$

De donde:

- : Es la tensión máxima desarrollada a través del camino a tierra.
- : Es la corriente máxima que fluye por el camino a tierra.
- : Es la inductancia del camino a tierra en Henry.
- : Es la capacitancia parasita del camino a tierra en Faradios.

La expresión matemática anterior, tiene en cuenta el hecho de que la capacitancia parasita asociada con los caminos y conexiones típicas del sistema de puesta a tierra no debe ser ignorada. En pocas palabras, el problema no se trata de una inductancia teórica en el espacio libre acoplada a nada, ya que la capacitancia parásita puede ser bastante grande (dependiendo de sí en las conexiones a tierra y de equipotencialización se encuentran gabinetes metálicos o estantería estrechamente espaciada), uno frente al otro y con una área superficial significativa. Esto forma una capa de dieléctrico (aire) entre las caras metálicas y por tanto una capacitancia que es esencial en el análisis del circuito y no puede ser ignorada [2].

### **2.3.8. Perturbaciones de modo común en las líneas de alimentación.**

Las perturbaciones de modo común (Ver ANEXOS

ANEXO A) envuelven el ruido presente en los conductores de fase y neutro con respecto al conductor de tierra, los cuales se conectan a determinado equipo electrónico. Este tipo de perturbación no debe confundirse con el ruido existente en el conductor de tierra de equipos interconectados; como por ejemplo los cables de tierra que suministran dos ordenadores conectados por cables de datos.

Las perturbaciones de modo común en las líneas de alimentación son generadas por múltiples fuentes. Pueden incluir fuentes naturales, además de dispositivos eléctricos que inyectan ruido tanto en los conductores de neutro como en los conductores de tierra, propagándose a través del sistema de alimentación hasta afectar otros equipos. Entre estas fuentes se tienen los tubos fluorescentes, que suelen crear ruido de alta frecuencia, mientras que los motores, bombas y ventiladores crean ruido transitorio al ser encendidos o apagados. Adicionalmente, las fuentes conmutadas de alimentación (al interior de los equipos electrónicos) también pueden generar este tipo de perturbaciones.

### **2.4. Buenas prácticas en el diseño de SPT para equipos sensibles, orientadas a la mitigación de los problemas de incompatibilidad electromagnética.**

A continuación, se abordarán las buenas prácticas de diseño de los SPT orientadas a la atenuación de las perturbaciones que generan incompatibilidad electromagnética en los equipos electrónicos. Estas prácticas han sido identificadas a partir de los estándares IEEE Std. 1100 y IEEE Std. 142.

Existen tres tipos de configuraciones del sistema de puesta a tierra utilizados en equipos electrónicos para mejorar la operación del sistema.

- 1) Único punto de conexión a tierra SPG<sup>27</sup>.
- 2) Configuración en árbol TREE<sup>28</sup>
- 3) Estructuras de referencia de señal SRS<sup>29</sup>.

En ocasiones, una combinación de estas configuraciones puede ser usada en diferentes partes de la instalación. Es importante entender el propósito junto con las ventajas y desventajas de cada configuración con el fin de seleccionar la conexión a tierra adecuada para una aplicación específica.

#### **2.4.1. Único punto de conexión a tierra SPG.**

La configuración único punto de conexión a tierra SPG, tiene el propósito de minimizar los problemas causados por la circulación de corrientes parásitas a través de lazos formados por el SPT, que causan interferencia afectando las señales y en general la operación de los equipos electrónicos.

Para tal fin, es necesario mantener el SPT de los equipos electrónicos separado del resto de elementos puestos a tierra de la instalación, y conectarse entre sí solamente en el punto donde el neutro y la tierra se conectan; o bien en el panel principal de alimentación o en el secundario de un sistema derivado independiente (transformador de aislamiento) [2] [7]. Esta configuración es mostrada por la Figura 11.

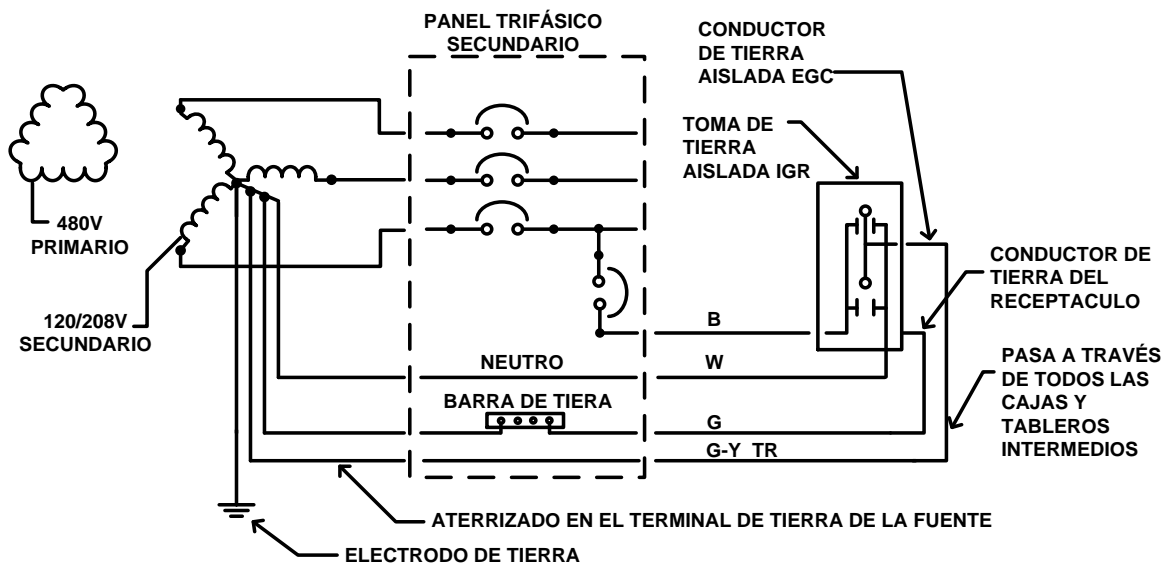
---

<sup>27</sup> SPG: (Single Point Grounding): Único punto de conexión a tierra.

<sup>28</sup> TREE: Árbol en idioma inglés.

<sup>29</sup> SRS (Signal Reference Structures): Estructuras de referencia de señal.

Figura 11. Conductor de puesta a tierra aislada para toma de equipos sensibles.



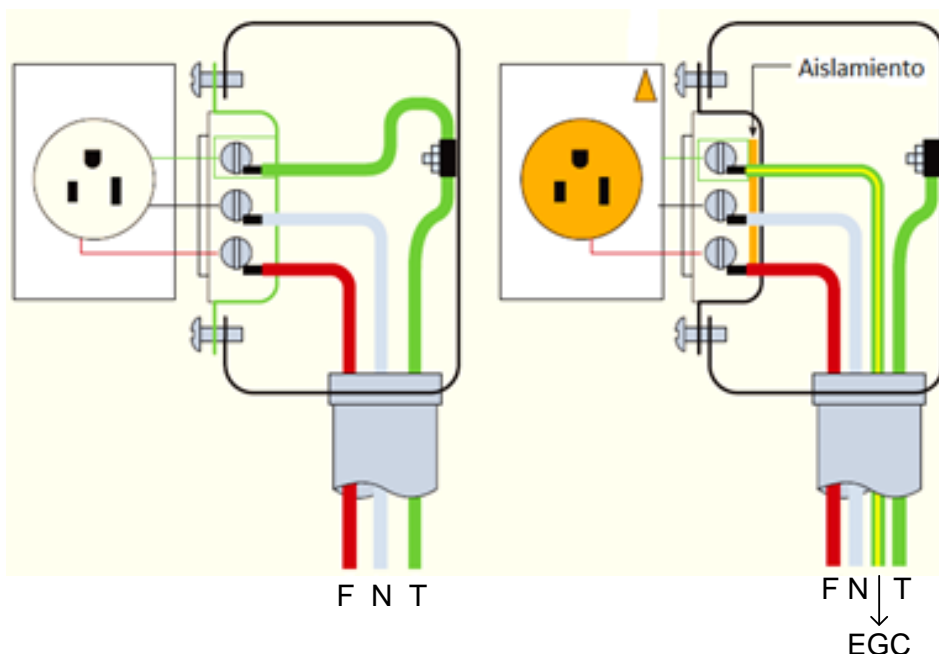
Fuente: [8]. IEEE Std. 142.

Para lograr esta configuración (Ver Figura 11), se utiliza un conductor de tierra aislada<sup>30</sup> EGC<sup>31</sup>, con el fin de controlar en donde son hechas las conexiones con el SPT requeridas. Este conductor parte de una toma especial, cuya tierra se encuentra aislada de la tierra del receptáculo. Este tipo de toma es llamado toma de tierra aislada o IGR "Insulated Grounding Receptacle" (Ver Figura 12).

<sup>30</sup> Con el fin de identificar el EGC, se recomienda que el color del aislamiento sea verde con una franja amarilla.

<sup>31</sup> EGC (Equipment Grounding Conductor): Conductor de puesta a tierra de equipos.

Figura 12. Toma convencional y toma de tierra aislado IGR.



Fuente: [9]. Electrical Construction and Maintenance ECM.

Algunas veces el término “tierra aislada” es interpretado de tal manera que el tomacorriente no debe conectarse al SPT de la instalación y parte de la literatura de los fabricantes, especifican una tierra separada para los equipos. Para eliminar esta confusión, este documento define el uso de una “tierra aislada” IG<sup>32</sup> y el de una toma de tierra aislada IGR<sup>33</sup>.

Si la tierra de la señal está conectada a la cubierta metálica del equipo en lugar de estar aislada, entonces todas las cubiertas de los componentes o partes que conforman tal equipo deben ser aisladas de la tierra o de un suelo conductor en el cual están soportadas. Esta disposición donde la tierra de señal/seguridad es común, crea una situación de inseguridad y no se recomienda. De otra forma si la tierra de referencia de señal de los equipos electrónicos está aislada de la cubierta del equipo, entonces no es conveniente o necesario aislar la cubierta del suelo.

---

<sup>32</sup> IG (Isolated ground), hace referencia a una tierra aislada ver sección (3.2.1.2.)

<sup>33</sup> IGR (Insulated Grounding Receptacle): Toma de tierra aislada.

## 2.4.2. Configuración tipo árbol (TREE)

La configuración tipo árbol corresponde a una variación de la configuración de SPG<sup>34</sup> descrita anteriormente (Sección 2.4.1). Se utiliza cuando un sistema de equipos electrónicos está compuesto por varias tomas, donde el conductor de tierra aislada EGC debe ser enviado a un punto de unión común dentro del recinto de la instalación. De esta manera se toman varios puntos SPG en común y se reúnen en un centro de conexión a tierra, asemejándose a un árbol con ramas (ver Figura 13). Finalmente, este punto de unión común se conecta a tierra.

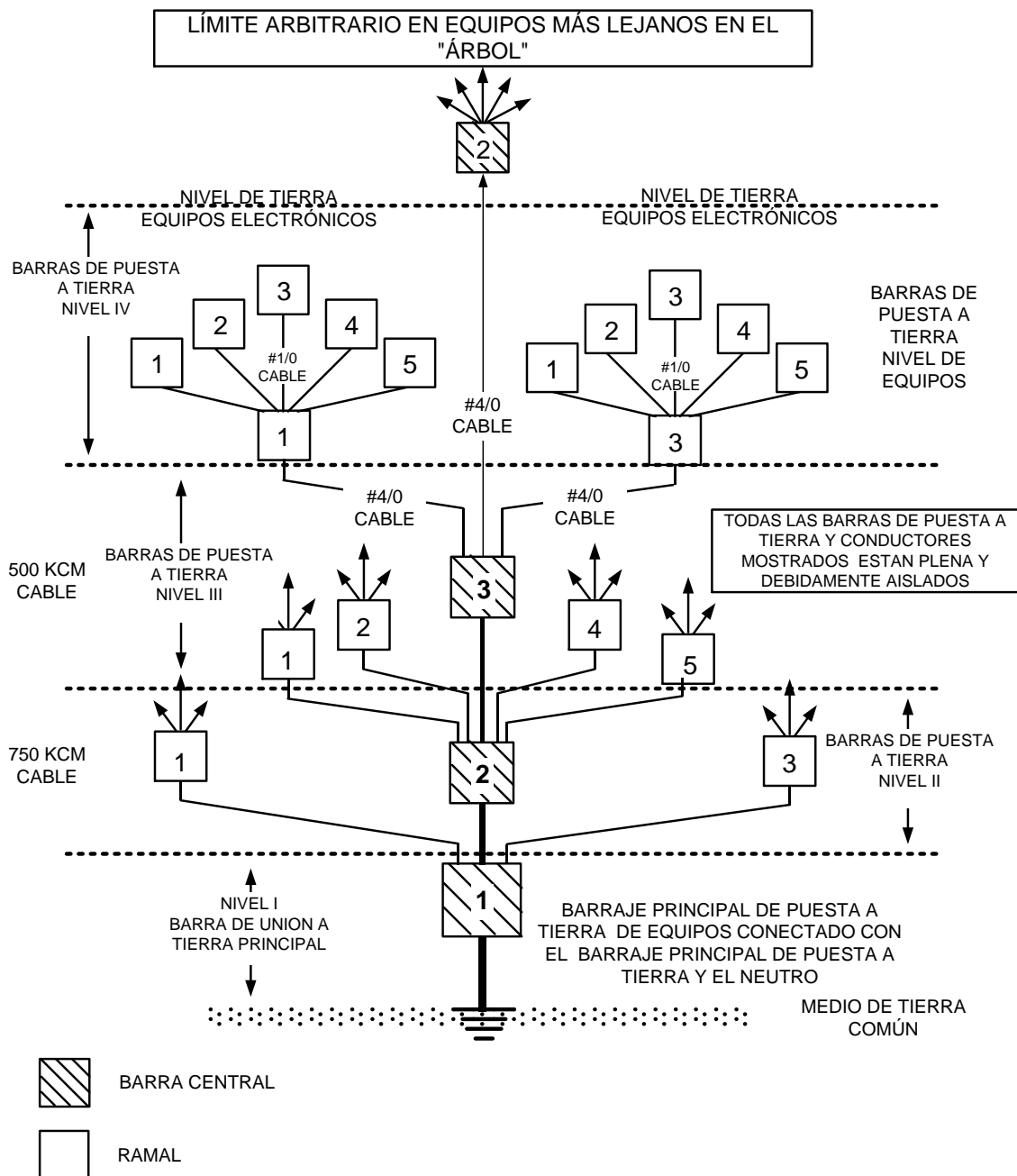
La unión de estas tierras individuales debe hacerse de forma similar al de un sistema de distribución radial, sin ningún tipo de caminos de tierra paralelos.

Este es un diseño popular en las edificaciones donde existen múltiples pisos y zonas, las cuales contienen grupos separados de equipos en los que existe la necesidad de ser referenciados a un único y central punto de tierra. La configuración de árbol es típicamente encontrada en instalaciones especializadas en telecomunicaciones, donde se emplean grandes plantas de alimentación DC y sistemas de conmutación de telefonía [2].

---

<sup>34</sup> SPG. (Single Point Grounding): Único punto de conexión a tierra.

**Figura 13. Esquema configuración tipo árbol "TREE".**

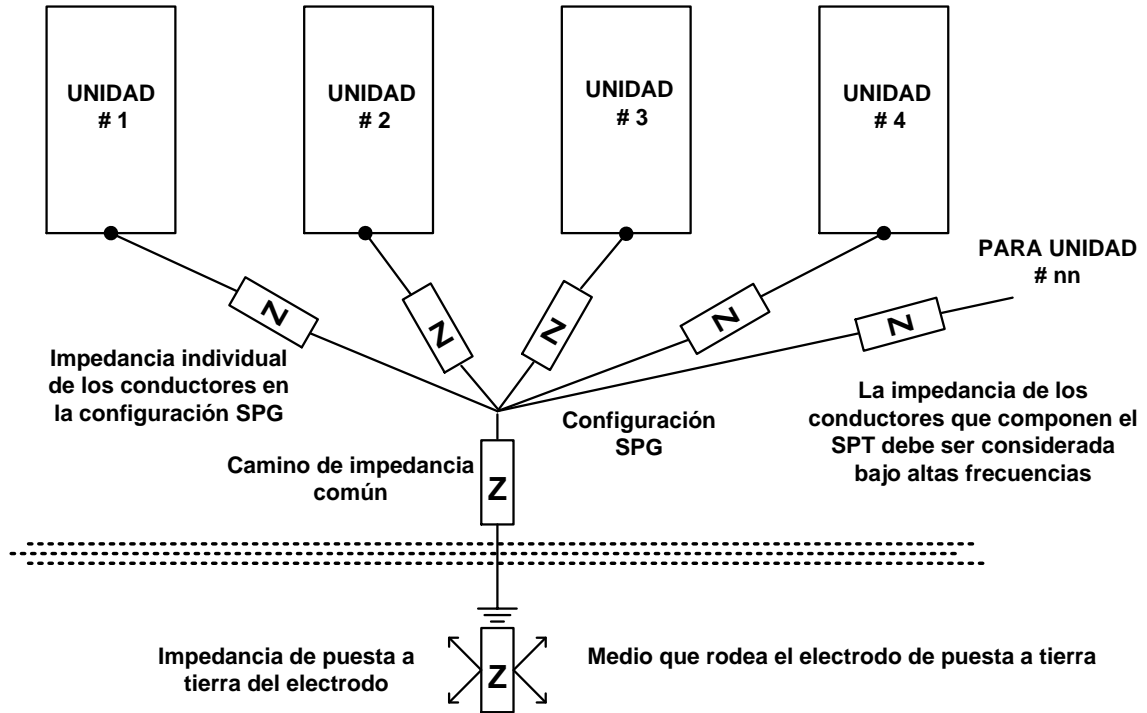


Fuente: [2]. IEEE Std. 1100.

La aplicación de estas configuraciones se ve limitada en general por sus dimensiones, y en especial por la frecuencia de operación de los equipos aterrizados, pues cualquier sistema de puesta a tierra que utilice conductores largos, presentará mayores impedancias a frecuencias más altas, lo cual es totalmente indeseable. La impedancia de los caminos de conexión a tierra no es

controlable y para una configuración SPG como la mostrada en la Figura 14 en general, se hace muy alta a frecuencias superiores a unos pocos kHz.

Figura 14. Impedancia de los conductores de puesta a tierra, en la configuración SPG.



Fuente: [2]. IEEE Std. 1100.

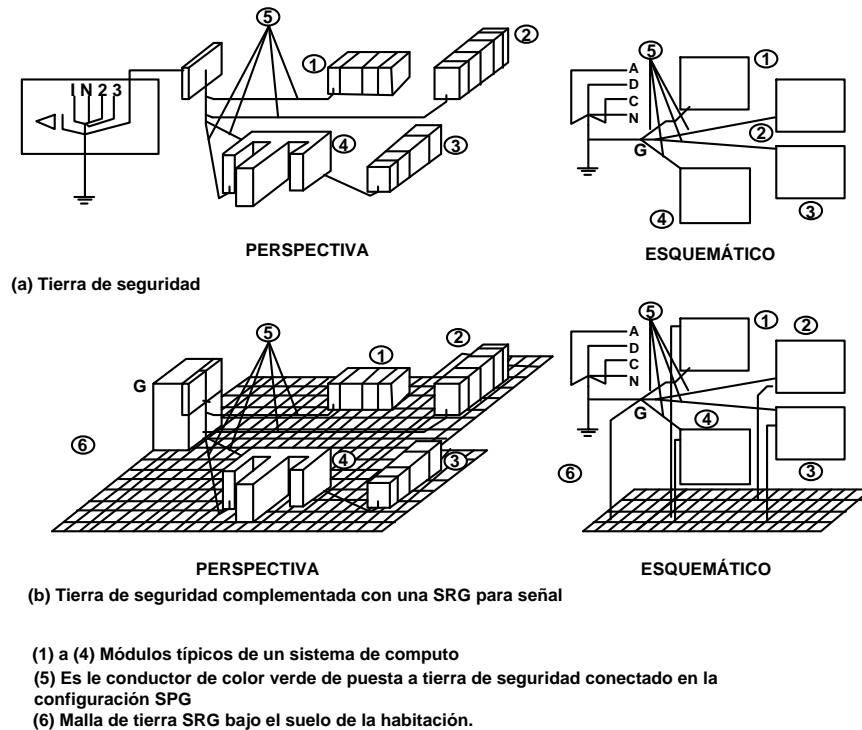
En general, los diseños de único punto de conexión a tierra y ÁRBOL, son conocidos por ser útiles para aterrizar equipos que operan con señales analógicas continuas de baja frecuencia y un estrecho ancho de banda, es decir, señales de niveles bajos con rangos de frecuencia desde DC hasta aproximadamente 30 kHz o un poco más altos. Sin embargo, si las dimensiones eléctricas de las configuraciones SPG o ÁRBOL se mantienen en un diseño compacto, pueden ser efectivas en rangos de frecuencia de hasta 300 kHz, puesto que ésta frecuencia aún es relativamente baja con respecto a los tiempos de transición en las señales típicas y los anchos de banda presentes en circuitos de señal como los encontrados en los sistemas de lógica digital. Tanto las configuraciones SPG como ÁRBOL se vuelven totalmente inadecuadas para su uso en este tipo de equipos.

### 2.4.3. Estructuras de referencia de señal SRS<sup>35</sup>.

Para frecuencias por encima de los 300 KHz, se requiere la existencia de una estructura de tierra que imite un plano de tierra equipotencial, asegurando una impedancia baja dentro de un amplio espectro de frecuencias de interés (a menudo desde DC a varias decenas de mega Hertz).

Con el objetivo de asegurar una baja impedancia para frecuencias por encima de los 300 kHz, se recomienda complementar los conductores EGC<sup>36</sup>, conectados en un solo punto SPG<sup>37</sup>, con la instalación de una estructura de referencia de señal (SRS); conformada por una malla o plano de referencia de señal bajo toda la habitación y una red de conductores usados para interconectar entre sí: marcos, gabinetes, carcasas o terminales de referencia comunes dentro de un sistema de alimentación de equipos electrónicos (ver Figura 15 ).

Figura 15. Unidades de electrónicas conectadas usando las configuraciones SPG y SRS.



Fuente: [8]. IEEE Std. 142.

<sup>35</sup> SRS (Signal Reference Structures): Estructura de referencia de la señal.

<sup>36</sup> EGC (Equipment Grounding Conductor): Conductor de puesta a tierra de equipos.

<sup>37</sup> SPG (Single Point Grounding): Único punto de conexión a tierra.

De esta manera, los propósitos de las SRS son principalmente cuatro:

- a) Mejorar la fiabilidad de la transferencia de señal entre los elementos interconectados del sistema en la instalación, mediante la reducción del ruido en modo común entre unidades, bajo un amplio rango de frecuencias.
- b) Prevenir daños a los circuitos de señal entre las unidades, proporcionando una inductancia baja y por tanto una referencia de tierra eficaz para todo el sistema exterior de alimentación AC y DC, es decir para el caso de dispositivos de protección contra sobretensiones, telecomunicaciones y en general circuitos que trabajan a estos niveles de señal.
- c) Evitar o minimizar el daño a nivel de señal entre las unidades cuando ocurre un evento de falla a tierra en el sistema de alimentación.
- d) Disminuir la interferencia electromagnética en y entre los equipos, provocada por campos eléctricos y magnéticos cercanos.

La aplicación de las SRS puede ser en forma de un plano de referencia de señal (SRP<sup>38</sup>) o una malla de referencia de señal (SRG<sup>39</sup>), conectando idealmente por medios directos<sup>40</sup>, los correspondientes equipos eléctricos y electrónicos a tierra. Aunque en la práctica es más probable realizar las conexiones mediante múltiples bandas de unión de longitud corta y baja inductancia.

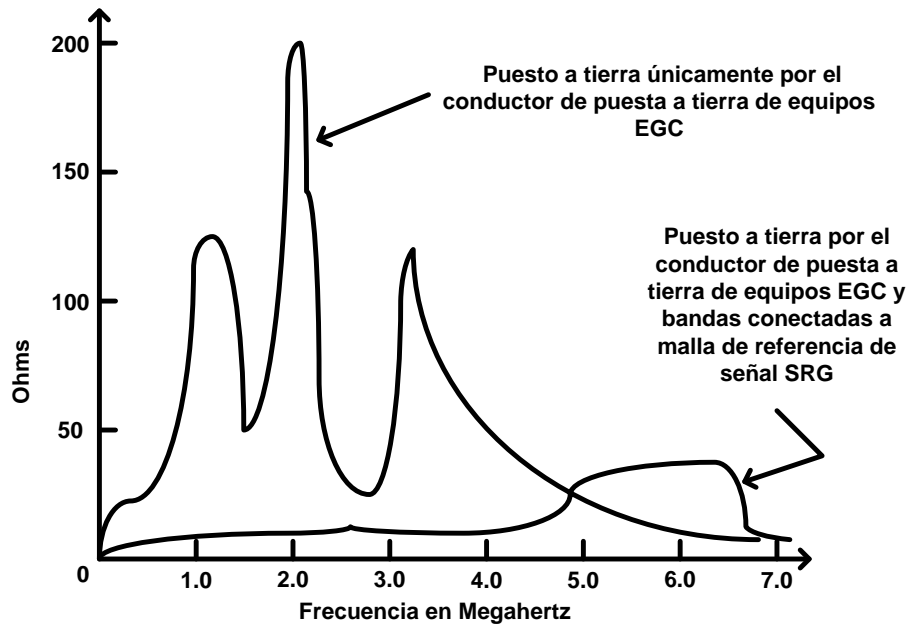
---

<sup>38</sup> SRP (Signal Reference Plane): Plano de referencia de señal.

<sup>39</sup> SRG (Signal Reference Grid): Malla de referencia de la señal.

<sup>40</sup> Conectar directamente los equipos a la SRS (atornillados) sin la intervención de un conductor.

Figura 16. Impedancia de los conductores de puesta a tierra para un centro de cómputo.



Fuente: [8]. IEEE Std. 142.

El resultado típico es un sistema de puesta a tierra de banda ancha (ver Figura 16) con un buen rendimiento práctico perfectamente compatible con los equipos de telecomunicaciones modernos y otros equipos electrónicos, tales como computadores y equipos de tecnologías de la información. Adicionalmente, este es un diseño de un SPT que no genera conflictos de seguridad con los requerimientos de las normas NTC 2050 [10] y el NEC [6].

#### 2.4.3.1. Planos de referencia de señal SRP<sup>41</sup>.

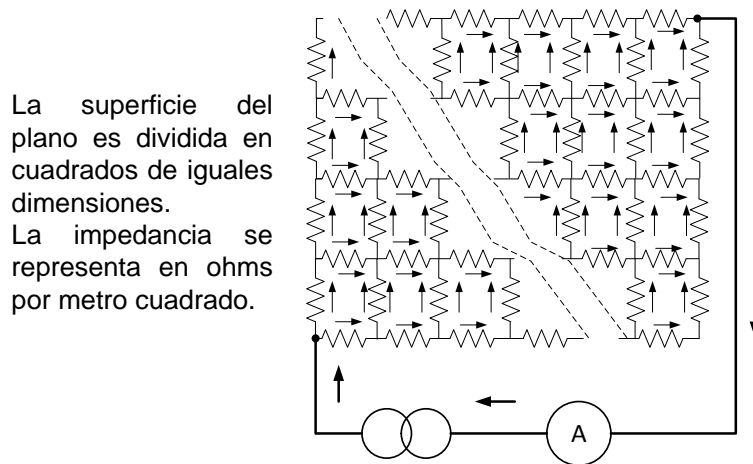
Una SRP corresponde a una masa o masas de material conductor, que conectadas proveen una impedancia baja y uniforme al flujo de corriente para un amplio rango de frecuencias. Estas estructuras se pueden describir mediante una impedancia por unidad de área, considerando una superficie conformada por impedancias dispuestas en ángulos rectos formando cuadrados. De esta manera, las corrientes en Amper que circulen en la SRS, son rápidamente dispersadas (y reducidas a corrientes del orden de los mili y micro Amper) a través de los

---

<sup>41</sup> SRP (Signal Reference Plane): Plano de referencia de señal.

numerosos cruces y caminos, (con resistencias del orden de los mili Ohm), desde un punto de inyección hasta el punto de retorno (Ver Figura 17).

**Figura 17. Modelo del flujo de corriente a través de un SRP considerando el modelo de ohms por cuadrado.**



Fuente: [2]. IEEE Std. 1100.

Además de minimizar la caída de tensión, la dispersión de la corriente a lo largo del área de la SRP reduce los efectos de los campos magnéticos cercanos, relacionados directamente con la amplitud de la corriente, reduciendo de manera significativa IEM<sup>42</sup> en los equipos conectados.

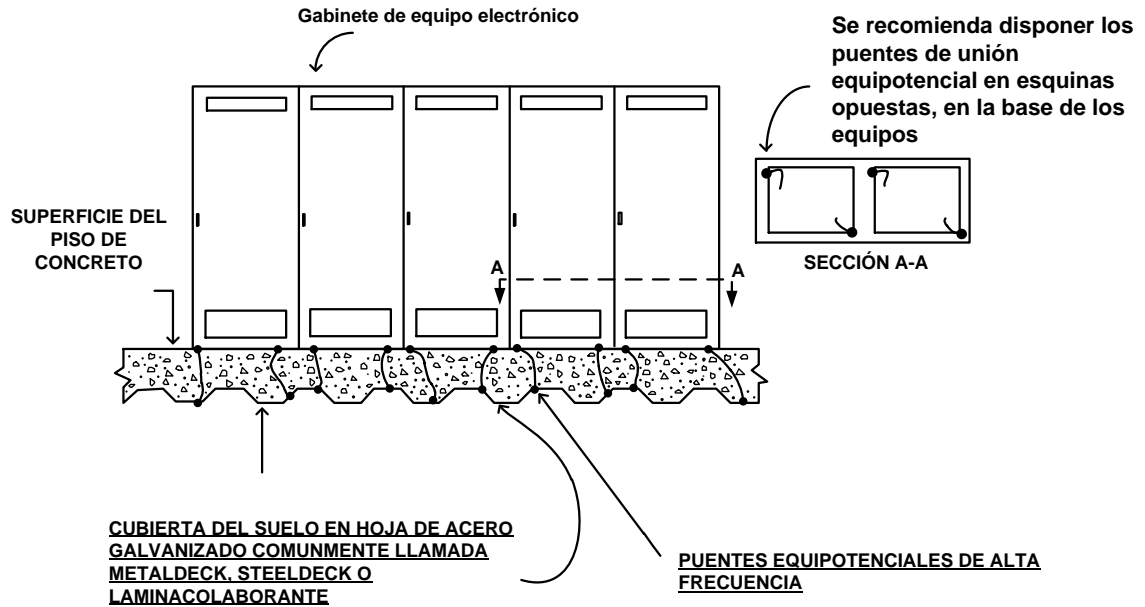
Para considerar estas estructuras como un plano equipotencial el área de cobertura debe ser definida de manera cuidadosa, como parte de un circuito de dimensiones eléctricas pequeñas<sup>43</sup>. Debido a esta restricción en el tamaño del circuito, el plano equipotencial se encuentra más comúnmente como un componente de un circuito eléctricamente pequeño; tal como el plano de tierra para niveles lógicos, típico de un circuito impreso.

---

<sup>42</sup> IEM: Interferencia electromagnética.

<sup>43</sup> Se considera que es un pequeño circuito, solamente cuando la longitud del lazo de corriente es mucho menor que la longitud de onda de la señal sinusoidal de más alta frecuencia presente en el circuito.

Figura 18. . Construcción de una SRP utilizando hojas en acero galvanizado Steel Deck.



Fuente: [2]. IEEE Std. 1100.

Cuando se consideran estructuras física y eléctricamente grandes, tales como habitaciones completas, suplidas por un plano o una malla de referencia dedicada para el subsistema de tierra de señal, las características de los SRP<sup>44</sup> no son totalmente extensibles. Sin embargo, esto no quiere decir que los planos y mallas de referencia no sean útiles en estas aplicaciones, pues algunas veces son la única manera de obtener buenos resultados a la hora de diseñar un SPT efectivo dentro de un amplio rango de frecuencias.

Como lo indica la Figura 18, un SRP típicamente se construye empleando cubiertas metálicas en acero galvanizado, que se conectan a los gabinetes de los equipos mediante uniones o puentes de conexión equipotencial de longitudes aleatorias (ver sección 2.5.2).

---

<sup>44</sup> SRP (Signal Reference Plane): Plano de referencia de la señal.

### 2.4.3.2. Mallas de referencia de señal SRG<sup>45</sup>.

Las mallas de referencia de señal pueden considerarse como un SRP con agujeros en su superficie, donde la longitud de los conductores en el perímetro de los agujeros, definen la frecuencia de corte a partir de la cual la SRG rápidamente empieza a perder su efectividad en comparación con una SRP. Mientras la frecuencia se mantenga por debajo de la frecuencia de corte, las SRG se comportan de una forma muy similar a las SRP brindando una alternativa económica y practica para instalaciones eléctricas que involucren equipos electrónicos dispuestos en áreas como habitaciones o salas.

Típicamente, una SRG se construye mediante módulos de conductores con intersecciones de aproximadamente 0,6 m x 0,6 m. Esta configuración proporciona una banda de paso efectiva para frecuencias que van desde DC hasta aproximadamente 25 a 30 MHz, lo cual es útil en la mayoría de las aplicaciones. Estas estructuras pueden ser prefabricadas o construidas en el sitio y generalmente no requieren mantenimiento de rutina.

Ejemplos prácticos de SRG, utilizan los siguientes métodos (en orden decreciente de efectividad):

- a. Láminas de cobre unidas por soldadura exotérmica, dispuestas sobre el concreto estructural por debajo de alfombras o revestimientos de suelo similares, sin ser apreciablemente perceptibles.
- b. Mallas en alambre de cobre o aluminio.
- c. Mallas en lámina o conductor de cobre, dispuestas sobre el concreto estructural o suspendidas mediante el uso de pedestales (ver Figura 19) en una subestructura de piso elevado. Un ejemplo de esta configuración es mostrada en la Figura 20. La separación de 0.6 m x 0.6 m es ideal para esta práctica ya que concuerda con las dimensiones estandarizadas de los pisos elevados.

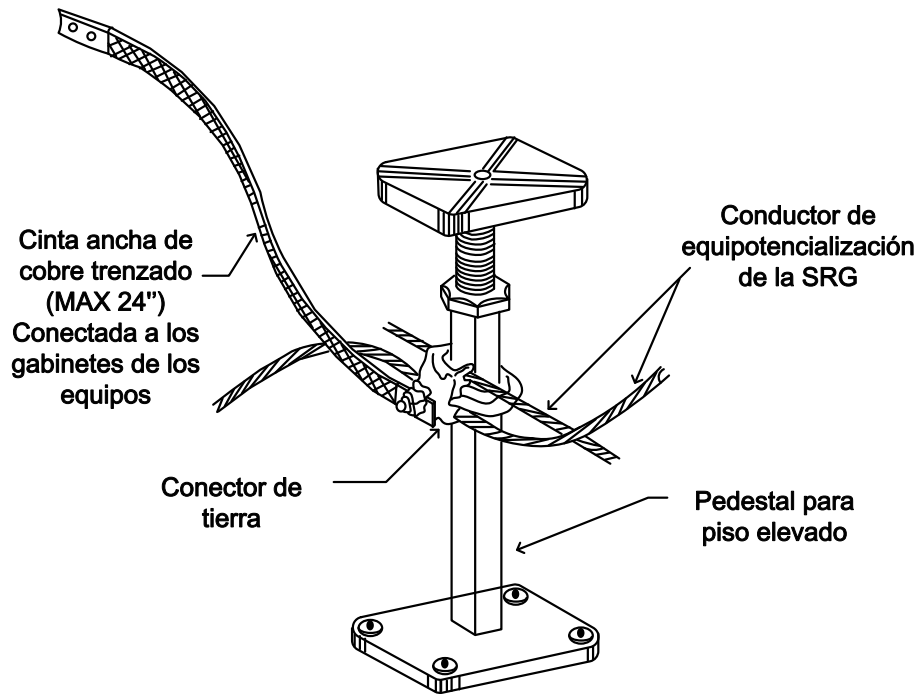
Separaciones más grandes entre los conductores SRG no son recomendables, pues el límite superior de frecuencia de tales diseños, se degrada rápidamente a medida que aumenta el espaciamento. Por otra parte, arreglos con separaciones más pequeñas pueden utilizarse para mejorar el rendimiento de la SRG, de

---

<sup>45</sup> SRG (Signal Reference Grid): Malla de referencia de la señal.

acuerdo a las necesidades de la instalación. Sin embargo, el uso de un módulo más pequeño implica que la SRG no se instale como una malla suspendida, justo debajo del nivel de la baldosa en un sistema de piso elevado, dificultando el acceso a los cables y otros elementos de soporte situados debajo del piso.

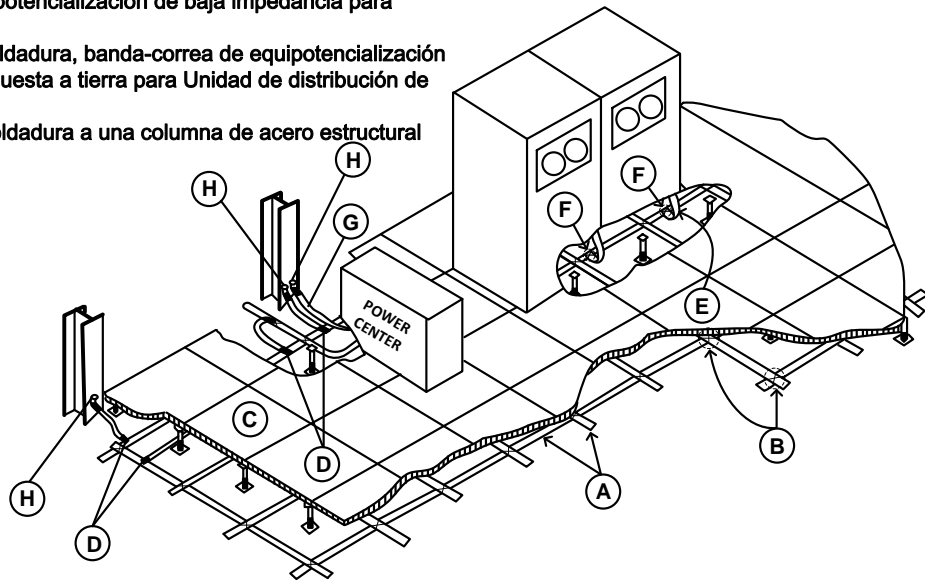
**Figura 19. Pedestal para subestructura de piso elevado y conductores que componen la SRG.**



Fuente: [2]. IEEE Std. 1100 Esmerald Book.

Figura 20. Esquema de conexiones de una SRG utilizando una estructura con piso elevado.

- A. Laminas de Cu, 0.010 in x 4 in
- B. Conexión en soldadura, banda-banda
- C. Conexión en soldadura, banda-pedestal
- D. Conexión en soldadura, banda – correa de unión equipotencial
- E. Correa de equipotencialización de baja impedancia para equipos
- F. Conexión en soldadura, banda-correa de equipotencialización
- G. Conductor de puesta a tierra para Unidad de distribución de energía (PDU)
- H. Conexión en soldadura a una columna de acero estructural



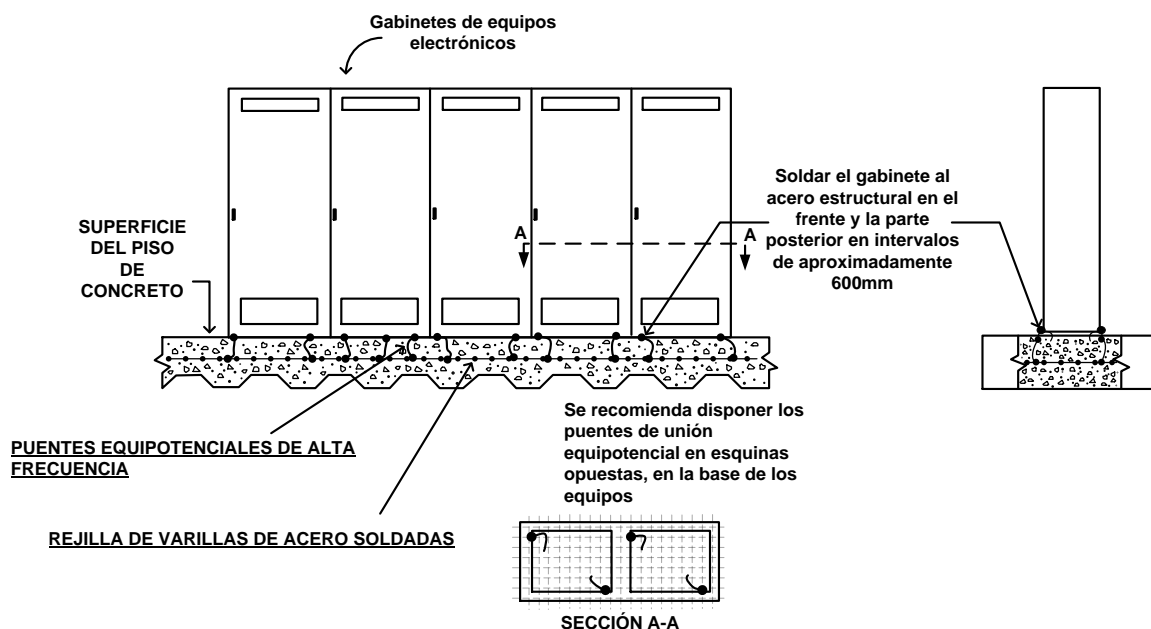
Fuente: [2]. IEEE Std. 1100.

Cuando no es práctico o posible la utilización de los métodos mencionados (específicamente, cuando el equipo se encuentra en áreas fuera de las salas de equipos), otras alternativas de construcción de una SRG<sup>46</sup> implican el uso de mallas electro-soldadas, tales como las usadas en el hormigón de refuerzo (ver Figura 21), así como entrepiso en acero galvanizado entre otras alternativas. El ANEXO C contiene recomendaciones a tener en cuenta durante la construcción de una SRG.

---

<sup>46</sup> Se aclara que las estructuras de referencia de señal son aplicables únicamente en edificaciones individuales, que cuenten con un sistema de alimentación derivado independiente.

**Figura 21. Uso de varillas de acero estructural como alternativa para una SRG.**



Fuente: [2]. IEEE Std. 1100.

## 2.5. Buenas prácticas en el dimensionamiento de los conductores de equipotencialización en sistemas de puesta a tierra.

Los múltiples conductores de interconexión entre SRS y los equipos, y en general los conductores de equipotencialización también se ven sometidos a componentes eléctricas dentro de un amplio rango de frecuencias. El objetivo en el dimensionamiento de estos conductores es que en conjunto, formen un camino útil de baja impedancia para el flujo de corriente a través de ellos para todas las frecuencias de interés. Si este dimensionamiento se realiza adecuadamente, puede utilizarse con éxito para limitar el desarrollo de potenciales no deseados a través de los extremos de estas uniones.

### 2.5.1. Dimensionamiento de los conductores de equipotencialización para disminuir la impedancia expuestas a altas frecuencias.

Para minimizar la impedancia expuestas a altas frecuencias de las interconexiones entre las SRP's o SRG's y los equipos, se recomienda utilizar conductores tipo

lámina o con una geometría similar. Adicionalmente, se requiere que la longitud eléctrica<sup>47</sup> de estos conductores sea una fracción de la longitud de onda  $\lambda$  de la señal sinusoidal de mayor valor de frecuencia presente en el circuito, sin exceder ( $\lambda /20$ ) para la frecuencia más alta esperada. Aunque esta es una restricción adecuada para la mayoría de las aplicaciones comerciales, las aplicaciones más críticas<sup>48</sup> pueden requerir límites de aproximadamente ( $\lambda /50$ ) o menos. Adicionalmente, de acuerdo con el estándar IEEE Std. 1100, se recomienda que las conexiones se realicen preferiblemente mediante soldadura exotérmica. Esto permite minimizar su impedancia bajo altas frecuencias.

En este sentido se recomienda utilizar bandas en cobre, aluminio o acero (el acero tiene la ventaja de no crear par galvánico<sup>49</sup> cuando esta soldado a gabinetes del mismo material), tal como se muestra en la Figura 19.

### **2.5.2. Dimensionamiento de los conductores de equipotencialización para mitigar fenómenos de autoresonancia.**

Teniendo en cuenta el problema descrito en la sección 2.3.6, la relación entre los múltiplos enteros de  $\frac{1}{4}$  de la longitud de onda y las condiciones de longitud de resonancia del conductor de equipotencialización se determina por la siguiente expresión.

---

De donde:

$L$  : Es la longitud de resonancia del conductor [m].

$n$  : Es un numero entero impar (1,3, 5...).

$c$  : Es la velocidad de la luz en el vacío ( $3 \times 10^8$  m/s).

---

<sup>47</sup> Se considera que es un pequeño circuito, solamente cuando la longitud del lazo de corriente es mucho menor que la longitud de onda de la señal sinusoidal de más alta frecuencia presente en el circuito.

<sup>48</sup> Para este caso se consideran aplicaciones con frecuencias de operación los 25 MHz.

<sup>49</sup> El par Galvánico es un proceso electroquímico que hace que dos metales distintos en contacto sufran el proceso de corrosión.

: Es la frecuencia de excitación en el conductor [Hz].

En la práctica, los diseñadores deben preocuparse por la frecuencia más baja a la que una determinada conexión a tierra resonará ( $n = 1$ ). Por lo tanto, estos conductores deben tener longitudes que no estén cerca a las de resonancia, o que no correspondan a múltiplos impares de  $\frac{1}{4}$  de la longitud de onda para las frecuencias de ruido eléctrico que podrían imponerse en el conductor.

De esta manera, para evitar la resonancia se recomienda emplear múltiples conductores de equipotencialización de longitudes diferentes. Así, mientras que una ruta puede ser sometida a las condiciones de resonancia, las otras no. Por lo general, una diferencia del 20% en las longitudes de los conductores será suficiente para que no exista resonancia.

Adicionalmente, para minimizar los efectos indeseables del acoplamiento mutuo (debido a los campos cercanos, principalmente inductivo), la mejor práctica es instalar los conductores de conexión a tierra en esquinas opuestas de los armarios de equipamiento. Así, los conductores de puesta a tierra tendrán rutas inductivas relativamente independientes de corriente y, ya que están en paralelo, se presentará una impedancia más baja a través de esta conexión. En la Figura 21 se observan las bases de los gabinetes de equipos electrónicos, conectadas a tierra mediante dos conductores ubicados en esquinas opuestas.

### **2.5.3. Dimensionamiento de los conductores del SPT para minimizar la inductancia de los caminos compuestos por los conductores del SPT.**

Como se describió en la sección 2.3.7, los caminos y conexiones típicas del sistema de puesta a tierra poseen una inductancia y capacitancia parasita que no debe ser ignorada. La mejor alternativa para reducir las perturbaciones electromagnéticas asociadas a estos parámetros, consiste en juntar y atornillar directamente la superficie de las carcasas de unidades electrónicas contiguas, con el fin de eliminar la necesidad de usar conductores de equipotencialización discretos.

Esta acción ataca el problema desde dos perspectivas:

- a) Se reduce al mínimo la capacitancia parasita entre las unidades.
- b) Se elimina virtualmente la inductancia a través del camino/unión de tierra.

Como resultado de ello, incluso para altos picos de corrientes transitorias, la tensión desarrollada debe ser baja. De esta manera, los circuitos de señal que interconectan dos equipos no estarán sometidos a altos valores de perturbación de modo común<sup>50</sup>.

Cuando las superficies de los equipos no pueden ser juntadas, la aplicación de una SRS<sup>51</sup> proporciona buenos resultados, reduciendo las tensiones de modo común y corrientes transitorias.

#### **2.5.4. Aplicación del transformador de aislamiento para reducir las perturbaciones de modo común en las líneas de alimentación.**

Además de capturar los armónicos triples<sup>52</sup> la aplicación de transformadores de aislamiento para crear un sistema derivado, es una práctica recomendada para mitigar el ruido de modo común que proviene de las líneas de alimentación (Ver sección 2.3.8) [11]. Como lo indica la Figura 22 la construcción de este transformador incluye un marco cuyo acoplamiento capacitivo con el devanado primario, proporciona una trayectoria para desviar a tierra el ruido de modo común y adicionalmente un apantallamiento electrostático que evita que las corrientes de ruido se transmitan al secundario. Para que esta configuración sea efectiva, la pantalla y el núcleo del transformador, además de los conductores puestos a tierra, deben estar unidos entre sí en un solo punto.

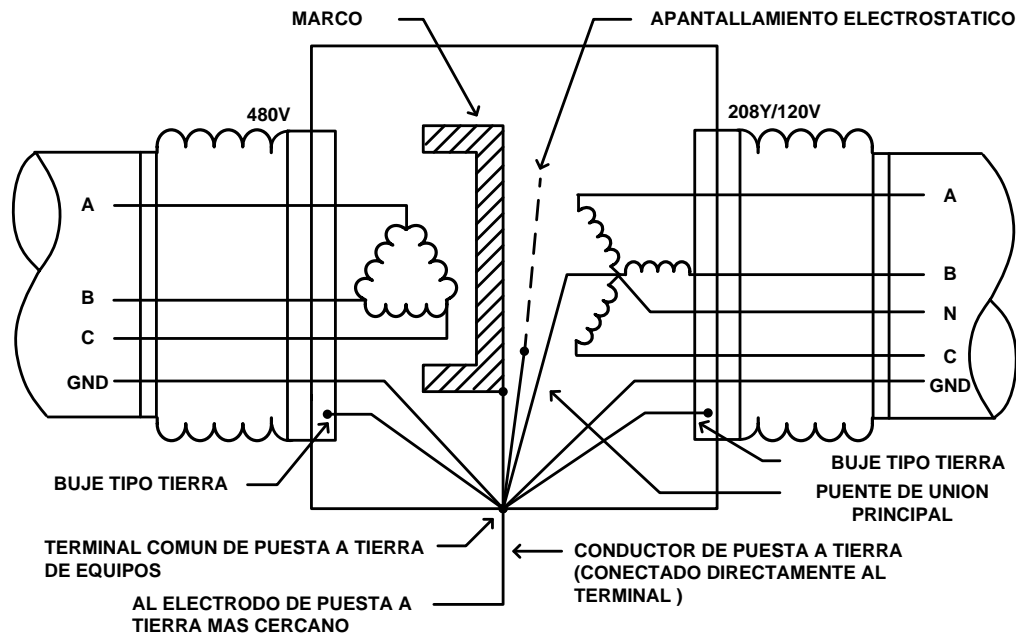
---

<sup>50</sup> Para tener más claridad sobre las perturbaciones en modo común, ver el Anexo A.

<sup>51</sup> SRS (Signal Reference Grid): Mallas de referencia de señal.

<sup>52</sup> Cuando los armónicos triple-n se reflejan en un bobinado en delta, están todos en fase, así que las corrientes armónicas triple-n circulan por este bobinado. Los armónicos triple-n son absorbidos eficazmente en el bobinado y no se propagan aguas arriba a la línea de suministro [29] Leonardo Energy.

**Figura 22. Requerimientos de puesta a tierra de un transformador de aislamiento.**



Fuente: [2]. IEEE Std. 1100.

### 2.5.5. Cambio de líneas a fibra óptica

Teniendo en cuenta que la fibra óptica es inmune a las perturbaciones radiadas, se recomienda su empleo en lugar de conductores eléctricos, con el propósito de aislar las líneas de datos de ruidos eléctricos. Algunos fabricantes de equipos electrónicos, incluso proporcionar aislamiento en los puertos de entrada/salida para las líneas de enlace óptico para este propósito.

Para el diseño de estas redes de datos ópticas, debe considerarse que existen dos tipos de configuraciones: líneas largas, como los que las compañías telefónicas usan para la transmisión de larga distancia, y las líneas cortas, que se utilizan para las comunicaciones internas en un edificio. Cada tipo, largo o corto, se deben construir de manera diferente, puesto que cada uno tiene diferentes aplicaciones. Especialistas en sistemas de fibra óptica deben ser consultados para realizar un diseño adecuado y eficiente.

La Tabla 1 resume las perturbaciones electromagnéticas mencionadas en este capítulo, y las prácticas en el diseño de los SPT para mitigar su impacto en los equipos electrónicos.

**Tabla 1. Problemas de incompatibilidad de electromagnética y buenas prácticas en el diseño de los SPT de equipos sensibles, para mitigarlas.**

<b>Problema</b>	<b>Sección</b>	<b>Practica Recomendada</b>	<b>Sección</b>
Perturbaciones conducidas con frecuencias que van hasta 300 kHz.	2.3.5	Único punto de conexión a tierra SPG	2.4.1
Perturbaciones conducidas con frecuencias que están por encima de 300 kHz.	2.3.5	Estructuras de referencia de señal SRS	2.4.3
Altas impedancias en las conexiones a tierra bajo altas frecuencias.	2.3.5	Conductores delgados y anchos con longitudes eléctricas inferiores a $\lambda/20$ .	2.5.1
Autoresonancia en los conductores del SPT	2.3.6	Conductores con longitudes que difieren en un 20 %	2.5.2
Altos valores de inductancia en caminos compuestos por los conductores del SPT.	2.3.7	Juntar y atornillar directamente las carcasas de los equipos	2.5.3
		Estructuras de referencia de señal SRS	2.4.3
Ruido de modo común que proviene de las líneas de alimentación	2.3.8	Transformador de aislamiento	2.5.4

Fuente: Autor

### **3. PROBLEMAS DE INCOMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS (SIPRA<sup>53</sup>) Y BUENAS PRACTICAS DE DISEÑO DEL SPT PARA MITIGARLOS.**

A lo largo de este capítulo se abordarán las prácticas de diseño de los SPT<sup>54</sup> para sistemas de protección contra rayos, orientadas a atenuar la IEM<sup>55</sup> causada por las descargas atmosféricas. Primero se describirá, de manera breve, la naturaleza de las descargas atmosféricas (Secciones 3.1. y 3.2.); a continuación, se identificarán las perturbaciones eléctricas asociadas al impulso electromagnético del rayo IER<sup>56</sup> que afectan las instalaciones eléctricas de uso final (Sección 3.3.); y posteriormente se tratarán las alternativas de diseño del sistema de puesta a tierra que permiten mitigarlas (Sección 3.4.).

#### **3.1. Perspectiva general.**

Las descargas atmosféricas son eventos naturales de muy alta energía, que ponen en riesgo la seguridad de los seres vivos y el adecuado funcionamiento de los sistemas eléctricos y electrónicos al interior de una instalación. En su mayoría, las descargas atmosféricas causan daños como consecuencia de la gran cantidad de corriente que fluye por el sistema o el calor que se genera. Si un rayo impacta cerca de una línea aérea de energía o de una línea de telefonía, una gran corriente se inyecta en los conductores ocasionando daños considerables tanto a equipos de potencia como a equipos de telecomunicaciones, y en general a cualquier dispositivo que esté conectado al sistema [2].

Cuando un edificio o un sistema eléctrico es alcanzado por un rayo, o si está expuesto a los campos electromagnéticos intensos generados por una descarga cercana, las corrientes y tensiones que aparecen en la estructura están determinadas por la respuesta eléctrica de los objetos que son golpeados. De esta forma el sistema de puesta a tierra de la estructura juega un papel fundamental en la determinación de la respuesta a los transitorios. Por ejemplo, las tensiones que

---

<sup>53</sup> SIPRA: Sistema de protección contra rayos.

<sup>54</sup> SPT: Sistemas de puesta a tierra.

<sup>55</sup> IEM: Interferencia Electromagnética.

<sup>56</sup> IER: Impulso electromagnético del rayo.

aparecen en los equipos electrónicos que se encuentran en el interior de un edificio, el cual está formado por estructuras metálicas conectadas a tierra, son frecuentemente producidas por el rápido aumento de las corrientes de retorno del rayo. Estos cambios bruscos de corriente generan oscilaciones resonantes en el exterior del edificio (como la resonancia de una campana), que pueden ingresar a la estructura a través de aberturas en el metal, tales como puertas y ventanas [2].

Los daños causados por las descargas atmosféricas son de todo tipo. Particularmente en las partes metálicas el calor generado por las grandes corrientes y las interacciones entre el arco eléctrico y la superficie del conductor puede hacer que el metal se funda e incluso que se evapore.

De esta manera el SPT<sup>57</sup>, como parte de la protección externa del SIPRA, conduce y dispersa las corrientes del rayo en el terreno, luego su correcto dimensionamiento, además de garantizar la seguridad de las personas, permite controlar las perturbaciones eléctricas que afectan la compatibilidad electromagnética de la instalación.

### **3.2. Naturaleza de las descargas atmosféricas.**

Una descarga atmosférica se conoce como “intra-nube”, cuando ocurre dentro de una misma nube o de una nube a otra. Si la descarga tiene lugar entre una nube y el suelo toma el nombre de “rayo”. Existe la posibilidad que este impulso ocurra en un sentido o en el otro, y que la carga migrante pueda ser positiva o negativa. Sin embargo, hay prevalencia de los que transportan carga negativa. Se considera que sólo 10 % de los IER<sup>58</sup> son del tipo positivo, es decir transportan carga eléctrica positiva.

Considerando una nube cargada negativamente con respecto al suelo, una vez alcanzados los valores suficientemente altos de la intensidad de campo eléctrico en [V/m] dentro de la nube de tormenta, se inicia una descarga precursora con una corriente eléctrica débil que se desplaza, tomando caminos erráticos pero con avance neto hacia el suelo. Al mismo tiempo, el campo eléctrico a nivel del suelo

---

<sup>57</sup> SPT :Sistema de puesta a tierra.

<sup>58</sup> IER: Impulso Electromagnético del Rayo.

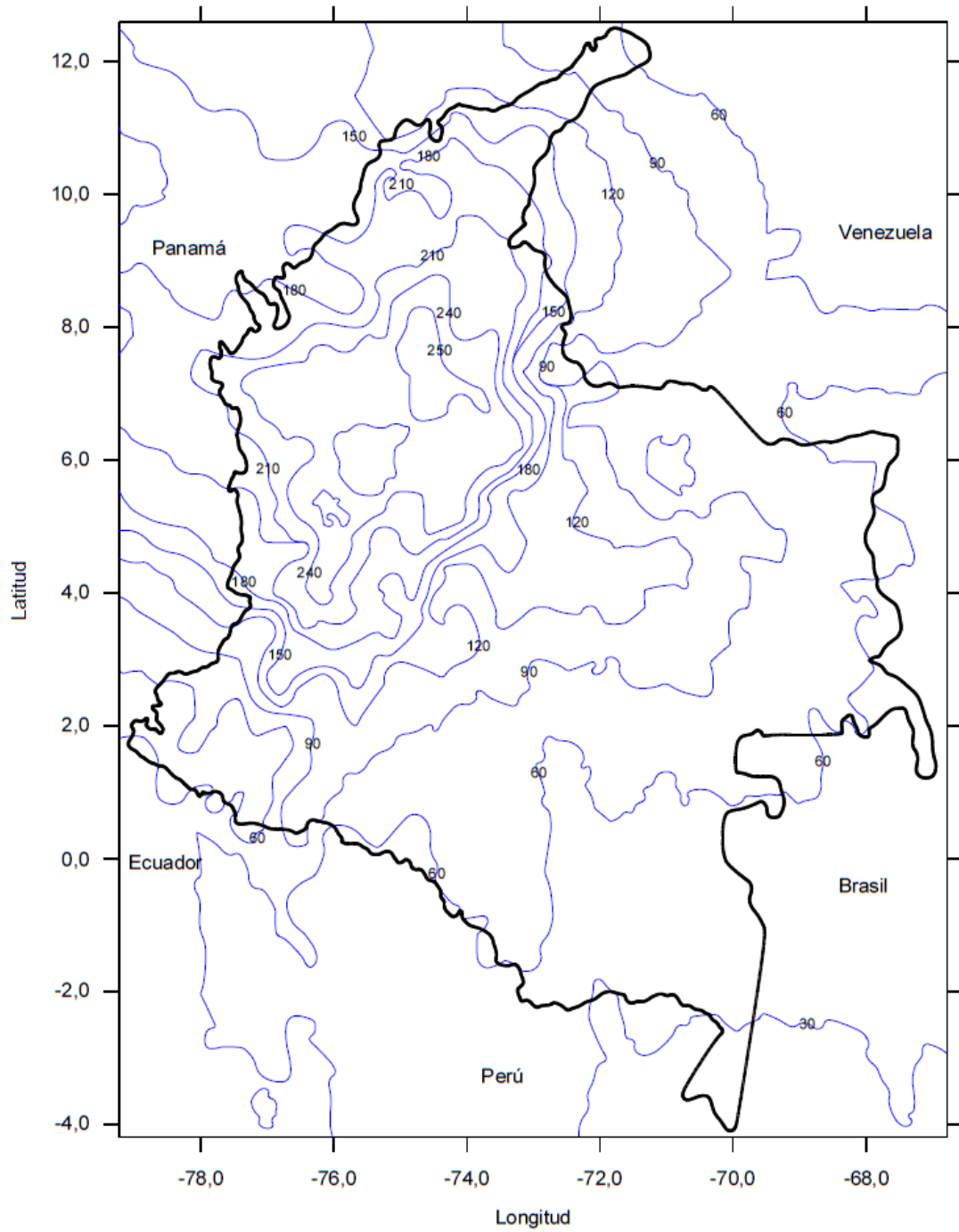
aumenta, siendo más intenso (hasta 500 [kV/m]) en las partes sobresalientes de la superficie (edificios, árboles, antenas, etc., por el “efecto de punta”). Desde estos elementos sobresalientes parte una descarga ascendente también débil inicialmente. Cuando la distancia entre ambos precursores llega a valores entre 50 y 100 metros se establece el contacto entre ambos por ruptura de la rigidez dieléctrica del aire, iniciándose la conducción por corriente intensa, las cargas fluyen bruscamente al suelo a través del “canal ionizado” que vincula eléctricamente la nube con el suelo, como camino conductor [12].

Se ha encontrado que estos impulsos negativos contienen picos de corriente en el rango de 2 kA a 300 kA y una duración tal que en 10  $\mu$ s, la corriente alcanza un valor máximo y luego decae más lentamente para llegar a un 50% del valor pico, en un tiempo de aproximadamente 50  $\mu$ s contados desde el inicio del impulso. La corriente luego decae a cero o mantiene un valor continuo del orden de una centena de amperes. La banda espectral asociada se extiende desde unos 10 kHz hasta varios MHz [8].

Por el ambiente donde ocurren las descargas atmosféricas y por las causas que les dan origen, el IER presenta las características propias de un fenómeno climático. Es decir, con estacionalidad del momento del año en el que pueden ocurrir con mayor probabilidad, pero con variaciones considerables en cuanto al tipo, cantidad o intensidad de las descargas. Aunque existen síntomas claros que preceden la ocurrencia de las descargas atmosféricas, no resulta posible predecir con certeza el momento o el lugar de impacto, ni la intensidad de los parámetros eléctricos y/o electromagnéticos. De esta manera, todas las mediciones realizadas sirven para ser acumuladas y analizadas en términos estadísticos, permitiendo luego hablar sobre probabilidad de la ocurrencia de un determinado tipo de descarga.

Con el fin de evaluar el riesgo debido a descargas atmosféricas en Colombia (mediante datos estadísticos), en la Figura 23 se identifican los niveles ceraucicos que corresponden al número de días tormentosos en el año para áreas de 30 km x 30 km.

Figura 23. Mapa de ISO-Niveles ceraunicos para Colombia (Área de 30 km x30 km) – 1999.



### 3.3. Problemas de incompatibilidad electromagnética asociados al SPT<sup>59</sup> de los SIPRA<sup>60</sup>.

Existen diversas perturbaciones eléctricas que causan IEM<sup>61</sup> en los sistemas eléctricos y electrónicos asociadas con el IER<sup>62</sup>, transmitiéndose a los equipos mediante diferentes canales de acople. Estas perturbaciones pueden generarse tanto al interior de la edificación cuando el rayo impacta directamente la estructura, como en el exterior cuando este impacta las líneas de entrada o el suelo en una zona cercana al edificio.

Los canales de acoplamiento<sup>63</sup> de estas perturbaciones incluyen:

- Acoplamientos resistivos (por ejemplo, a través de la impedancia a tierra del sistema de puesta a tierra o la resistencia del blindaje del cable)
- Acoplamiento magnético (producido por el campo magnético generado en los bucles de cableado en el sistema eléctrico y electrónico o por la inductancia de conductores de conexión);
- Acoplamiento de campos eléctricos radiados (por ejemplo, cuando los conductores se comportan como antenas de recepción, o cargas estáticas).
- Acoplamientos radiados de campos electromagnéticos que pueden generarse directamente a través de la corriente de rayo que fluye en el canal ionizado, o la corriente parcial del rayo que fluye en los conductores (por ejemplo, en los bajantes del SIPRA).

A través de estos canales, las perturbaciones electromagnéticas generadas por el IER, alcanzan las instalaciones eléctricas afectando la operación y la de los elementos conectados a la misma, además de generar situaciones de alto riesgo eléctrico para las personas. Estas situaciones serán tratadas a continuación.

---

<sup>59</sup> SPT: Sistema de puesta a tierra.

<sup>60</sup> SIPRA: Sistema de protección contra rayos.

<sup>61</sup> IEM: Interferencia electromagnética.

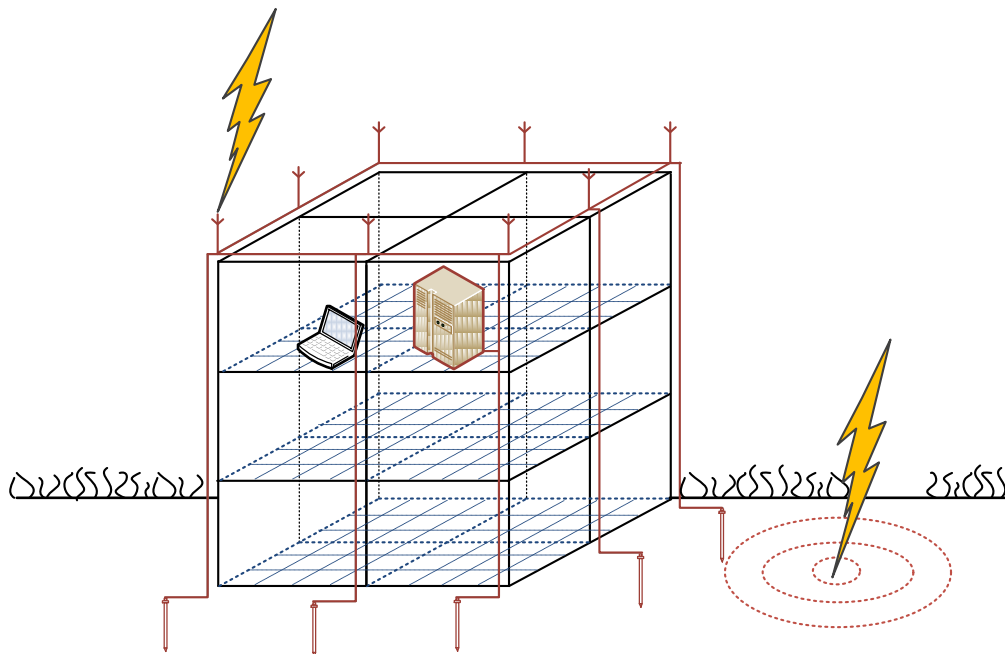
<sup>62</sup> IER: Impulso electromagnético del rayo.

<sup>63</sup> Ver anexo A.

### 3.3.1. Diferencias de potencial.

Las descargas atmosféricas e inclusive una nube cargada electrostáticamente pueden causar grandes diferencias de potencial, tanto al interior de una edificación como a los alrededores. Como lo indica la Figura 24, cuando las corrientes de gran magnitud se inyectan en el terreno, ya sea directamente o a través de los bajantes del SIPRA (o el conductor de puesta a tierra en el caso de una falla del sistema), elevan el potencial del sistema de puesta a tierra (y los elementos metálicos conectados a él) o de la zona circundante al punto de inyección. Este fenómeno es conocido como elevación del potencial de tierra GPR<sup>64</sup> [14].

**Figura 24. Diferencias de potencial generadas por descargas atmosféricas entre puntos del terreno, elementos del sistema de puesta a tierra, la estructura metálica del edificio y equipos en su interior.**



Fuente: Autor

Las diferencias de potencial producidas por las descargas atmosféricas, generan corrientes que fluyen hacia todos y cada uno de los cuerpos conductores a tierra,

---

<sup>64</sup> GPR (Ground Potential Rise): Elevación de potencial de tierra.

incluyendo concreto reforzado, tubos, alambres de cobre e incluso los seres vivos, comprometiendo la seguridad y la integridad de las personas y los equipos. Los efectos pueden ir desde problemas de referencia en los dispositivos, hasta la aparición de corrientes destructivas. En el caso de generarse una chispa entre un objeto y tierra o a otro objeto de potencial diferente por acumulación de carga estática, puede ser la causa de un incendio o una explosión, si se lleva a cabo en presencia de materiales o mezclas de gases inflamables [8].

### **3.3.2. Sobretensiones en el sistema.**

Las sobretensiones debidas a descargas atmosféricas son el resultado de impactos directos en los conductores del sistema, como también de efectos indirectos.

Cuando estos impulsos de corriente son llevados a través de la impedancia de los conductores, el potencial de estos se eleva significativamente generando descargas secundarias a tierra, desviando gran parte de la corriente y reduciendo el nivel al que son expuestos los equipos ubicados al final del sistema.

Los efectos indirectos, incluyen la inducción de sobretensiones en bucles formados por los diferentes conductores al interior de la instalación, así como en la estructura del edificio [15]; además de las sobretensiones generadas por el aumento de los potenciales de tierra debido a las corrientes del rayo inyectadas en los conductores del sistema de puesta a tierra [2].

Un impacto directo de un rayo al sistema puede activar los DPS<sup>65</sup>, produciendo una reducción severa o pérdida completa de la tensión del sistema por aproximadamente medio ciclo. A su vez, una descarga en una línea de transmisión puede ocasionar el disparo de las protecciones, generando un retraso de reenganche de varios ciclos y causando un apagón momentáneo. Por lo tanto, un rayo puede ser la causa obvia de sobretensiones cerca de su punto de impacto, además de ser una causa menos obvia de la pérdida de tensión a una distancia considerable desde el punto de impacto.

---

<sup>65</sup> Dispositivos de protección contra sobretensiones.

### **3.3.3. IEM<sup>66</sup> debida a los Campos magnéticos generados por el IER<sup>67</sup>.**

Teniendo en cuenta que el principio del funcionamiento de un sistema de protección contra rayos es atraer la descarga hacia los terminales de captación, su aplicación genera un peligro para los equipos electrónicos sensibles en los edificios de gran altura, pues una corriente de rayo extremadamente grande fluirá a tierra a través de los bajantes del SIPRA<sup>68</sup>. De acuerdo con la ley de Faraday, esta corriente generará un intenso campo magnético alrededor de los conductores bajantes en el interior del edificio. Este campo magnético transitorio, traerá serias interferencias electromagnéticas en los equipos eléctricos al interior de los edificios, tales como mal funcionamiento o incluso la destrucción de equipos electrónicos sensibles [16]. Ya que las aplicaciones electrónicas siguen en aumentos, así como su abundante presencia en edificios de gran altura (tales como computadoras y equipos de redes de telecomunicaciones), el riesgo de un IER se convierte en un problema importante, y se deben tomar las medidas adecuadas para garantizar la seguridad y la operación adecuada de la instalación.

### **3.3.4. Altas impedancias en los conductores del SPT.**

Actualmente, es comprensible que tanto el diseño como la evaluación del desempeño de los sistemas de puesta a tierra, se fundamente en la resistencia de puesta a tierra para la frecuencia nominal del sistema (60 Hz), considerando que las corrientes de falla que este sistema debe despejar poseen la misma frecuencia. Sin embargo, el comportamiento del SPT<sup>69</sup> es muy diferente para sobrecorrientes de falla de alta frecuencia, pues se conoce que los impulsos de corriente de frente rápido (tales como las de una descarga atmosférica) hacen que la efectividad del sistema de puesta a tierra se degrade [17]. Por esta razón, es importante el estudio de cómo minimizar tanto la resistencia cómo la reactancia del SPT en los sistemas de protección contra rayos [8].

---

<sup>66</sup> IEM: Interferencia electromagnética.

<sup>67</sup> IER: Impulso electromagnético del rayo.

<sup>68</sup> SIPRA: Sistema de protección contra rayos.

<sup>69</sup> SPT: Sistema de puesta a tierra.

### **3.4. Buenas prácticas en el diseño de los SPT para SIPRA, orientadas a la mitigación de los problemas de incompatibilidad electromagnética.**

#### **3.4.1. Integración de los elementos metálicos de la estructura en una red de equipotencialización RE.**

La norma internacional IEC 62305-4:2010 [18], requiere que todos los elementos de un SPT estén conectados entre sí formando una red de equipotencial RE. Teniendo en cuenta que, tanto la cimentación como las columnas de grandes estructuras y plantas industriales utilizan concreto reforzado, las varillas de refuerzo en los cimientos, paredes y losas de cimentación pueden integrarse a la red equipotencial. Adicionalmente, el acero estructural puede ser conectado directamente al sistema de captación como lo indica la Figura 29, de tal forma que actúen como bajantes naturales complementando los conductores bajantes del SIPRA.

Por su parte, las varillas de refuerzo de los cimientos, pueden ser empleadas como un excelente electrodo de puesta a tierra<sup>70</sup>. Esta configuración logra una efectiva puesta a tierra a un costo mínimo [19]. Además, la estructura de acero de la construcción, puede ser utilizada de manera efectiva para referenciar el sistema de suministro de energía eléctrica, telecomunicaciones e instalaciones electrónicas de la construcción [19].

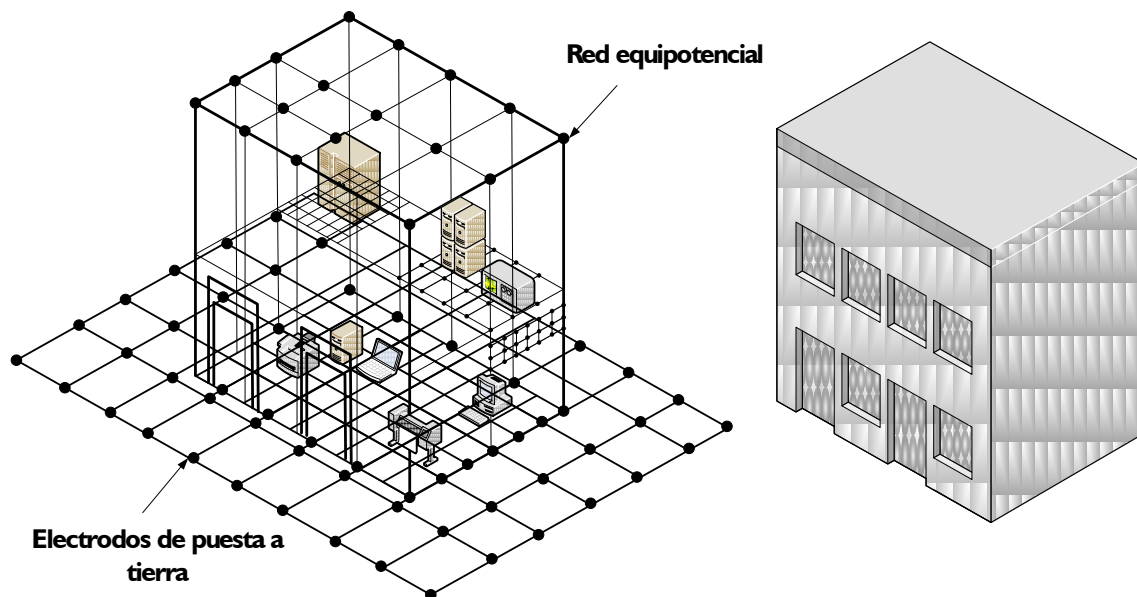
A partir de lo anterior, la RE está compuesta por el conjunto de conductores que conecta las partes metálicas no energizadas del sistema eléctrico y la estructura de una instalación hasta los electrodos de puesta a tierra, permitiendo [18]:

- ✓ Reducir considerablemente las diferencias de potencial entre los elementos al interior de la instalación.
- ✓ Mitigar los campos magnéticos, actuando como un blindaje.
- ✓ Reducir problemas de referencia en los sistemas electrónicos.
- ✓ Reducir la impedancia del sistema de puesta a tierra.

---

<sup>70</sup> Siempre y cuando se cumplan los requerimientos de [19] sección 5.4.

**Figura 25. Ejemplo de una SPT tridimensional, que integra la estructura de la edificación en una y la cimentación como electrodos de puesta a tierra.**



Fuente: [20].

La RE puede ser diseñada como una estructura de malla tridimensional con un ancho de malla típicamente inferior a 5 m (ver Figura 25), lo que requiere múltiples interconexiones de componentes metálicos sobre la estructura (tales como los refuerzos de acero en concreto, rieles del ascensor, grúas, cubiertas metálicas, fachadas metálicas, marcos metálicos de ventanas y puertas, marcos metálicos del piso, tuberías de servicio y bandejas portacables). De esta manera, los componentes naturales de la estructura, tales como el refuerzo metálico en los techos, paredes, pisos y fachadas metálicas se comportan como blindajes magnéticos de las ZPR<sup>71</sup>. Adicionalmente se deben integrar a la RE las barras de equipotencialización (ver ANEXO D).

---

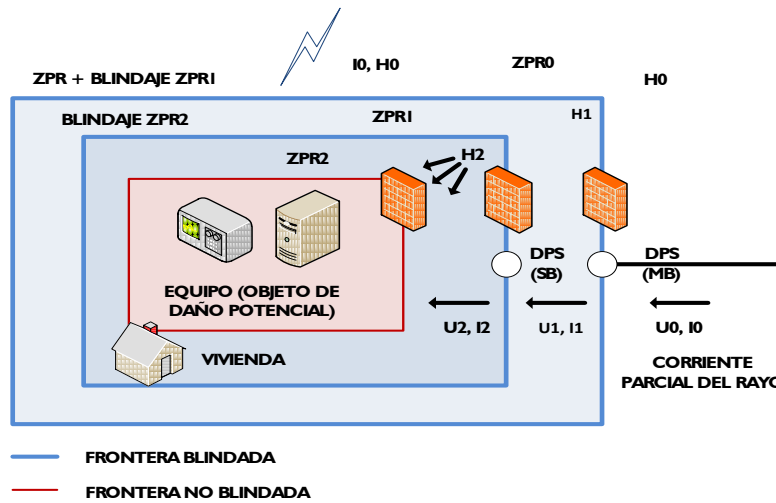
<sup>71</sup>La NTC 4552 establece:

Con respecto a la protección contra el rayo se definen las siguientes ZPR:

- ZPR 0<sub>A</sub> Expuesto a impactos directos del rayo, donde la corriente y el campo magnético del rayo no son amortiguados.
- ZPR 0<sub>B</sub> Protegido contra impactos directos del rayo, donde la corriente parcial o inducida del rayo y el campo magnético no son amortiguados.
- ZPR 1 Protegido contra impactos directos del rayo, donde la corriente parcial o inducida del rayo y el campo magnético son amortiguados.
- ZPR 2 n Como la ZPR 1 pero el campo magnético es más amortiguado.

Cuando se establecen uniones equipotenciales en los sistemas al interior de una ZPR, las corrientes parciales del rayo pueden fluir dentro de estos sistemas. Por lo tanto, este efecto debe ser considerado en el diseño de las zonas de protección, la coordinación de DPS<sup>72</sup> y la ubicación de los equipos al interior del edificio (blindaje espacial) dentro de un “volumen de seguridad”<sup>73</sup> definido (Ver Figura 26).

**Figura 26. Límites en las ZPR que utilizan como blindaje la red equipotencial y un sistema coordinado de DPS de tal manera que ( $U_2 \ll U_0$  y  $I_2 \ll I_0$ ) y la radiación de campos magnéticos ( $H_2 \ll H_0$ ).**



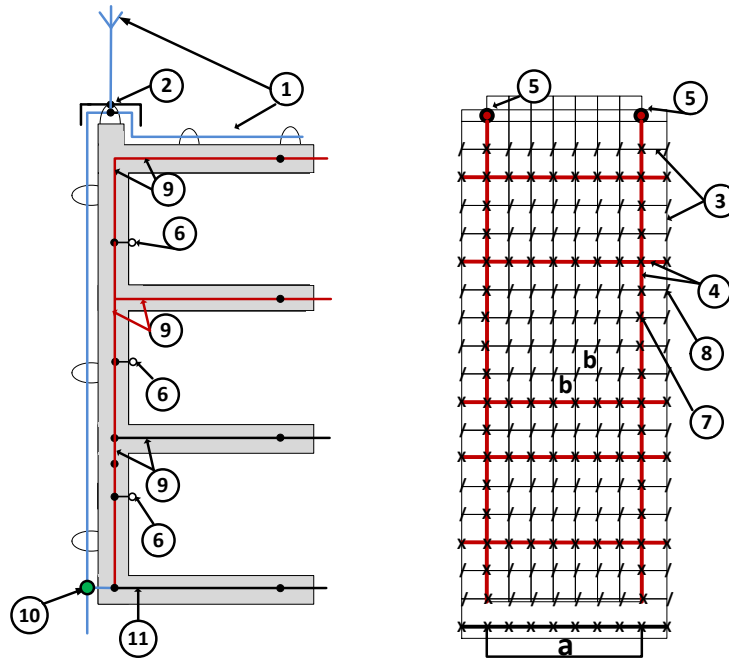
Fuente: [20]

Ejemplos de redes de equipotencialización (RE) son mostrados en la Figura 27 y Figura 28. En la parte izquierda de la Figura 27 se muestra un corte transversal de una edificación esquematizando la RE, y en la parte derecha se muestra la forma como se debe integrar el acero de refuerzo de la estructura a la RE.

<sup>72</sup> Dispositivos de protección contra sobretensiones.

<sup>73</sup> Para más detalles sobre la ubicación de los equipos, consulte el ANEXO A de [18].

**Figura 27. Utilización de las varillas de refuerzo de una estructura para la unión equipotencial.**



Fuente: [18]. IEC 62305-4.

- 1) Bajantes y sistema de captación del rayo (línea azul).
- 2) Cubierta metálica para el soporte del techo.
- 3) Acero de refuerzo de la estructura.
- 4) Conductores de malla superpuestos sobre el acero de refuerzo.
- 5) Unión común de conductores de malla.
- 6) Unión común para una barra de equipotencialización interna.
- 7) Conexión hecha mediante sujeción o soldadura. En la que se debe garantizar una unión firme de los conductores de malla y acero de refuerzo de la estructura.
- 8) Conexión arbitraria. Una conexión propia del acero de refuerzo de la estructura, comúnmente están hechas a través de sujeción hecha por alambres (empalmes).
- 9) Acero reforzado<sup>74</sup> en concreto (con los conductores de malla superpuestos).

---

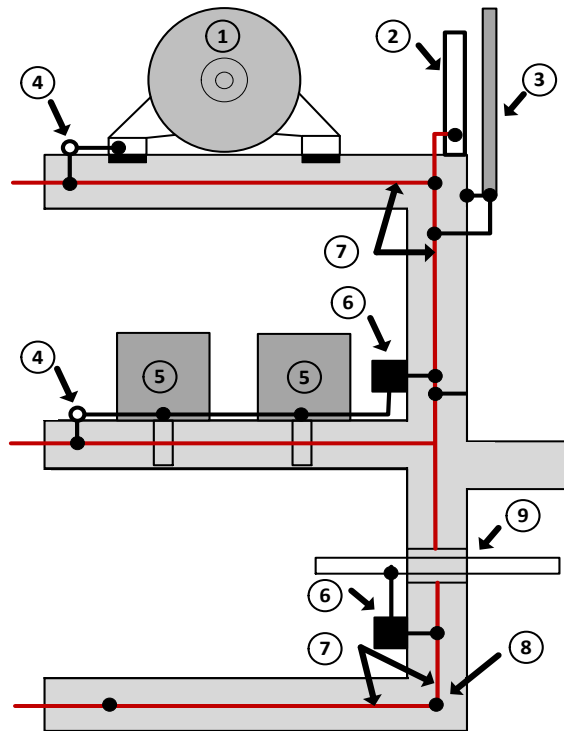
<sup>74</sup> “Steel Reinforcement” en idioma inglés.

- 10) Anillo del electrodo de puesta a tierra (punto verde). Es aquel en el cuál se equipotencializan todos los electrodos de un sistema de puesta a tierra.
- 11) Electrodo en cimentación. Es aquel acero de refuerzo que está en contacto con la tierra

**a** : Distancia típica de 5 m para los conductores superpuestos en la malla.

**b** : Distancia típica de 1 m para la conexión de ésta malla con los refuerzos.

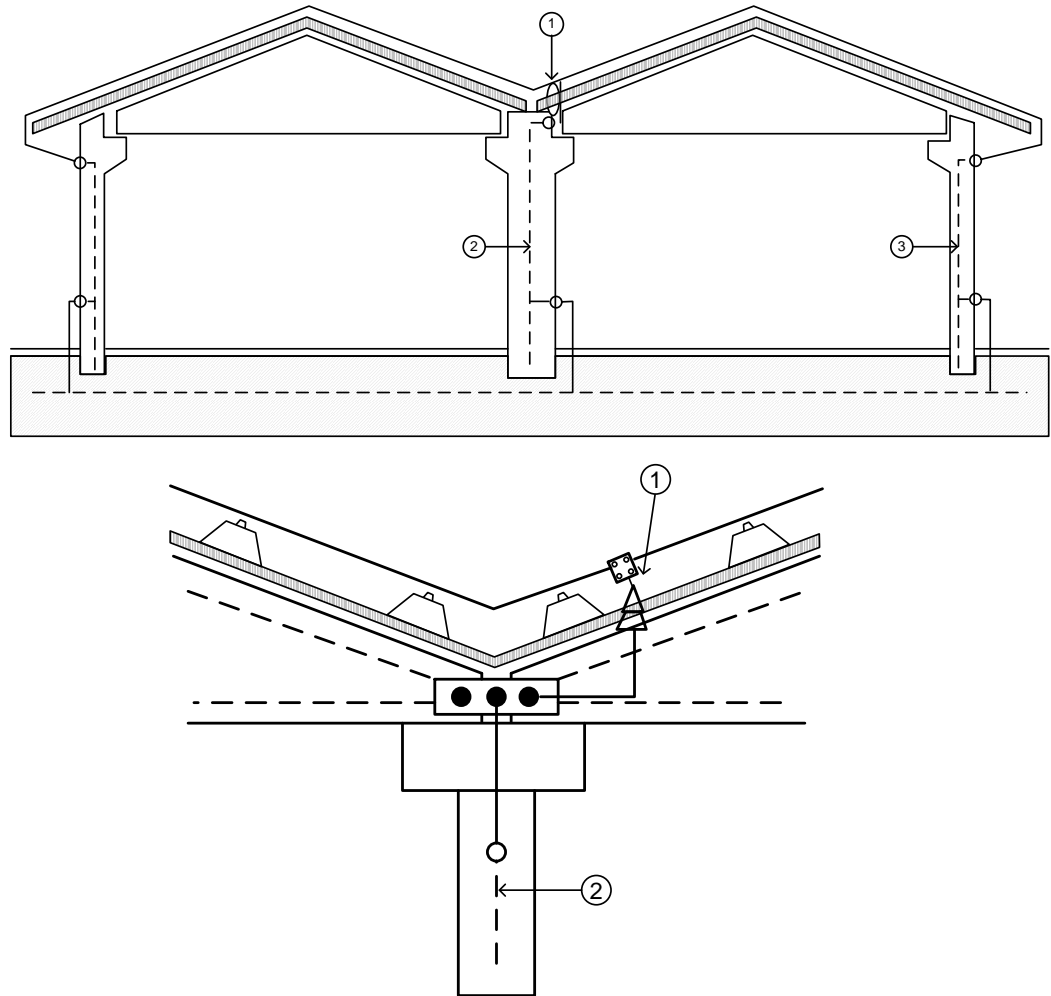
**Figura 28. Unión equipotencial en una estructura con refuerzos de acero.**



Fuente: [18]. IEC 62305-4.

- 1) Equipo eléctrico. (Motor, generador)
- 2) Vigas de acero
- 3) Cubierta metálica de la fachada
- 4) Conjunto de interconexiones.
- 5) Equipos eléctricos o electrónicos
- 6) Barra de equipotencialización.
- 7) Acero de refuerzo en concreto (Con los conductores de malla superpuestos).
- 8) Cimentación de los electrodos del SPT
- 9) Punto común de entrada para los diferentes servicios.

**Figura 29. Conductores bajantes internos en estructuras industriales.**



- 1 Conductor del SIPRA atravesando un buje de acople a prueba de agua.
- 2 Refuerzo en acero en una columna de concreto
- 3 Refuerzo en acero en una pared.

Fuente: [19]. IEC 62305-4.

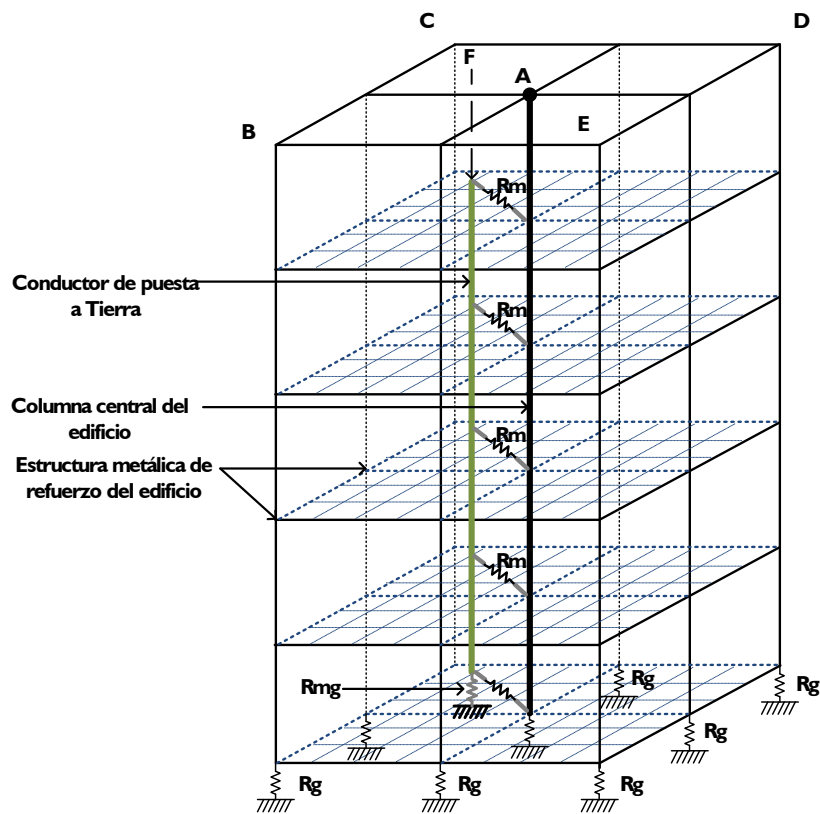
### **3.4.2. Posicionamiento de los conductores de puesta a tierra y conexión con la estructura de la edificación [15].**

Teniendo en cuenta que en edificios de gran altura se recomienda integrar la estructura metálica de refuerzo del edificio como conductores bajantes (ver sección 3.4.1), cuando un edificio es golpeado por un rayo se producen altas

sobretensiones entre los conductores de puesta a tierra al interior de la construcción y la estructura del edificio (ver sección 3.3.2).

Bajo las condiciones presentadas en el párrafo anterior, la corriente de rayo que fluye en las columnas exteriores es mayor que en una columna central, debido al efecto piel (Ver Figura 30). A partir de esto, el método de conexión a tierra de los electrodos y la forma como se disponen los conductores de puesta a tierra al interior del edificio, toma gran importancia.

**Figura 30. Modelo de la estructura de refuerzo de un edificio y los conductores de puesta a tierra.**



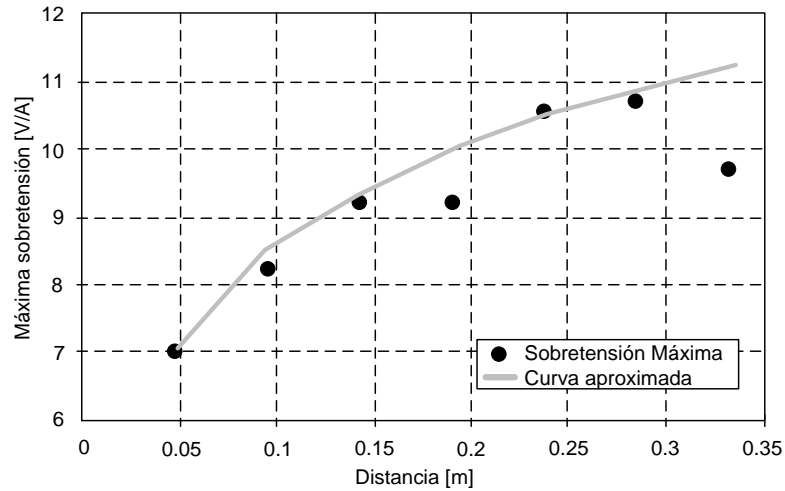
**$R_m$ :** Resistencia de aislamiento de un equipo al interior del edificio.  
 **$R_g$ :** Resistencia de puesta a tierra de la estructura del edificio.  
 **$R_{mg}$ :** Resistencia de puesta a tierra del sistema de alimentación.

Fuente: [15]. Optimum Position of a Grounding Wire within a Building for Reduction of Lightning Surge Voltages.

Como lo indica la Figura 31, investigaciones han mostrado una relación logarítmica entre las sobretensiones entre los conductores de puesta a tierra y la

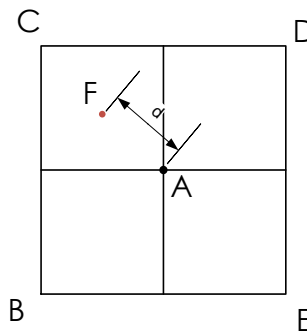
columna central del edificio, respecto a la distancia entre los mismos (ver Figura 32), independientemente de la simetría del edificio; indicando que al instalar los conductores de puesta a tierra de los equipos lo más cerca posible de la columna central del edificio, se reduce de manera significativa (hasta un 40%) las sobretensiones debidas a las descargas atmosféricas.

**Figura 31. Máxima sobretensión presentada entre el conductor de puesta a tierra y la estructura vs distancia entre ellos.**



Fuente: [15].

**Figura 32. Distancia entre el conductor de puesta a tierra y la columna central de la construcción.**



Fuente: [15].

Por otra parte, en la práctica existen dos métodos aplicados en edificaciones para conectar a tierra la estructura del edificio. El primero es el método de “conexión a tierra independiente” en el cual el conductor de puesta a tierra y la estructura del edificio están conectados a tierra de forma individual. En el segundo método, el conductor de puesta a tierra, está conectado a un punto de la estructura cercano,

en el primer nivel, se conoce como el método de “conexión a tierra común”. Entre estos dos métodos, se recomienda la aplicación del método de “conexión a tierra común” respecto al de “conexión a tierra independiente”, pues este reduce las sobretensiones hasta en un 54% [15].

### **3.4.3. Dimensionamiento de los conductores del SPT de los SIPRA.**

La efectividad del SIPRA depende de forma significativa de la disposición y el dimensionamiento de los conductores del SPT [3], por esta razón el diseñador debe tener consideraciones especiales para garantizar que la respuesta del sistema contribuya a mitigar los problemas de incompatibilidad electromagnética.

#### **3.4.3.1. Dimensionamiento de los electrodos de puesta a tierra en los SIPRA.**

La instalación de contrapesos de longitudes considerables es una práctica común para reducir la resistencia de puesta a tierra de un sistema de electrodos [21]. Sin embargo, la impedancia de puesta a tierra de estos arreglos bajo altas frecuencias es mayor que la de un electrodo de menor longitud, aunque la resistencia de tierra en estado estacionario medida por un instrumento convencional indique lo contrario. De esta manera una baja resistencia de puesta a tierra en estado estacionario, no siempre representa una tierra de baja impedancia para altas frecuencias, puesto que la efectividad de los sistemas de puesta a tierra a alta frecuencia está principalmente influenciada por las caídas de tensión inductivas [22].

Por lo tanto, la aplicación de electrodos de grandes longitudes no permite reducir la impedancia de puesta a tierra, luego la aplicación no es adecuada para la protección contra rayos y sobretensiones (Ver sección 4.2.4).

#### **3.4.3.2. Consideraciones en el dimensionamiento de los conductores bajantes [19].**

Para cada elemento de captación, deben disponerse al menos dos conductores bajantes y deben ser distribuidos alrededor del perímetro de la estructura a ser protegida con separaciones iguales, sujeto a restricciones arquitectónicas y prácticas. La Tabla 2 indica valores típicos de la distancia entre bajantes y entre

los conductores de anillo de acuerdo con el nivel de protección contra rayos (NPR).

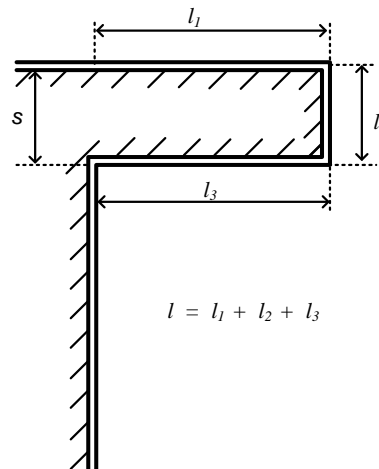
**Tabla 2. Valores típicos de distancia entre conductores bajantes.**

Nivel de protección contra rayos NPR	Distancias típicas [m]
I	10
II	10
III	15
IV	20

Fuente: [19]. IEC 62305-3.

Los conductores bajantes deben ubicarse tan rectos y verticales como sea posible con el fin de proveer el camino más corto y directo a tierra.

**Figura 33. Bucle en un conductor bajante.**



Fuente: [19]. IEC 62305-3.

La formación de bucles debe evitarse, pero cuando no es posible la distancia  $s$  indicada en la Figura 33, debe ser mayor al valor obtenido a partir de la siguiente expresión y considerando los coeficientes de la Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5:

—

Depende de la clase de SIPRA seleccionado.

Depende de la corriente eléctrica que circula por los conductores bajantes.

Depende del material del aislamiento eléctrico.

Es la longitud, en metros del conductor bajante, desde el punto donde la distancia de separación debe ser considerada, hasta el punto más cercano de compensación de potencial.

**Tabla 3. Aislamiento entre elementos del SIPRA externo – Valores de coeficientes  $k_i$ .**

<b>Nivel de protección contra rayos NPR</b>	
I	0,08
II	0,06
III y IV	0,04

Fuente: [19]. IEC 62305-3.

**Tabla 4. Aislamiento entre elementos del SIPRA externo – Valores de coeficientes  $k_c$**

<b>Número de conductores bajantes <math>n</math></b>	
1	1
2	1 ... 0,5
4 y más	1 ... $1/n$

Fuente: [19]. IEC 62305-3.

**Tabla 5. Aislamiento entre elementos del SIPRA externo – Valores de coeficientes  $k_m$**

<b>Material</b>	
Aire	1
Concreto, ladrillos	0,5

NOTA 1: Cuando hay varios materiales aislantes en serie, es una buena práctica utilizar el valor más bajo para

NOTA 2: El uso de otros materiales de aislamiento está bajo consideración.

Fuente: [19]. IEC 62305-3.

### 3.4.3.3. Tratamiento del terreno.

Teniendo en cuenta que la impedancia de puesta a tierra se desarrolla en gran medida en la zona circundante al punto de inyección del terreno, donde igualmente se encuentra el electrodo de puesta a tierra, es un concepto razonable tratar dicha región para disminuir su resistividad, ya que los impulsos de frente rápido son dispersados más efectivamente en suelos con baja resistividad cerca del punto de inyección de corriente. Se recomienda tratar el terreno mediante la adición de tierra de alta conductividad y agentes reductores a la hora de diseñar el sistema de puesta a tierra para sistemas de protección contra rayos [17].

A continuación, se resume mediante la Tabla 6, las perturbaciones electromagnéticas mencionadas en este capítulo y las prácticas en el diseño de los SPT, para mitigar su impacto en los sistemas de protección contra rayos.

**Tabla 6. Problemas de incompatibilidad de electromagnética y buenas prácticas en el diseño de los SPT de SIPRA, para mitigarlas.**

<b>Problema</b>	<b>Sección</b>	<b>Practica Recomendada</b>	<b>Sección</b>
Diferencias de potencial.	3.3.1	Red equipotencial (RE)	3.4.1
Acumulación de carga estática	3.3.1		
Problemas de referencia en los equipos al interior de la edificación.	3.3.1		
Campos magnéticos	3.3.3		3.6.1.
Sobretensiones	3.3.2	Posicionamiento óptimo de los conductores de puesta a tierra.	3.4.2
Altas impedancias presentadas por los elementos que componen el SPT.	3.3.4	Consideraciones en el dimensionamiento de los conductores bajantes.	3.4.3.2
		Tratamiento químico del terreno	3.4.3.3

Fuente: Autor.

#### **4. PROBLEMAS QUE GENERAN IEM EN LOS EQUIPOS DE POTENCIA Y BUENAS PRÁCTICAS EN EL DISEÑO DEL SPT<sup>75</sup> DE POTENCIA PARA MITIGARLOS.**

Teniendo en cuenta que una instalación eléctrica de uso final<sup>76</sup> está destinada a la conexión de equipos o aparatos para el uso final de la energía eléctrica [23]. A lo largo de este capítulo se abordarán las prácticas en el diseño de los SPT orientadas a mitigar los problemas de incompatibilidad electromagnética en sistemas y equipos de potencia, dentro de las instalaciones eléctricas de uso final. En primera instancia, en el numeral 4.2 se describen las fuentes y la naturaleza de las principales perturbaciones que generan IEM<sup>77</sup> en los sistemas eléctricos de potencia, de las instalaciones eléctricas de uso final, posteriormente en la sección 4.3, se tratan las alternativas de diseño que permiten mitigar estas perturbaciones.

##### **4.1. Perspectiva general**

En la actualidad, las instalaciones eléctricas de uso final integran sistemas eléctricos de potencia y sistemas electrónicos, que en conjunto son esenciales para garantizar el confort dentro de una instalación residencial o para mantener o mejorar la productividad en las instalaciones comerciales e industriales. De esta manera los sistemas de comunicaciones, procesamiento de información, automatización y control, iluminación, calefacción o refrigeración al interior de una instalación toma gran relevancia, ya que la susceptibilidad a las perturbaciones y las características de la operación son muy diferentes y deben ser tenidas en cuenta durante el diseño para garantizar la seguridad, la continuidad y una adecuada operación.

Los sistemas eléctricos de potencia involucran cargas para diferentes aplicaciones como motores, bombas y maquinaria especializada para procesos industriales, en las cuales puede estar incluido un sistema para el control. De esta manera, el sistema de puesta a tierra además de garantizar la seguridad de la instalación, cumple un papel importante en la operación los sistemas eléctricos de potencia,

---

<sup>75</sup> SPT: Sistemas de puesta a tierra.

<sup>76</sup> Pueden abarcar la acometida y la subestación de la edificación, ver definición en el glosario.

<sup>77</sup> IEM: Interferencia electromagnética.

pues proveen un potencial de referencia para el equipo y el sistema de control, y al mismo tiempo un adecuado diseño permite mejorar la calidad de la energía y atenuar las perturbaciones que causan IEM [24].

#### **4.2. Problemas de incompatibilidad electromagnética asociados al SPT de potencia.**

La operación de los sistemas eléctricos de potencia en las instalaciones de uso final, involucra un entorno electromagnético altamente perturbador, debido a la presencia en la red de constantes fluctuaciones de tensión (asociadas al arranque, conmutación de grandes cargas inductivas y fallas del sistema), y a un alto contenido armónico debido al creciente uso de la electrónica de potencia para aplicaciones de control, entre otras. Estas perturbaciones pueden ser muy nocivas para el sistema eléctrico de potencia, pues su presencia, por ejemplo en una planta industrial, puede causar desde defectos en el producto debido a mala operación de las máquinas, hasta la salida de toda la planta originando pérdidas millonarias.

Conocer las características de operación y las posibles perturbaciones presentes en el sistema de potencia, es el primer paso para comprender e identificar las prácticas en el diseño de los SPT, que permitirán garantizar la seguridad y un adecuado funcionamiento.

##### **4.2.1. Perturbaciones causadas por malas prácticas de cableado y conexión a tierra.**

Un gran porcentaje de los problemas en la calidad de la energía se asocian con las prácticas inapropiadas de cableado y de conexión a tierra [25]. Estas prácticas son el resultado, tanto desconocimiento o malas interpretaciones de los requerimientos del fabricante por parte del usuario final, como exigencias inapropiadas de los mismos fabricantes [2]. Como se verá a continuación, estas prácticas generan tensiones y corrientes parasitas que afectan la operación de los sistemas eléctricos de potencia de las instalaciones eléctricas de uso final.

###### **4.2.1.1. Conexiones neutro tierra.**

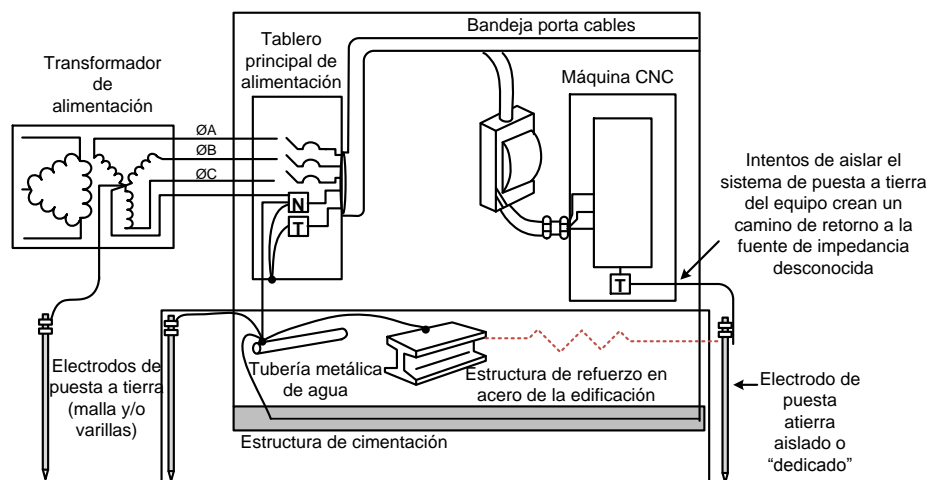
En un sistema correctamente cableado y configurado, toda la corriente de alimentación volverá a la fuente a través del conductor neutro (sistemas monofásicos), o una combinación de los conductores de fase y neutro. Como se trató en la sección 2.3.2. La inapropiada conexión de conductores neutros y

conductores de puesta a tierra de equipos al interior de paneles de alimentación o en piezas individuales de equipos, permite que parte de las corrientes de retorno circulen por los conductores del sistema de puesta a tierra, elevando el potencial de los elementos conectados por encima del potencial de tierra, a pesar de que esta práctica constituye una violación del Código Eléctrico Colombiano y del NEC [6], se encuentra de manera frecuente en instalaciones eléctricas de uso final, tanto nuevas como antiguas, generando alto riesgo eléctrico para el personal y afectando de manera significativa la operación de las protecciones y equipos conectados a la red.

#### 4.2.1.2. Tierras aisladas.

Al igual que en los equipos electrónicos (Ver Sección 2.3.3), el afán de aislar los sistemas eléctricos de potencia, de posibles ruidos presentes en el SPT de la red; o cuando los fabricantes requieren un electrodo adicional de puesta a tierra para una máquina, hace que estos incidan en prácticas inadecuadas como son las tierras aisladas. El usuario final es el responsable de asegurar que su instalación cumpla con los requisitos normativos. Aunque esta práctica es permitida por el Código Eléctrico Colombiano, el electrodo adicional está destinado a ser un complemento de conexión a tierra, y debe estar equipotencializado con el resto del sistema de puesta a tierra de la instalación. A menudo este electrodo adicional es considerado incorrectamente como “aislado” del ruido del sistema de puesta a tierra del edificio, o “dedicado” a la máquina en cuestión, lo que conlleva a la instalación de una puesta a tierra aislada tal como se muestra en la Figura 34.

**Figura 34. Instalación incorrecta e insegura de una tierra "aislada o dedicada" para una máquina CNC.**



Fuente: [26]. Power Quality Considerations for CNC Machines : GROUNDING

La presencia de este electrodo aislado lejos de reducir el ruido eléctrico, permite que se generen diferencias de potencial con el SPT y los elementos conectados a él (ruido de modo común), que pueden llegar a ser significativamente altas en el caso que ocurra una falla en el sistema o en caso de una descarga atmosférica impacte las líneas de alimentación o el terreno, comprometiendo la seguridad de la instalación y la integridad de los elementos conectados a la red.

#### **4.2.1.3. Secundario del transformador sin conexión a tierra.**

Esta configuración puede presentarse de manera intencional o puede ser el resultado de una deficiente conexión del neutro al sistema de puesta a tierra. Si el devanado secundario de un sistema derivado independiente no está conectado a tierra, el neutro del sistema de distribución “flotará” o perderá su referencia a tierra [27]. Esta situación puede originar huecos y sobretensiones con respecto a tierra en el secundario del transformador, incluso cuando no existen fluctuaciones de tensión en la entrada, adicionalmente las tensiones de fase medidas respecto a tierra pueden alcanzar valores altos durante la operación normal, provocando mal funcionamiento y/o daños en los equipos de potencia [25].

#### **4.2.2. Contenido de armónicos en la red.**

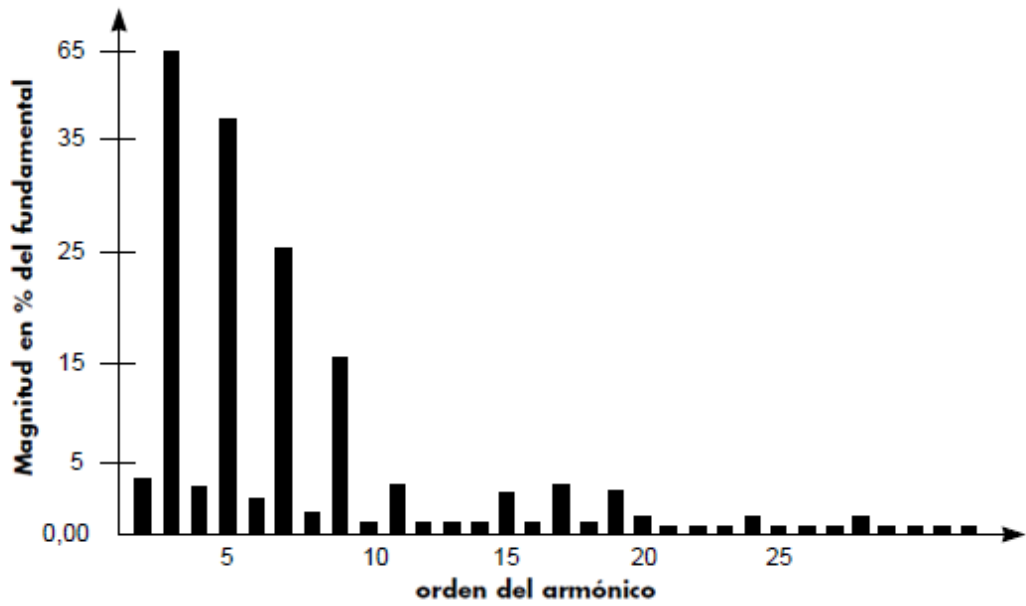
El incremento en el uso de aplicaciones con bajos niveles de potencia como circuitos de transmisión de datos digitales, en combinación con el rápido crecimiento del nivel de ruido en los conductores de circuitos de potencia, como consecuencia de la modulación del tiempo en convertidores de corriente (usualmente rectificadores controlados de silicio SCR's), diseñados para controlar aplicaciones de calefacción, graduadores de iluminación, control de velocidad de motores etc. [8], han ocasionado una fuerte presencia de componentes armónicas en la red de distribución. La Figura 35 muestra el espectro armónico de una fuente de alimentación de funcionamiento conmutado SMPS<sup>78</sup>, empleada en aplicaciones de control y equipos electrónicos, igualmente la Figura 36, indica el espectro armónico de un variador de velocidad trifásico.

La presencia de componentes armónicas ocasiona diversos problemas tanto en el sistema de suministro de energía como dentro de la instalación.

---

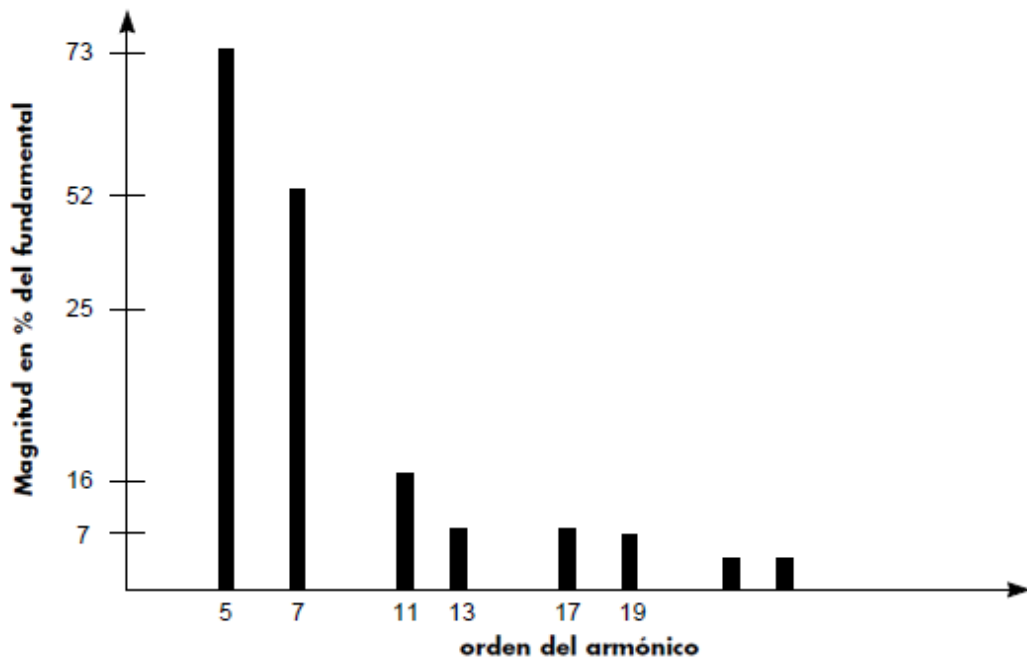
<sup>78</sup> SMPS (Switch Mode Power Supply): Fuente de alimentación de funcionamiento conmutado.

Figura 35. Espectro armónico de fuentes de alimentación conmutada (por modulación de ancho de pulso).



Fuente: [28]. Schneider Electric.

Figura 36. Espectro armónico de un variador de velocidad trifásico.



Fuente: [28]. Schneider Electric.

#### 4.2.2.1. Problemas causados por corrientes armónicas.

- **Sobrecalentamiento de los conductores neutros:** En un sistema trifásico, la forma de onda de tensión de cada fase, y entre fase y neutro, está desfasada  $120^\circ$  de manera que cuando cada una de las fases tiene la misma carga, la corriente combinada en el neutro es cero. Cuando las cargas no están equilibradas, por el neutro solo circulará la corriente neta correspondiente al desequilibrio de las cargas. Sin embargo, aunque las corrientes fundamentales se anulan entre sí, no ocurre lo mismo con las corrientes armónicas, pues aquellas que son un múltiplo impar del triple de la fundamental (armónicos “triple n”), se suman en el conductor neutro. Los casos encontrados en edificios comerciales, generalmente muestran corrientes en el neutro de magnitudes comprendidas entre el 150 % y el 210 % de las corrientes de fase, lo que ocasiona un aumento en la temperatura y en las pérdidas a lo largo del conductor [29].
- **Efectos sobre los transformadores:** Los transformadores se ven afectados por los armónicos de dos formas. En primer lugar, las pérdidas por corrientes parásitas, que normalmente representan un 10% de las pérdidas a plena carga, aumentan con el cuadrado del número de orden del armónico [29]. El segundo efecto está relacionado con los armónicos triple-n, pues estos son absorbidos eficazmente en el bobinado y no se propagan aguas arriba de las líneas de alimentación, sin embargo los armónicos que no son triple-n si pasan el transformador, luego deberá tenerse en cuenta la corriente de estos armónicos que circulan por el transformador a la hora de dimensionarlo.
- **Disparos intempestivos de los interruptores automáticos:** Los interruptores automáticos de corriente diferencial residual (ID), funcionan sumando la corriente presente en los conductores de fase y neutro, y si el resultado no está dentro del límite especificado, desconectan la energía en la carga [29]. La desconexión anómala se produce normalmente porque la corriente que circula por el circuito es superior a la que se preveía según los cálculos, o las simples mediciones, debido a la presencia de corrientes armónicas.
- **Sobrecarga de los condensadores utilizados en la corrección del factor de potencia:** Los bancos de condensadores empleados para la corrección del factor de potencia, se utilizan para compensar las corrientes con fase retrasada producidas por una carga inductiva, tal como un motor de inducción. Debido a que la impedancia del condensador disminuye al

aumentar la frecuencia, es probable que el condensador permita el paso de armónicos de orden superior y a menos que haya sido diseñado específicamente para ello puedan producir graves daños. Un problema potencialmente más grave es que el condensador y la inductancia parásita del sistema de alimentación puedan entrar en resonancia a una de las frecuencias armónicas, o a una frecuencia próxima, ocasionando tensiones y corrientes muy grandes, que a menudo provocan averías catastróficas en la batería de condensadores [29].

- **Efecto piel:** El efecto piel es aquel en el que la corriente alterna tiende a circular por la superficie de los conductores, haciéndose más pronunciado a altas frecuencias. Normalmente el efecto piel es ignorado ya que no tiene mayores consecuencias a la frecuencia fundamental del sistema, pero cuando la frecuencia está sobre los 350 Hz, es decir valores correspondientes al séptimo armónico, puede alcanzar valores importantes, produciendo pérdidas y calentamientos adicionales.

#### 4.2.2.2. Problemas causados por armónicos de tensión.

En la práctica, tanto las redes eléctricas como los transformadores de alimentación no son ideales, luego presentan una impedancia determinada. Las corrientes armónicas producidas por cargas no lineales dan lugar a una caída de tensión distorsionada en estas impedancias. La onda de tensión distorsionada resultante, se aplica a todas las demás cargas conectadas al mismo circuito, haciendo que por ellas circulen corrientes armónicas, incluso aun tratándose de cargas lineales [29].

- **IEM en los motores de inducción:** La distorsión armónica de tensión provoca un aumento de las pérdidas por corrientes parásitas en los motores, al igual que en los transformadores. Pero adicionalmente, aparecen pérdidas debidas a la generación de campos magnéticos en el estator, cada uno de los cuales intenta hacer girar el motor a una velocidad diferente tanto en un sentido como en el otro, según la secuencia del armónico [29]. Las corrientes de alta frecuencia inducidas en el rotor incrementan estas pérdidas todavía más.
- **Ruido de paso por cero:** Muchos controladores electrónicos detectan el punto en el cual la tensión de alimentación pasa por cero Volts, para determinar cuándo deben activarse las cargas. Cuando en la fuente de alimentación están presentes armónicos o perturbaciones transitorias, el

ritmo de variación de la tensión por el punto de paso por cero se hace más rápido y difícil de detectar, provocando un funcionamiento errático.

#### **4.2.3. Carga estática.**

La carga estática se produce cuando ciertos materiales se frotran uno contra el otro. El proceso de rozamiento causa que se retiren los electrones de la superficie de un material y se reubiquen en la superficie del otro material.

Este fenómeno puede ocurrir bajo las siguientes circunstancias:

- a) Materiales pulverizados que pasan a través de conductos o transportadores neumáticos.
- b) Correas de transmisión, cuando están fabricadas en material no conductor.
- c) El gas, vapor o aire que fluye a través de una abertura.
- d) Movimientos que impliquen cambios en la posición relativa de superficies en contacto, por lo general de materiales diferentes, líquidos o sólidos donde al menos uno ellos es un mal conductor de la electricidad.
- e) El movimiento del cuerpo humano en un área de baja humedad, puede acumular cargas estáticas de varios miles de volts, por el contacto de los zapatos con revestimientos de suelo o por trabajar cerca de maquinaria que genere electricidad estática.

La acumulación de cargas estáticas introduce un riesgo potencial para los operarios, las máquinas y materiales procesados, especialmente donde existen líquidos, gases o materiales inflamables o susceptibles a pequeñas corrientes [8].

El control de la carga estática también puede ser necesario para una adecuada operación en plantas de fabricación y mantener la calidad del producto. La acumulación de carga estática en las operaciones textiles puede causar que las fibras se vean afectadas, disminuyendo la calidad del material. En la industria de la impresión, el control de la carga estática es importante para evitar daños a las imágenes impresas, por la atracción de partículas de polvo, y para prevenir la atracción de la tinta a la parte inferior de las hojas.

Hay muchos otros procesos de fabricación u operaciones donde acumulaciones estáticas representan o un peligro de incendio o explosión o causan defectos en la

calidad de los productos y la operación de la maquinaria [8]. La Tabla 7 indica tensiones estáticas observadas en plantas de fabricación industrial.

**Tabla 7. Rango de tensiones estáticas producidas por diferentes procesos.**

<b>Tipo de Equipo</b>	<b>Rango de tensión estática observada kV</b>
Correas de transmisión	60 a 100
Fabricación de tejidos	15 a 80
Máquinas de papel	5 a 100
Bandas transportadoras	Más de 25

Fuente: [8].

#### **4.2.4. Altas impedancias de puesta a tierra.**

Obtener una baja impedancia de puesta a tierra es esencial para garantizar la seguridad de una instalación eléctrica de uso final, ya que su valor está directamente relacionado con la máxima elevación del potencial del sistema de puesta a tierra y contribuye a limitar las tensiones transferidas [23]. También se requiere una baja resistencia de puesta a tierra para permitir una efectiva operación de los dispositivos de protección en condiciones de falla a tierra.

**Tabla 8. Valores de referencia para resistencia de puesta a tierra.**

<b>Aplicación</b>	<b>Valores Máximos de RPT</b>
Estructuras de Líneas de Transmisión.	20 $\Omega$
Subestaciones de alta y extra alta tensión.	1 $\Omega$
Subestaciones de media tensión.	10 $\Omega$
Protección contra rayos.	10 $\Omega$
Neutro de acometida en baja tensión	25 $\Omega$

Fuente: [23] RETIE.

Teniendo en cuenta que para la frecuencia del sistema (60 Hz) la componente reactiva de la impedancia de puesta a tierra es muy pequeña comparada con la componente resistiva, se establecen valores máximos refiriéndose solamente a la componente resistiva. La Tabla 8, indica los valores máximos de resistencia de puesta a tierra adoptados por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas y de las normas técnicas IEC.

Como se trató en secciones anteriores (Ver secciones 2.3.5 y 3.3.4), cabe resaltar que bajo altas frecuencias la reactancia del sistema de puesta a tierra toma relevancia y debe ser considerada en su dimensionamiento.

#### **4.3. Buenas prácticas en el diseño del SPT y cableado de circuitos de potencia orientadas a mitigar los problemas de incompatibilidad electromagnética.**

De acuerdo al Código Eléctrico Colombiano, la puesta a tierra del sistema de potencia permite la conexión del sistema eléctrico (a partir de la red pública, devanado secundario del transformador o a partir de un generador o planta eléctrica) a tierra [30]. Un sistema eléctrico puede ser puesto a tierra a través de varios métodos (Ver **ANEXO E**):

1. Sólidamente (conexión directa con tierra sin impedancias intencionales).
2. Por una impedancia (una resistencia o una reactancia).
3. No ser puesto a tierra (no tener una conexión intencional con tierra).

La selección del método de puesta a tierra para un sistema de potencia de una instalación de uso final, debe tener en cuenta las características y los requerimientos de las cargas a usar, la continuidad del servicio, la seguridad y el costo.

A su vez, los componentes de un sistema de puesta a tierra se pueden dividir en dos bloques: Puesta a tierra o electrodo de puesta a tierra (bajo el nivel del piso) y la red de equipotencialización (sobre el nivel del piso) [5]. El adecuado dimensionamiento y diseño de estos componentes permite garantizar la seguridad y mitigar los problemas de incompatibilidad electromagnética, permitiendo al sistema operar de manera óptima.

#### **4.3.1. Disminución de la impedancia de puesta a tierra y mejoramiento de la distribución de potencial en el terreno.**

Los electrodos de puesta a tierra son los elementos encargados de distribuir la corriente eléctrica en el terreno. Dependiendo de la distribución espacial y las dimensiones, se originarán en el terreno los perfiles de tensión que definirán si el diseño de una puesta a tierra cumple con los valores máximos tolerables de tensión de paso y contacto<sup>79</sup> [5]. El arreglo de electrodos de puesta a tierra puede estar conformado por uno o varios de los siguientes tipos de elementos.

- Varillas
- Tubos
- Placas
- Flejes
- Cables
- Electrodos embebidos en concreto (también conocidas como tierras Ufer)
- Estructuras metálicas de los cimientos del edificio(Ver sección 3.4.1)

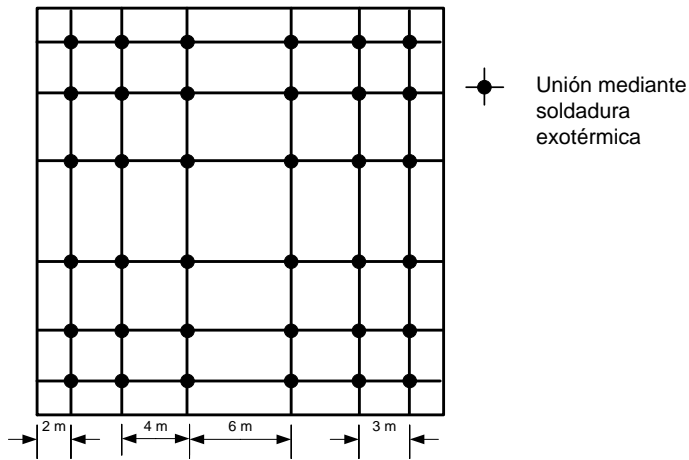
La configuración de una malla horizontal en el terreno de forma rectangular es recomendada, ya que la corriente a lo largo de cualquiera de los conductores es descargada a tierra de una forma muy uniforme, reduciendo las diferencias de potencial en el terreno. Sin embargo, una gran parte de la corriente es descargada desde los conductores de la periferia de la malla luego las tensiones de paso y de contacto presentaran los valores más altos en esta zona.

Una forma efectiva para hacer que la densidad de corriente sea más uniforme entre los conductores del centro y la periferia es emplear un espaciamiento no uniforme, con espaciamientos mayores entre conductores del centro y menores hacia los conductores del perímetro, tal y como lo muestra la Figura 37 [14].

---

<sup>79</sup> La diferencia de potencial que puede presentarse bajo condiciones de falla entre los pies de una persona (separados 1 m) o entre un elemento metálico de la instalación puesto a tierra y los pies de un operario a un metro de la estructura, representan las tensiones de paso y de contacto respectivamente.

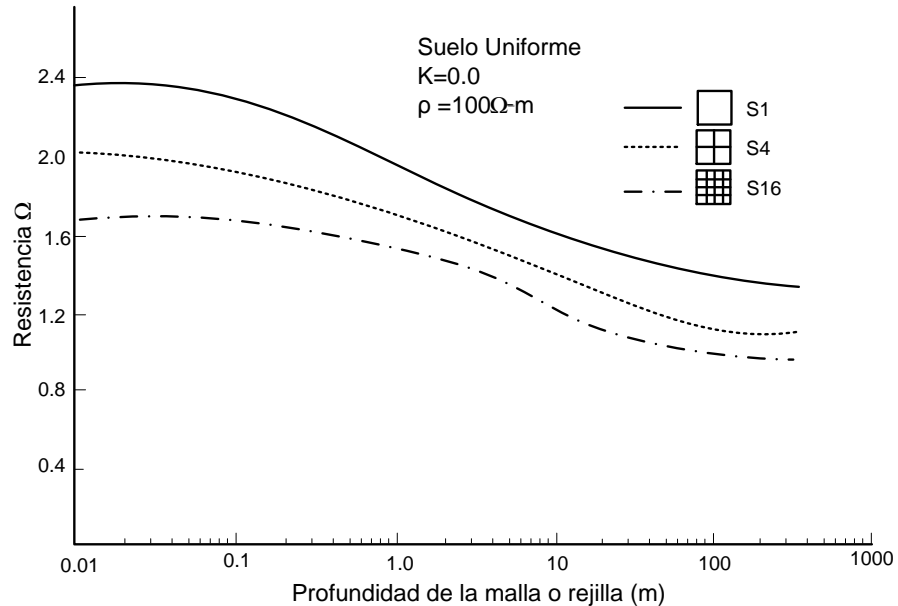
**Figura 37. Espaciamiento no uniforme de los conductores de la malla de puesta a tierra.**



Fuente: Autor.

Para un área dada, el efecto en la resistencia de incrementar el número de rejillas puede contribuir a disminuir la resistencia de puesta a tierra hasta cierto punto (ver Figura 38) ya que este decrecimiento rápidamente se vuelve insignificante para grandes números de rejillas (o espaciamiento entre conductores menor).

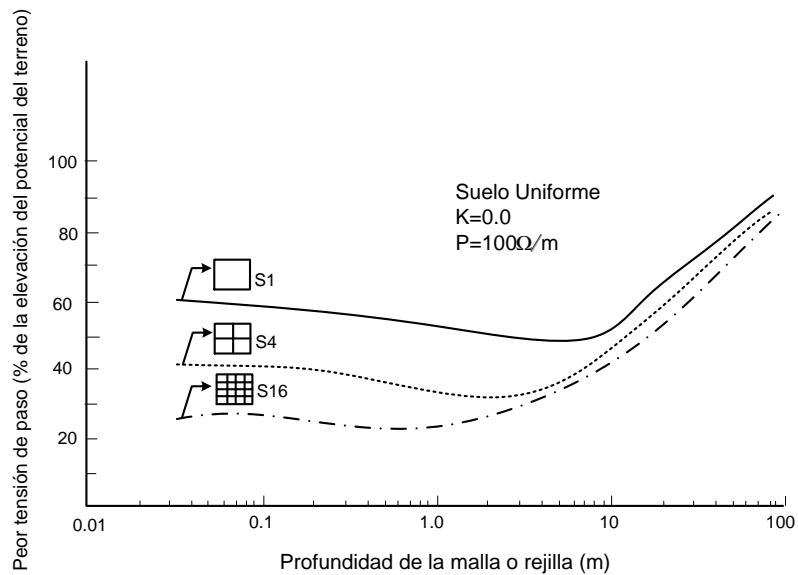
**Figura 38. Resistencia de puesta a tierra para diferentes configuraciones de rejillas y diferentes profundidades en un área dada.**



Fuente: [14]. IEEE Std 80.

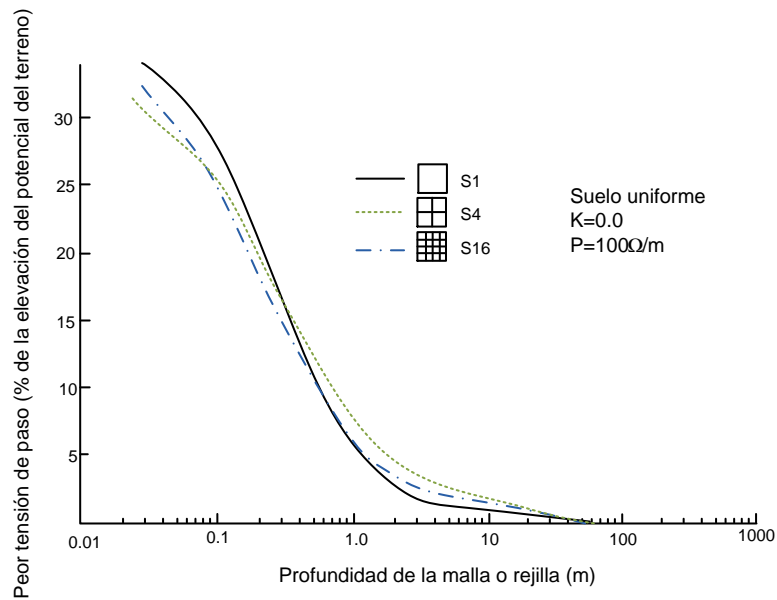
Igualmente, las tensiones de paso y de contacto pueden ser reducidas aumentando el número de rejillas (disminuyendo la distancia entre conductores) hasta un determinado límite de saturación, como lo indican la Figura 39 y Figura 40.

**Figura 39. Tensión de contacto para diferentes arreglos de rejillas y profundidad de enterramiento en un área dada.**



Fuente: [14]. IEEE Std 80.

**Figura 40. Tensión de paso para diferentes arreglos de rejillas y profundidad de enterramiento en un área dada.**



Fuente: [14]. IEEE Std 80.

Por su parte, el uso de varillas como electrodos de puesta a tierra, es recomendado ya que estos, al atravesar las capas del terreno, disminuyen la dependencia de la resistencia de puesta a tierra, del contenido de humedad del suelo [31]. Adicionalmente las varillas descargan mucha más corriente en el terreno que los conductores de las rejillas, esta corriente en la varilla también es descargada principalmente en su parte más baja, reduciendo las tensiones de paso y de contacto de manera significativa. El aumento en el número y longitud de los electrodos también contribuye a disminuir la resistencia de puesta a tierra hasta determinados niveles, teniendo en cuenta la influencia del efecto mutuo entre ellos<sup>80</sup>.

Ya que las características presentadas por la configuración de electrodos horizontales en forma de malla se ven complementadas por las de las varillas verticales, la combinación de estos es una excelente opción para controlar las tensiones de paso y de contacto, y alcanzar el valor de resistencia requerido. Adicionalmente las consideraciones en el dimensionamiento, anteriormente mencionadas permiten optimizar el diseño, de acuerdo a las restricciones de espacio y económicas.

- **Disminución de la impedancia de puesta a tierra y mejora de la distribución de potencial en el terreno para subestaciones aéreas.**

El Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, permite realizar un diseño simplificado del sistema de puesta a tierra para subestaciones tipo poste, siempre y cuando se tenga en cuenta los parámetros de resistividad y corriente de falla que se puedan presentar, garantizando el control de las tensiones de paso y de contacto. En la práctica, la puesta a tierra de este tipo de subestaciones se hace enterrando un electrodo que cumpla con las características de la Tabla 9 [32]. Sin embargo ocasionalmente un solo electrodo puede proveer el valor de resistencia deseado. La Tabla 10, especifica la máxima impedancia de puesta a tierra permitida para subestaciones de distribución.

---

<sup>80</sup> Se recomienda que la distancia entre electrodos de 2.4 m de longitud, no sea menor de 1.8 m con el fin de disminuir el efecto de la resistencia mutua y mejorar la eficiencia de arreglos en paralelo [6].

Tabla 9. Requisitos para los electrodos de puesta a tierra.

Tipo de electrodo	Materiales	Dimensiones mínimas			
		Diámetro mm	Área mm <sup>2</sup>	Espesor mm	Recubrimiento μm
Varilla	Cobre.	12.7			
	Acero inoxidable.	10			
	Acero galvanizado en caliente.	16			70
	Acero con recubrimiento electro depositado en Cu.	14			100
	Acero con recubrimiento total en Cu.	15			2000
Tubo	Cobre.	20		2	
	Acero inoxidable	25		2	
	Acero galvanizado en caliente	25		2	55
Fleje	Cobre.		50	2	
	Acero inoxidable.		90	3	
	Cobre cincado.		50	2	40
Cable	Cobre.	1.8 para cada hilo	25		
	Cobre estañado.		25		
Placa	Cobre.	200 000	1.5		
	Acero inoxidable	200 000	6		

NOTA 1: El terminado recomendado es el galvanizado, lo cual se debe hacer después de fabricado.

NOTA 2: El acero inoxidable en contacto con aluminio o aleaciones de aluminio probablemente cause corrosión. Adicional a estos materiales. Por lo tanto, es importante tomar medidas de protección, por ejemplo el uso de inhibidores.

NOTA 3: Las aleaciones de cobre, distintas de las indicadas son permisibles siempre y cuando tengan un contenido mínimo de cobre de 75 % y propiedades tensiles similares.

Fuente: [23]. RETIE.

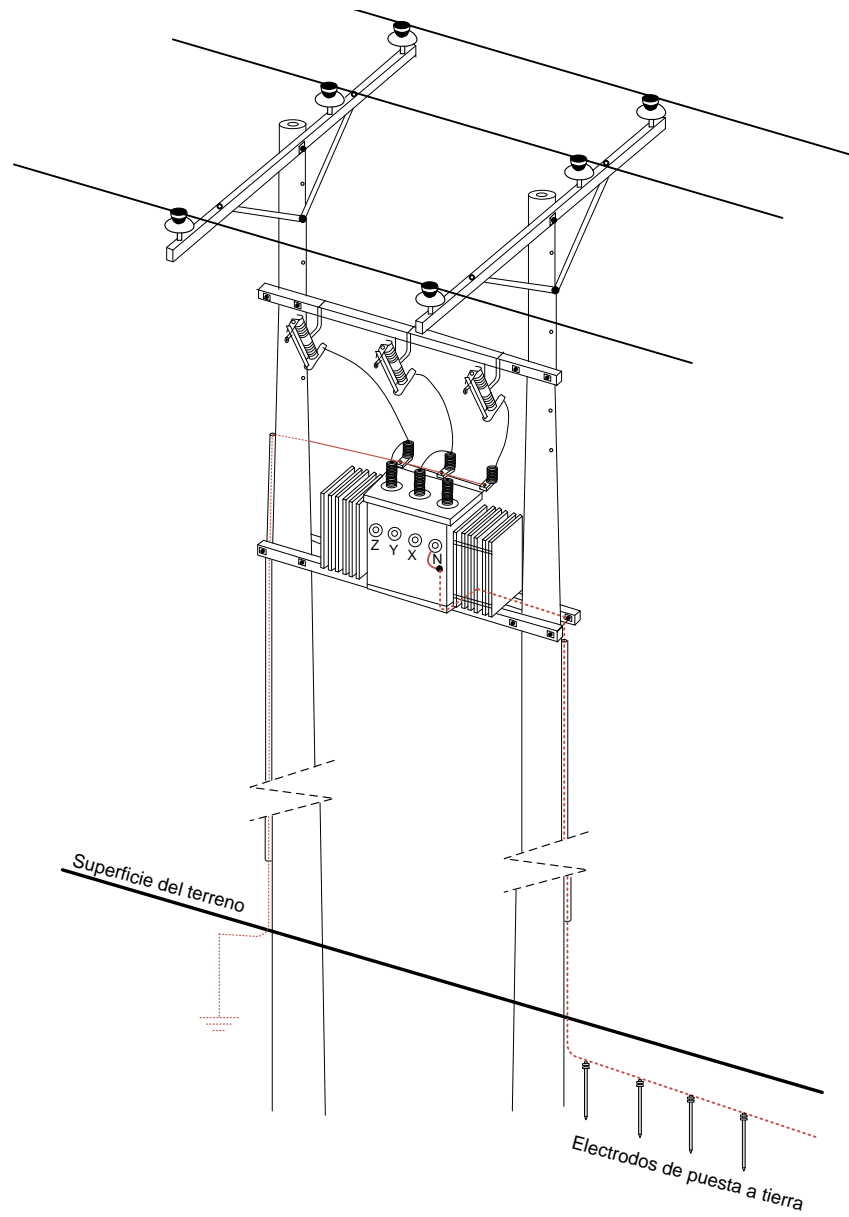
Cuando la resistencia de puesta a tierra objetivo no es alcanzada, electrodos suplementarios son adicionados tal y como lo muestra la Figura 41. Sin embargo existe un límite en el número de electrodos suplementarios que pueden ser usados en relación con el grado de mejoramiento en la resistencia de puesta a tierra [33], como lo muestra la Figura 42.

**Tabla 10. Impedancias de puesta a tierra.**

<b>Descripción</b>	<b>Nivel (kV)</b>	<b>Z máxima (<math>\Omega</math>)</b>
Subestación de distribución	34.5	10
Subestación de distribución	13.2	10
Protección contra rayos	13.2-34.5	10
Redes de baja tensión	B.T.	20
Acometidas	B.T.	25

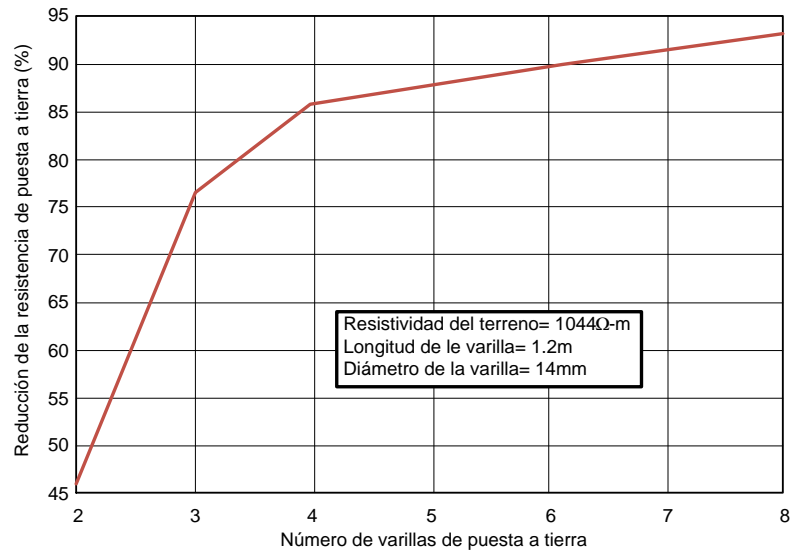
Fuente: [32]. Norma ESSA.

Figura 41. Puesta a tierra de una subestación aérea.



Fuente: Autor.

**Figura 42. Curva de respuesta de electrodos de puesta a tierra conectados en paralelo.**



Fuente: [33]. Optimum Mix of Ground Electrodes and Conductive Backfills to Achieve a Low Ground Resistance.

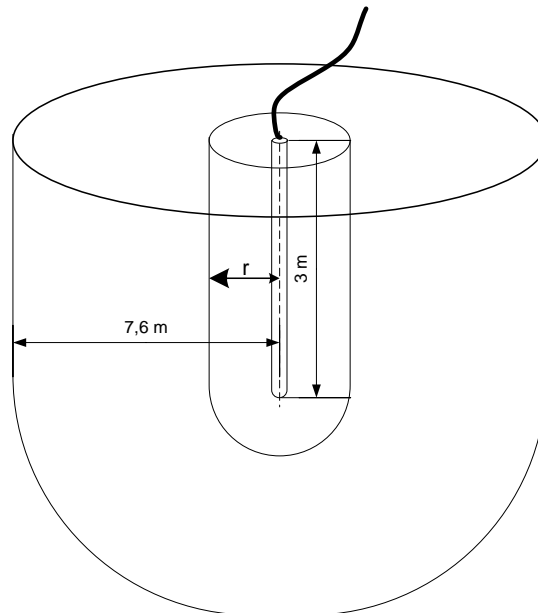
De esta manera, resulta económicamente inviable introducir más electrodos en el terreno para disminuir la resistencia de puesta a tierra después de que este límite se ha alcanzado. Se ha observado que se encuentran significativas reducciones de la resistencia de puesta al agregar el segundo, tercer y cuarto electrodo en el terreno. En la Figura 42 se observa que más del 85% de la reducción fue obtenida en el cuarto electrodo y que el porcentaje de reducción del valor de la resistencia empieza a saturarse desde el quinto electrodo. Por lo tanto el número óptimo para reducir la resistencia de puesta a tierra de un sistema de electrodos es cinco. Cuando la resistencia objetivo no es alcanzada, la aplicación de una tierra artificial o tratamiento del terreno es recomendable [33].

#### **4.3.2. Consideraciones en el tratamiento del terreno para reducir la impedancia de puesta a tierra [8], [5].**

La tierra puede considerarse infinita en el tamaño, comparada con las dimensiones del sistema de electrodos de puesta a tierra, de la misma manera lo es su capacidad para absorber una cantidad prácticamente ilimitada de corriente. Sin embargo, en la práctica esta corriente ilimitada inyectada al terreno se transmite a través de la interfaz metal-suelo de los electrodos de puesta a tierra. De esta manera, alrededor del electrodo de puesta a tierra, la resistencia del terreno es la suma de las resistencias en serie de las capas virtuales del terreno que se encuentran progresivamente hacia el exterior de la varilla. La capa más

cercana a la varilla tiene la sección de menor área, por lo que posee la mayor resistencia. Las capas sucesivas hacia afuera, tienen áreas cada vez mayores, luego su resistencia es menor. A medida que la distancia radial desde el electrodo aumenta, la resistencia por unidad de radio decrece a valores cercanos a cero.

**Figura 43. Desarrollo de la resistencia de un electrodo.**



Fuente: [8]. IEEE Std. 142.

La Figura 43, muestra un electrodo de 3 m de longitud, con un diámetro de 16 mm enterrado. El camino de la corriente de tierra hacia el exterior de la superficie del electrodo, consiste en capas cilíndricas sucesivas. La Tabla 11 muestra que la resistencia de puesta a tierra se desarrolla en casi un 70 % en la capa de terreno adyacente al electrodo de 30 cm y que para una distancia radial desde el electrodo de 5 m se habrá desarrollado en su totalidad.

De esta manera, la aplicación de múltiples electrodos no necesariamente reduce la resistencia de puesta a tierra a menos que se mantenga un adecuado espaciamiento entre ellos. Esta característica se debe a la resistencia mutua en donde la corriente de uno de los electrodos eleva el potencial del otro. Mientras el potencial sea mayor para el mismo flujo de corriente, la resistencia se ve incrementada por este efecto mutuo.

Estas consideraciones son esenciales a la hora de dimensionar el sistema de electrodos de puesta a tierra y permiten elegir de forma adecuada el volumen de terreno que debe ser tratado para reducir la impedancia de puesta a tierra.

**Tabla 11. Porcentaje aproximado del desarrollo de la resistencia de puesta a tierra de un electrodo de 3m de longitud y 15.88 mm de diámetro.**

Distancia radial desde el electrodo		Porcentaje aproximado de la resistencia total
(m)	(pies)	
0.03	0.1	25
0.06	0.2	38
0.09	0.3	46
0.15	0.5	52
0.3	1.0	68
1.5	5.0	86
3.0	10.0	94
4.6	15.0	97
6.1	20.0	99
7.6	25.0	100
30.5	(100.0) <sup>a</sup>	(104)
305.0	(1000.0) <sup>a</sup>	(117)

Fuente: [8]. IEEE Std. 142.

Para mejorar las condiciones de resistividad del suelo que rodea la varilla, se recomienda aplicar una sustancia adicional de baja resistividad, que ayude a reducir la resistencia de puesta a tierra. Esencialmente, para el tratamiento de suelos se utilizan diferentes tipos de materiales, unos naturales como la bentonita y otros preparados industrialmente como los geles, cementos conductivos o tratamientos químicos artificiales<sup>81</sup>. No se deben usar sales de cloruro y de sulfato para bajar la resistividad del suelo circundante al electrodo, debido a que puede

---

<sup>81</sup> Su aplicación depende de las instrucciones del fabricante, pues aún no existen normas internacionales.

contaminar las áreas cercanas, además pueden aumentar la corrosión. Tampoco se debe usar materiales que contengan limadura de hierro, debido a que con el tiempo esta se corroe afectando al electrodo. No se recomienda usar carbón de coque, puesto que puede destruir rápidamente el electrodo por corrosión gráfitica.

En general se debe rechazar aquellos materiales que representen riesgo ambiental. Con respecto a los metales, no se debe aplicar cadmio, plomo, níquel, cinc, mercurio, cromo, manganeso y cobalto, ya que éstos son tóxicos a bajas concentraciones.

#### **4.3.3. Consideraciones de cableado y conexión a tierra de equipos.**

Muchos de los problemas que generan IEM al interior de una instalación eléctrica de uso final, están directamente relacionados con malas prácticas de cableado (Ver sección 4.2.1). Adicionalmente, la presencia de fluctuaciones de tensión y armónicos relacionados con la operación del sistema, hacen necesario tener en cuenta aspectos adicionales a la hora de diseñar e instalar los circuitos eléctricos de potencia.

No es inusual encontrar múltiples conexiones del conductor neutro a tierra al interior de una instalación eléctrica de uso final (Ver sección 4.2.1.1), lo que representa una violación de la NTC 2050, ya que el neutro debe ser conectado únicamente en el panel principal de alimentación de la edificación o en el devanado secundario de un sistema derivado independiente (transformador de aislamiento) [8].

Independientemente de su tensión nominal, las partes metálicas no portadoras de corriente de equipos fijos que se puedan llegar a energizar, se deben conectar a tierra [6], incluyendo los marcos y carcasas de motores, bombas y controladores, entre otros. Esto permite integrar las partes no metálicas a la red de equipotencialización del sistema de puesta a tierra permitiendo reducir la IEM, debida a diferencias de potencial y la redistribución de las posibles cargas estáticas asociadas a la operación de las cargas de gran potencia. Se recomienda que la conexión a tierra de motores con sus respectivos dispositivos de control se realice en un solo punto SPG<sup>82</sup>.

Adicionalmente, teniendo en cuenta que la reactancia de un circuito en AC es determinada principalmente por el espaciado entre los conductores de salida y

---

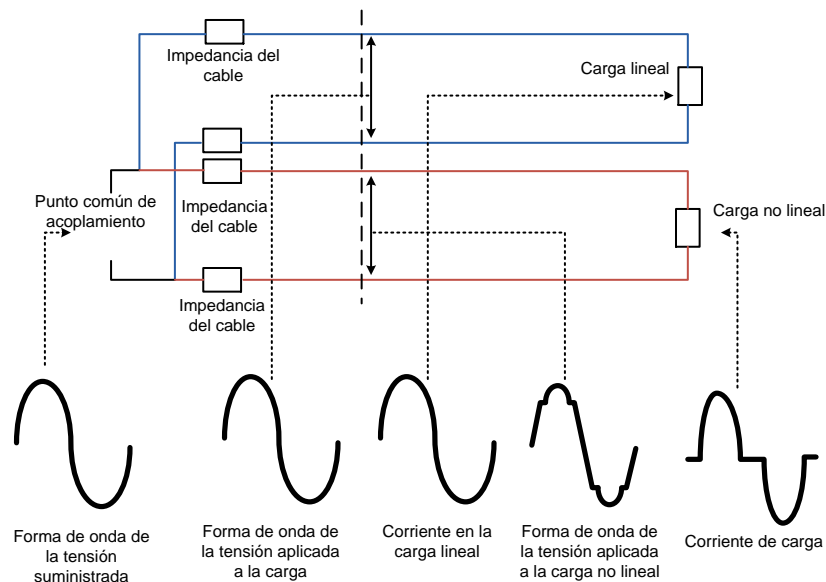
<sup>82</sup> SPG (Single Point Grounding). Único punto de conexión a tierra.

de retorno, y a diferencia de la resistencia es ligeramente afectada por las dimensiones del conductor; se recomienda disponer todos los conductores de un mismo circuito en el mismo ducto, con el fin de reducir el espacio entre los conductores de puesta a tierra EGC<sup>83</sup> y conductores de fase y neutro [8].

#### 4.3.4. Separación de circuitos para mitigar la IEM debida a los armónicos de tensión [29].

Teniendo en cuenta los efectos causados por los armónicos de tensión (ver 4.2.2.2), se recomienda separar los circuitos que alimentan las cargas que generan armónicos de los que alimentan a las cargas que son sensibles a los armónicos. En este caso, las cargas lineales y las no lineales son alimentadas por circuitos diferentes (alimentadas desde diferentes paneles o alimentadores) que parten de un punto de acoplamiento común, de tal forma que la distorsión de tensión causada por las cargas no lineales no afecta a las cargas lineales. Esta práctica también es recomendada para separar cargas sensibles de cargas cuya operación puede tener características eléctricas nocivas (por ejemplo arranque de motores) [25].

Figura 44. Separación de las cargas lineales de las no lineales.



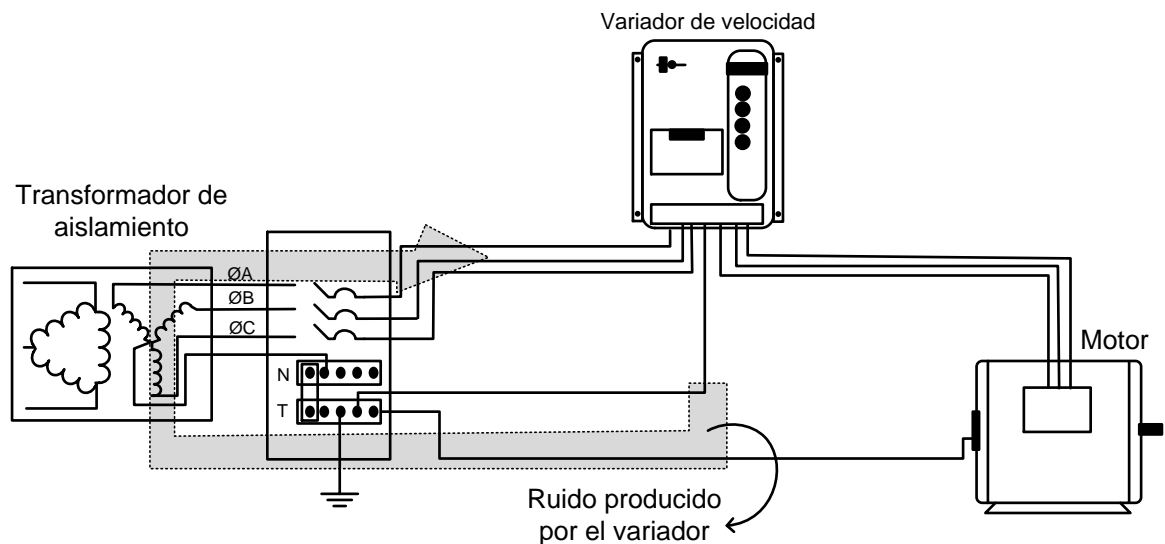
Fuente: [29].

<sup>83</sup> EGC(Equipment Grounding Conductor): Conductor de puesta a tierra de equipos.

#### 4.3.5. Aplicación del transformador de aislamiento para bloquear el paso de armónicos triple-n [29].

Como se ha mencionado anteriormente, por los devanados en delta de los transformadores circulan corrientes armónicas triple-n. Aunque esto es un problema para los fabricantes y diseñadores de transformadores, que deben tener en cuenta la carga adicional, es beneficioso para los proyectistas de las redes de suministro, ya que separan los armónicos triple-n de la fuente de alimentación (Ver Figura 45). Adicionalmente, como se trató en la sección 2.5.4, este permite mitigar el ruido de modo común proveniente de las líneas de alimentación.

Figura 45. Las corrientes de tierra inducidas y el ruido de los variadores regresan a través del devanado secundario de un transformador de aislamiento.



Fuente: [34].

A continuación se resume mediante la

Tabla 12, los problemas de incompatibilidad electromagnética mencionados en este capítulo y las prácticas en el diseño de los SPT para mitigar su impacto en los sistemas de potencia de instalaciones eléctricas de uso final.

**Tabla 12. Problemas de incompatibilidad de electromagnética y buenas prácticas en el diseño de los SPT de potencia, para mitigarlos.**

<b>Problema</b>	<b>Sección</b>	<b>Practica recomendada</b>	<b>Sección</b>
Perturbaciones causadas por malas prácticas de cableado y conexión a tierra.	4.2.1	Buenas prácticas de conexión a tierra y cableado de circuitos de potencia.	4.3.3
Contenido de armónicos en la red.	4.2.2	Transformador de aislamiento	4.3.5
		Separación de circuitos	4.3.4
Carga Estática	4.2.3	Buenas prácticas de conexión a tierra y cableado de circuitos de potencia.	4.3.3
Problemas causados por altas impedancias de puesta a tierra.	4.2.3	Buenas prácticas para disminuir la impedancia de puesta a tierra	4.3.1

Fuente: Autor

## CONCLUSIONES.

- Durante la etapa de diseño de una instalación eléctrica de uso final, es fundamental tener en cuenta el entorno electromagnético en el que se verá envuelto el sistema, con el fin de lograr un diseño seguro, confiable, rentable y electromagnéticamente compatible. La implementación de prácticas de ingeniería orientadas a optimizar la compatibilidad electromagnética, contribuirá al mejoramiento de los índices de calidad de las instalaciones eléctricas y al comercio internacional de productos eléctricos y electrónicos, mejorando la competitividad de la región y del país.
- Desde el enfoque de la compatibilidad electromagnética, la persona o personas responsables del diseño, instalación y mantenimiento de una instalación eléctrica, se convierten en el “fabricante” de un producto, que debe estar configurado para que su operación sea segura, óptima y compatible.
- El sistema de puesta a tierra, como parte esencial de una instalación eléctrica para lograr una configuración segura y eficiente, también es una herramienta fundamental para combatir los problemas de incompatibilidad electromagnética y calidad de la energía. Para lograr esto, su diseño, adquiere gran importancia y debe hacerse de forma correcta desde el principio con el fin de obtener una configuración adecuada y se eviten gastos de reingeniería posteriores.
- La iniciativa de diseñar sistemas de puesta a tierra que además de garantizar la seguridad de la instalación, permitan una operación óptima y compatible con su entorno electromagnético, se ve materializada en los estándares y publicaciones tanto nacionales como internacionales orientadas a lograr este objetivo. A partir de estos documentos, se identificaron los criterios legales, reglamentarios, normativos y técnicos que sirvieron de soporte para esta investigación.
- Conocer y entender las diversas perturbaciones electromagnéticas presentes en los sistemas eléctricos, sus fuentes y sus mecanismos de acoplamiento, es de gran interés tanto de los fabricantes de equipos eléctricos y electrónicos como de los diseñadores de instalaciones eléctricas. Este interés se ve plasmado en publicaciones y estándares en todo el mundo que profundizan en este tema. A partir de ellos se

identificaron las principales perturbaciones electromagnéticas que generan interferencia en las instalaciones eléctricas de uso final, cuya influencia está directamente relacionada con el sistema de puesta a tierra.

- A partir del estudio de las diversas perturbaciones que generan interferencia electromagnética en las instalaciones eléctricas de uso final, se identificaron y adaptaron al modelo colombiano, prácticas de diseño de sistemas de puesta a tierra para equipos sensibles, sistemas de protección contra rayos y sistemas de potencia, reconocidas por artículos, normas técnicas y estándares nacionales e internacionales, que permiten mitigarlas, desde el diseño del sistema de puesta a tierra, contribuyendo a configurar una instalación eléctricamente compatible con su entorno perturbador.

## RECOMENDACIONES

- No existen conflictos entre los requerimientos de seguridad y las prácticas de diseño del sistema de puesta a tierra, identificadas en esta investigación. En todo caso se debe verificar el cumplimiento de la NTC 2050, el RETIE y otros códigos y normas aplicables relacionadas con la conexión a tierra de forma segura.
- Para dar solución a la problemática de la compatibilidad electromagnética es necesaria la cooperación entre los diseñadores de sistemas eléctricos, empresas de servicios públicos, entes de regulación y fabricantes de equipos, con el fin de encontrar soluciones efectivas para reducir las fuentes potenciales de interferencia, disminuir la susceptibilidad de los equipos y establecer estándares de calidad de la energía.
- Muchos de las perturbaciones electromagnéticas encontradas al interior de las instalaciones eléctricas de uso final, tanto antiguas como nuevas, son originadas por prácticas erróneas, que reflejan el desconocimiento o el descuido por parte del personal encargado del diseño, instalación y mantenimiento del sistema. De esta manera se hace necesario implementar medidas que permitan capacitar de manera adecuada al personal de instalación y mantenimiento, complementado por una mayor supervisión por parte del diseñador y entidades de inspección. Adicionalmente se recomienda evitar recurrir a prácticas improvisadas, que lejos de solucionar los problemas al interior de la instalación, pueden agudizarlos e incluso comprometer la seguridad del personal.
- Desarrollar trabajos investigativos en relación al diseño de sistemas eléctricos, permitirán la incorporación de nuevas tecnologías y métodos, que permitirán mejorar o reemplazar las prácticas de diseño convencionales, contribuyendo en la solución de muchos de los problemas de ingeniería, al continuo mejoramiento de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones y a la competitividad de la región y el país.

## REFERENCIAS

- [1] A. B. J Desmet, Dimensionado del neutro en las instalaciones ricas en armónicos, Technical report, Disponible en: [www.lpqi.org](http://www.lpqi.org), Junio 2003.
- [2] IEEE Std. 1100 Emerald Book, IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment, 2005.
- [3] F. Casas, Tierras, soporte de la seguridad eléctrica, Bogotá: Seguridad Eléctrica Ltda, Agosto de 2008.
- [4] V. R., Earthing & EMC A Systems Approach to Earthing, European Cooper Institute. [www.lpqi.org](http://www.lpqi.org), 2002.
- [5] ICONTEC NTC 389-3 , Sistemas de Puesta a Tierra, Proyecto de Norma Técnica.
- [6] National Fire Protection Association NFPA 70, National Electrical Code® (NEC®), 2005 Edition.
- [7] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Código Eléctrico Colombiano, 2002.
- [8] IEEE Std. 142 Green Book, Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, 2007.
- [9] Electrical Construction and Maintenance ECM, Observations on Supplemental Grounding and Bonding Systems: Part 1, <http://ecmweb.com/content/observations-supplemental-grounding-and-bonding-systems-part-1>, 2007.
- [10] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Código Eléctrico Colombiano NTC 2050, 2002.
- [11] C. Gabrielson, M. Reimold, Suppression of Powerline Noise with Isolation Transformers, San Diego, CA, 1987.
- [12] R. Pando, «Aspectos Básicos de las Descargas Atmosféricas,» Disponible en: <http://www.herrera.unt.edu.ar/revistacet/anteriores/Nro28/PDF/N28Inv02.pdf>, 2006.

- [13] Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC, NTC 4552, 2008.
- [14] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Std 80 Guide for Safety in AC Substation Grounding, 2000.
- [15] K. Okumura, H. Uno, Y. Nagai, N. Nagaoka, A. Ametani, Y. Baba, Optimum Position of a Grounding Wire within a Building for Reduction of Lightning Surge Voltages, Doshisha University, 2011.
- [16] Zhou, Qibin, Lightning-induced impulse magnetic fields in high-rise buildings, The Hong Kong Polytechnic University, Febrero del 2007.
- [17] J. Choi, H. Shin, D. Kim, B. Lee, Grounding impedance based on the current distribution for the horizontal ground electrode installed in two-layer soil structure, Korea: Inha University, 2011.
- [18] International Electrotechnical Commission IEC, IEC 62305-4 Protection against lightning, 2010.
- [19] International Electrotechnical Commission IEC, Protection Against Lightning IEC 62305-3, 2006.
- [20] D. Jiménez, W. Laguado, Propuesta Técnica que Incorpora los Parámetros de Compatibilidad Electromagnética en el diseño de sistemas de protección contra rayos y coordinación de protecciones en instalaciones eléctricas de uso final., Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2012.
- [21] Seguridad Eléctrica Ltda., Puestas a tierra para torres de líneas de transmisión.,  
<http://www.seguridadelectricaltda.com/pdfs/articulos/Puestas%20a%20tierra%20para%20torres%20de%20transmisi%C3%B3n.pdf>, 2009.
- [22] B. Lee, J. Joe, J. Choi, Simulations of Frequency-dependent Impedance of Ground Rods Considering Multi-layered Soil Structures, School of Electrical Engineering, Inha, Korea, 2009.
- [23] Ministerio de Minas y Energía, Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), Resolución No. 18 1294 Agosto 06 de 2008.
- [24] J. Stroker, «Grounding Systems for the Cement Industry,» PENTA ENGINEERING, COMPANY. LLC, 2012.

- [25] J. Burleson, *Wiring and Grounding to Prevent Power Quality Problems With Industrial Equipment*, Birmingham: Alabama Power Company.
- [26] A. Morinec, *Power Quality Considerations for CNC Machines : GROUNDING*, Clearwater Beach: FirstEnergy Corporation and Cleveland State University, 2000.
- [27] M. Robertson, *Neutral to ground bonding not an option !*, Richmond: Current Technology, Disponible en: [http://www.tnbpowersolutions.com/webfm\\_send/1784](http://www.tnbpowersolutions.com/webfm_send/1784), 2007.
- [28] R. Calvas, *Cuaderno Técnico n° 177: Perturbaciones en los sistemas electronicos y esquemas de conexión a tierra.*, Schneider Electric, 2003.
- [29] D. Chapman, *Guía de Calidad de la Energía Eléctrica :Armónicos, Causas y efectos 3.1*, Leonardo Power Energy, Disponible en: [http://www.leonardo-energy.org/espanol/lee-guia\\_calidad/Guia%20Calidad%203-1%20Armonicos.pdf](http://www.leonardo-energy.org/espanol/lee-guia_calidad/Guia%20Calidad%203-1%20Armonicos.pdf), 2001.
- [30] E. Riva, C. Olaya y J. Guacaneme, «La puesta a tierra según el código eléctrico colombiano Incontec NTC 2050,» vol. 6, n° Universidad Distrital. Disponible en: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/2705>, 2001.
- [31] H. Mariewicz y A. Klajn, *Earthing & EMC: Earthing Systems - Basic Constructional Aspects 6.5.1*, Leonardo Power Quality Initiative (LPQI), 2004.
- [32] *Electrificadora de Santander S.A. E.S.P., Normas para cálculo y diseño de sistemas de distribución*, Bucaramanga, 2005.
- [33] G. Eduful, J. Ekow, C. Okyere y P. Okyere, «Optimum Mix of Ground Electrodes and Conductive Backfills to Achieve a Low Ground Resistance,» *World Congress on Engineering and Computer Science 2009*, 2009.
- [34] Schneider Electric, *Drive Isolation Transformers-Solutions to power quality*, Disponible en: <http://static.schneider-electric.us/docs/Electrical%20Distribution/Low%20Voltage%20Transformers/Drive%20Isolation%20Transformers/7460PD9501R895.pdf>, 1995.
- [35] W. Langguth, *Puesta a tierra y compatibilidad electromagnetica, LPQI-612 Application Note short version 6*. Disponible en: [www.lpqi.org](http://www.lpqi.org), Mayo del 2006..

- [36] Norma NTC- IEC 61000-1-1, Compatibilidad Electromagnética, ICONTEC, 2000.
- [37] IEC/TR 61000-2-5, Environment – Description and classification of electromagnetic environments, 2011.
- [38] Schneider Electric, Puesta a tierra y compatibilidad electromagnética de los sistemas de automatización. Medidas y principios básicos 2011, Disponible en <http://www.schneider-electric.com/download/es/es/details/2297352-Puesta-a-tierra-y-compatibilidad-electromagnetica-de-los-sistemas-de-automatizacion-Fundamentos-y-medidas/?reference=33002442K01000>.
- [39] Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Std. 81 Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System, 1983.

## ANEXOS

### ANEXO A: ASPECTOS GENERALES DE LA COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA.

La realidad de los sistemas eléctricos, lejos de ser un entorno ideal para la operación, involucra problemas de calidad de la energía y perturbaciones electromagnéticas que pueden comprometer seriamente la seguridad y la eficiencia de la instalación y los equipos en su interior. Las perturbaciones pueden ocurrir durante la operación normal del sistema eléctrico, como en el arranque de motores o conexión o desconexión de grandes cargas, o durante situaciones anormales como en el evento durante el despeje de una falla.

A partir de esto, se ha incrementado el interés en la compatibilidad electromagnética (CEM), que representa la capacidad de una máquina, aparato o sistema eléctrico o electrónico de operar sin problemas en un entorno electromagnético perturbador sin perjudicar, a su vez, el funcionamiento de otros componentes del sistema [35].

#### A.1. Elementos que intervienen en la CEM.

El número cada vez mayor de aplicaciones eléctricas y electrónicas también ha dado lugar a un aumento de los problemas en su operación. Uno de los factores que contribuyen en esta problemática se debe a que los dispositivos en uso se encuentran en interferencia entre ellos como resultado de sus propiedades electromagnéticas. Si todos estos dispositivos pudiesen operar juntos en armonía, el mundo sería electromagnéticamente compatible. Desafortunadamente, la realidad es distinta y los problemas de interferencia y compatibilidad electromagnética EMI<sup>84</sup> deben ser resueltos.

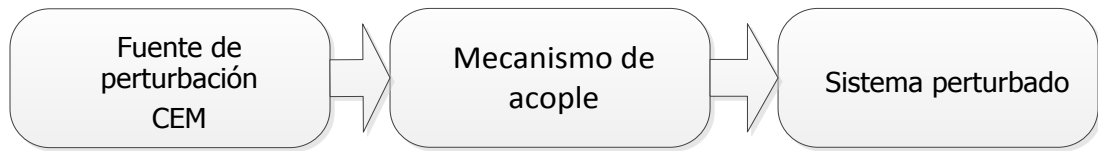
De esta manera entendemos la EMI como la degradación en el desempeño de un dispositivo, equipo o sistema, causada por una perturbación electromagnética [36].

En términos generales, el modelo que envuelve la compatibilidad electromagnética puede ser descrito por tres elementos principales (ver Figura 1); La fuente o emisor que causa la interferencia, un mecanismo o medio de acople y el sistema perturbado.

---

<sup>84</sup> EMI: Interferencia electromagnética.

**Figura 1. Componentes de la CEM.**



Fuente: [37]. IEC/TR 61000-2-5.

A partir de estos elementos es posible establecer tres estrategias diferentes para lograr la CEM.

- Fuente: Eliminar o reducir la emisión de perturbaciones.
- Mecanismo de acople: Atenuar el nivel de acople.
- Sistema perturbado: Incrementar la inmunidad a las perturbaciones.

Este documento está orientado principalmente a la mitigación alcanzable por la reducción del acoplamiento, a través de la implementación de buenas prácticas durante el diseño, la construcción y puesta en marcha del sistema de puesta a tierra y las conexiones de equipotencialización.

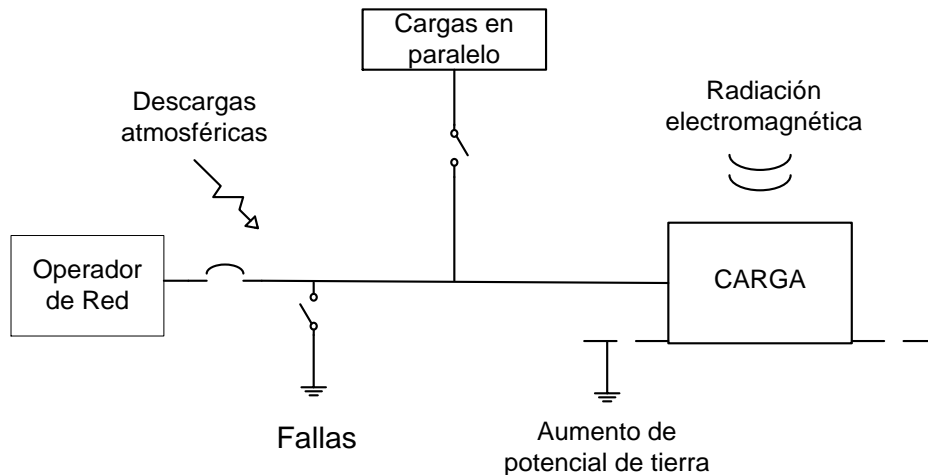
## **A.2. Fuentes de las perturbaciones electromagnéticas y su clasificación.**

En general existen dos tipos de contextos para determinar el origen de las perturbaciones, en el primero se busca establecer la fuente de la perturbación y en el segundo se busca definir si esta es interna o externa al sistema de energía en particular; teniendo en cuenta que el límite de un sistema de potencia se establece a partir del medidor, haciendo referencia al "usuario" y al "operador de red". Según otra interpretación, la preocupación se da por la naturaleza de la fuente de interferencia, luego se describe en términos técnicos tales como rayos, conmutación de carga, fallas del sistema eléctrico y cargas no lineales. Dependiendo de las condiciones locales, una puede ser más importante que la otra, pero todas deben ser reconocidas.

El mecanismo implicado en la generación de la perturbación también determina si el suceso será al azar o permanente, e impredecible o fácil de definir. La primera interpretación está motivada por el objetivo de asignar la responsabilidad del problema y posiblemente, la responsabilidad de una corrección o mantenimiento. La segunda interpretación está motivada por el objetivo de comprender el problema y el desarrollo de una solución técnica.

La tendencia general de los usuarios consiste en atribuir la mayor parte de sus problemas al operador de red. Sin embargo muchas fuentes de perturbaciones, se encuentran dentro de la misma instalación y son atribuibles a la operación de equipos que hacen parte del usuario final Figura 2. Por último, se encuentran las fuentes de perturbaciones debidos a fallas del sistema, pero que no están asociadas con la fuente de alimentación, como el caso de las descargas electrostáticas, descargas atmosféricas, interferencia electromagnética (IEM) y diferencias de potencial a tierra.

**Figura 2. Origen de las perturbaciones electromagnéticas.**



Fuente: [2]. IEEE Std. 1100.

En la práctica resulta muy útil clasificar las fuentes de perturbaciones electromagnéticas de la siguiente manera [38].

- **Fuentes naturales.** Tales como rayos, ruido cósmico atmosférico, descargas electrostáticas.
- **Fuentes técnicas.** Son aquellas fuentes presentes en la conexión y desconexión de grandes cargas, controladores por tiristor, generadores de alta frecuencia, osciladores locales, etc.
- **Fuentes con espectro de frecuencia de banda estrecha.** Son fuentes de señales con frecuencias discretas tales como: Transmisores de radio y radioaficionado, transmisor-receptor portátil, radares, generadores industriales de alta frecuencia, hornos microondas, circuitos de potencia., máquinas de soldadura, receptores de sonido o FX, dispositivos de ultrasonido, convertidores de corriente.

Estos aparatos pueden generar campos electromagnéticos sustanciales, sobre todo a su alrededor.

- **Fuentes con espectro de frecuencia de banda ancha.** Son potentes disruptores en las instalaciones electrónicas, puesto que dentro de su amplio rango se presentan altas frecuencias. Fuentes de este tipo pueden ser: motores, lámparas de descarga, conmutadores de línea, seccionadores en fuentes de energía, ruidos, circuitos de control con semiconductores, dispositivos de conmutación (relés, contactores) descargas electrostáticas, descargas atmosféricas, efecto corona y descargas nucleares.
- **Fuentes regulares e imprevistas.** Las diferencias entre las fuentes regulares e imprevistas pueden resultar útiles para obtener una configuración de CEM<sup>85</sup>; cuando se deben determinar los rangos de frecuencia presentes en las fuentes que operan de manera regular en la instalación o durante la caracterización de una perturbación debida a fuentes desconocidas.
- **Fuentes continuas e intermitentes.** Puede resultar necesario diferenciar entre fuentes de perturbaciones continuas o intermitentes cuando por ejemplo, se desea mitigar la perturbación escalonando el funcionamiento de la fuente y de la magnitud. Ejemplo: Desconexión de receptores durante una tormenta

### A.3. Clasificación de las perturbaciones electromagnéticas.

La naturaleza y el grado de los fenómenos perturbadores están ligados al canal de acoplamiento a través del cual las perturbaciones entran o salen de los sistemas. Estas perturbaciones electromagnéticas inciden directamente sobre los sistemas eléctricos por radiación o por conducción [37].

Establecer un entorno electromagnético en el que los sistemas eléctricos y electrónicos funcionen sin interferencia es muy complejo. Para los efectos de esta clasificación, se han definido tres categorías con el fin de describir todas las perturbaciones electromagnéticas presentes en el entorno de un sistema:

- Descargas electrostáticas (DES) (conducidas y radiadas).

---

<sup>85</sup> CEM: Compatibilidad electromagnética.

- Fenómenos de baja frecuencia (conducidas y radiadas, de cualquier fuente, excepto DES).
- Los fenómenos de alta frecuencia (conducidas y radiadas, de cualquier fuente, excepto DES).

Estas categorías permiten clasificar las perturbaciones electromagnéticas teniendo en cuenta su canal de acoplamiento y frecuencia (ver Tabla 1). Las perturbaciones conducidas y radiadas se tratarán en detalle en el siguiente numeral. En cuanto a la frecuencia, para el contexto del presente informe y de acuerdo con el enfoque proporcionado en [37], el término baja frecuencia se aplica a frecuencias mayores o iguales a 9 kHz; y alta frecuencia se aplica a frecuencias superiores a 9 kHz.

**Tabla 1. Clasificación de las perturbaciones electromagnéticas.**

Conducidas	Baja frecuencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Armónicos</li> <li>• Superposición de señales.</li> <li>• Caídas de tensión e interrupciones.</li> <li>• Desbalance de tensión</li> <li>• Tensiones inducidas</li> <li>• Variaciones de frecuencia</li> <li>• Corrientes de CC en redes de CA.</li> </ul>
	Alta frecuencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ondas continuas inducidas de tensión o corriente.</li> <li>• Transitorios unidireccionales</li> <li>• Transitorios oscilatorios</li> </ul>
Radiadas	Baja frecuencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Campos Eléctricos</li> <li>• Campos Magnéticos</li> </ul>
	Alta frecuencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Campos Eléctricos.</li> <li>• Campos Magnéticos.</li> <li>• Campos electromagnéticos.</li> <li>• Ondas continuas.</li> <li>• Transitorios</li> </ul>
Descargas Electroestáticas		
Pulsos Nucleares Electromagnéticos		

Fuente: [37]. IEC/TR 61000-2-5.

### A.3.1. Perturbaciones conducidas.

Estas perturbaciones se transmiten a través de conductores metálicos (cables o estructuras de cableado de señal y/o alimentación), transformadores, bobinas y condensadores. Teniendo en cuenta que los conductores también pueden comportarse como antenas, la perturbación puede convertirse en una interferencia por radiación y viceversa [38].

Como lo indica la Tabla 2, las frecuencias presentes en las perturbaciones conducidas están directamente relacionadas con su fuente. Muchas de las fuentes mencionadas dependen de la red de alimentación, ya que las perturbaciones se inyectan y se propagan a través de la misma. De esta forma, la red de alimentación puede ser en sí misma fuente de perturbaciones continuas e intermitentes.

**Tabla 2. Ejemplos de fuentes de perturbaciones conducidas y su espectro de frecuencia.**

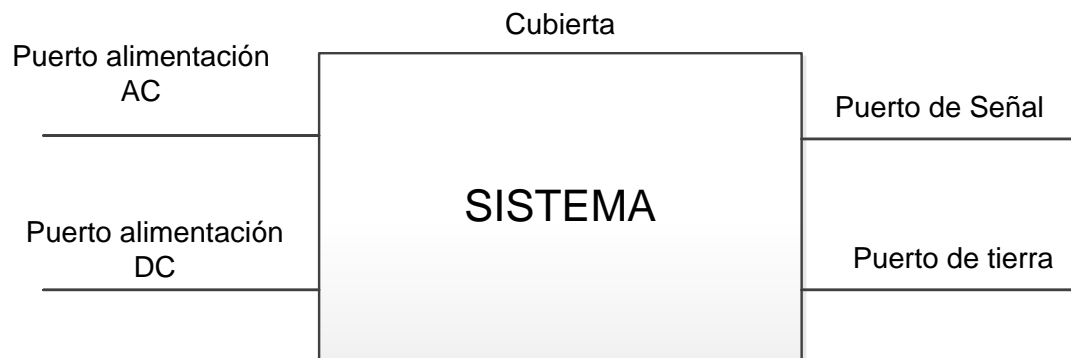
<b>Fuente</b>	<b>Espectro de frecuencia predominante en MHz</b>
Tubos fluorescentes	0.1-3
Lámparas de vapor en mercurio	0.1-1
Sistemas de procesamiento de datos	0.05-20
Conmutadores	2-4
Contactos de un conmutador de línea	10-20
Contactores y relés	0.05-20
Conmutadores de red	0.5-25
Fuentes de alimentación DC (sincronizada)	0.1-25
Efecto Corona	0.1-10
Aspiradora	0.1-1

Fuente: [38]. Schneider Electric.

Resulta útil, para facilitar el análisis de las redes eléctricas de potencia y de comunicaciones, considerarlas como un conjunto de puertos, que conforman el canal de acople de las perturbaciones conducidas, (ver Figura 3):

- La carcasa puede ser considerada un puerto que representa el límite físico del sistema, a través del cual los campos electromagnéticos pueden incidir o irradiarse.
- El puerto de señal, puede ser un conductor que transporta señales de control llevando las señales desde o hacia el sistema. Ejemplos de ello son líneas de datos y de control entrada /salida (E / S, líneas de telecomunicaciones, antenas cables, etc.).
- El puerto tierra es una conexión que representa una trayectoria que no es un puerto de señal o de potencia, destinado para la conexión a tierra para fines funcionales o de seguridad.
- El puerto de alimentación es un conductor o cable conectado al sistema que lleva la energía eléctrica (AC o CC) necesaria para la operación.

**Figura 3. Puertos de entrada de las perturbaciones electromagnéticas conducidas.**

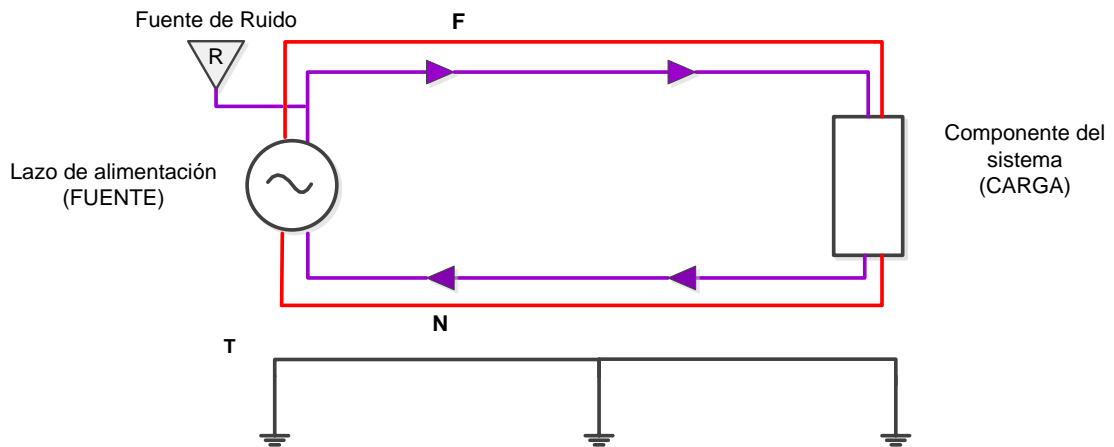


Fuente: [2]. IEEE Std. 1100.

La importancia de diferenciar los puertos que intervienen en las perturbaciones conducidas permite identificar los diferentes tipos de fenómenos que pueden ocurrir en los sistemas de potencia en comparación con los sistemas de comunicación, así como la importancia de las prácticas de puesta a tierra para cada uno de los sistemas [37], ya que la tierra a menudo funciona como una referencia para cada uno de estos, tal y como se aprecia en la Figura 4 y Figura

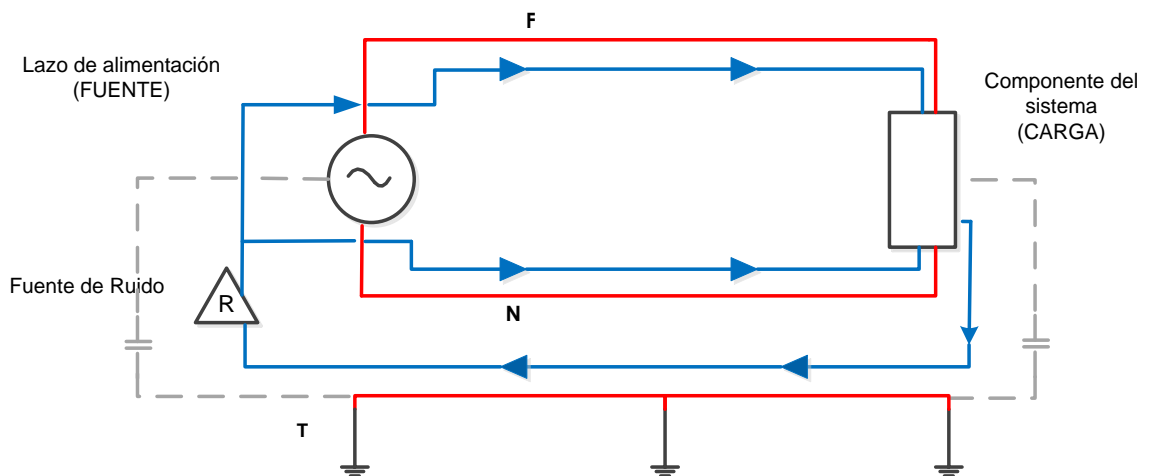
5, estas perturbaciones pueden circular a través de lazos cerrados, conformados por los conductores activos (circuito en modo diferencial) o por lazos compuestos por conductores activos y conductores de tierra (circuito en modo común o asimétrico). Adicionalmente, cuando existen diferentes circuitos que utilizan líneas comunes y/o impedancias de acoplamiento, cada vez que cambie la corriente en uno de los circuitos, cambiará la tensión en el conductor común, de modo que los circuitos se influncian o se afectan mutuamente generando perturbaciones conducidas por acoplamiento galvánico [35].

**Figura 4. Circuito en modo diferencial.**



Fuente: [34] .

**Figura 5. Circuito en modo común.**



Fuente: [34] .

### A.3.2. Perturbaciones radiadas.

A diferencia de las perturbaciones conducidas, que se producen en diversos medios conductores, las perturbaciones radiadas se producen en el medio que rodea al equipo. La radiación electromagnética puede ser el resultado de fuentes intencionales o no intencionales, incluyendo campos electromagnéticos en un espectro de frecuencias de 0 Hz (campos estáticos) a 400 GHz. A bajas frecuencias los campos eléctricos y magnéticos actúan de forma independiente mientras que a altas frecuencias los campos eléctricos se combinan para constituir un campo electromagnético, que viaja por el espacio a la velocidad de la luz, luego pueden producir perturbaciones a distancias significativamente mayores. La naturaleza de la perturbación y sus características se mencionan enseguida en la Tabla 3.

**Tabla 3. Tipos y características de las perturbaciones radiadas.**

<b>Fuente</b>	<b>Dominio de Frecuencia</b>	<b>Acoplamiento</b>	<b>Alcance</b>	<b>Receptores</b>
Campo eléctrico	Baja frecuencia	Capacitivo	Corto	Cables de a.t. y b.
Campo magnético	Baja frecuencia	Inductivo	Corto	Cables de a.t. y b.t.
Campo electromagnético	Alta frecuencia	Por radiación	Largo	Cables de a.t y b.t.

Fuente: [4]. Earthing & EMC A Systems Approach to Earthing.

Teniendo en cuenta que el campo eléctrico es proporcional a la tensión, este puede causar perturbaciones a cierta distancia en las proximidades de instalaciones eléctricas o en los elementos conductores muy cercanos (ejemplo: conductores en una misma canalización). Por su parte, el campo magnético es proporcional a la intensidad de la corriente eléctrica. En muchos sistemas de potencia eléctrica, las corrientes pueden alcanzar valores muy elevados, de forma que los campos magnéticos pueden ser fuertes y el riesgo de que se produzca IEM<sup>86</sup> se incrementa [35].

---

<sup>86</sup> IEM: Interferencia electromagnética

Para caracterizar las fuentes potenciales de perturbaciones electromagnéticas se consideran todos los dispositivos en los que se generen altas frecuencias (ver Tabla 4 ) y en los que los componentes funcionen, ya sea de forma deliberada o no, como antenas.

**Tabla 4. Fuentes de perturbación electromagnética por radiación y espectros de frecuencia.**

<b>Fuente</b>	<b>Espectro de frecuencia predominante MHz</b>
Cirugía de alta frecuencia	0.4-5
Interruptor biestable	0.015 - 400
Contactos de termostato (arco)	30-1000
Motores	0.01-0.4
Arco voltaico de conmutación	30-200
Dispositivo de alimentación de CC	0.1-30
Cubiertas de carcasas no tratadas	0.01-10
Tubos fluorescentes, arcos voltaicos	0.1-3
Semiconductor- multiplexador	0.3-0.5
Contactos de levas	10-200
Circuitos de conmutación	0.1-300

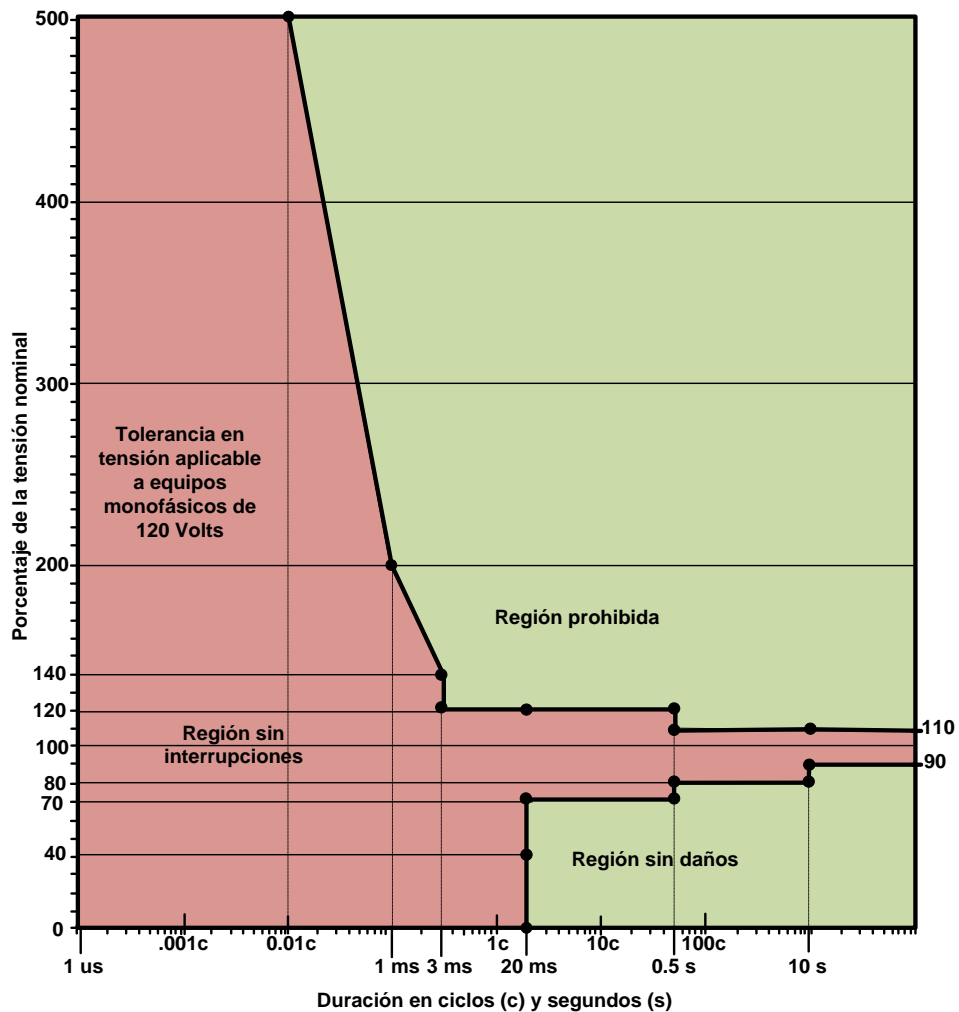
Fuente: [38]. Schneider Electric.

## ANEXO B: CURVA CBEMA.

(Información adicional)

Los dispositivos electrónicos tienen típicamente un cierto nivel de inmunidad a las variaciones de tensión, que pueden ser definidas por las pruebas de calidad de la energía y desempeño para definir lo que se conoce comúnmente como la curva tipo CBEMA<sup>87</sup> o perfil para el dispositivo bajo prueba (Ver Figura 6).

Figura 6. Curva CBEMA, tolerancia de los equipos a variaciones de tensión del sistema de alimentación 2000.



Fuente: [2] IEEE Std. 1100.

<sup>87</sup> Computer and Business Equipment Manufacturers Association.

## **ANEXO C: RECOMENDACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS MALLAS DE REFERENCIA DE SEÑAL SRG [2].**

(Información adicional)

- a) En todo caso se debe verificar el cumplimiento del Código Eléctrico Colombiano y otros códigos y normas aplicables relacionadas con la conexión a tierra de forma segura. No existen conflictos entre los requerimientos de puesta a tierra de seguridad y las configuraciones para alta frecuencia aplicadas a los sistemas eléctricos y su equipo electrónico asociado.
- b) Seleccionar una malla de referencia de señal adecuada, asegurándose que se ha diseñado, instalado y mantenido adecuadamente.
- c) Conecte de forma permanente y efectiva la malla de referencia de señal a todos los elementos de acero estructural y a cada trayectoria metálica accesible (por ejemplo, ductos, canalizaciones, bandejas de cables y tubos) que se crucen con la estructura de referencia de señal en cualquier plano, o que se encuentren a menos de 1,8 m de ella.
- d) Si existe un único punto de entrada para los conductores de alimentación y existen los conductores de conexión a tierra y otros elementos metálicos en el lugar, entonces es aceptable la conexión de la SRG mediante SPG<sup>88</sup>. De esta manera las cargas electrónicas instaladas en el sistema de referencia de señal pueden ser conectadas a tierra mediante MPG<sup>89</sup> o SPG a la malla de referencia de la señal, dependiendo de la frecuencia de la señal de interés.
- e) Conecte la SRG<sup>90</sup> a cada pieza de equipo electrónico y cualquier otro equipo eléctrico o mecánico ubicado en el sistema de referencia de señal.
- f) Las conexiones de equipotencialización a la SRG deben ser tan cortas como sea posible, sin pliegues o dobleces agudos. Es preferible la aplicación de bandas flexibles en vez conductores redondos.

---

<sup>88</sup> SPG (Single Point Grounding): Único punto de conexión a tierra.

<sup>89</sup> MPG (Multiple Point Grounding): Múltiples puntos de conexión a tierra.

<sup>90</sup> SRG (Single Reference Grid): Malla de referencia de señal.

- g) Cuando, de acuerdo con los requisitos del fabricante, debe ser utilizado más de un conductor de conexión para cada pieza del equipo. Estos conductores deben conectarse a esquinas opuestas del equipo y a los puntos más cercanos (pero separados) en la SRG. Estos conductores deben ser de diferentes longitudes.
- h) En lo posible, los aparatos electrónicos no se deben instalar cerca a los bordes exteriores de la SRG.
- i) Debe evitarse ubicar equipos sensibles importantes, conectados a la SRG muy cerca del acero de refuerzo de la construcción o de otros posibles caminos de corrientes parciales de rayo (se recomienda 1.8 m mínimo).
- j) Todos los sistemas derivados independientes, que alimenten equipos ubicados la SRG deben tener su punto de conexión a tierra de alimentación (es decir, conexión neutro-tierra) conectado al sistema de referencia de la señal por una correa de unión adecuada.
- k) Todo equipo de calefacción, ventilación y aire acondicionado además de tuberías correspondientes, tableros eléctricos, transformadores y equipos eléctricos o mecánicos similares al interior del área protegida deben estar unidos a la SRG.
- l) No deben realizarse conexiones de puesta a tierra especiales o complementarias entre puntos remotos, que proporcionen caminos a tierra desde la SRG y los equipos instalados en ella.
- m) Todos los conductores de comunicaciones, datos y los cables de alimentación deben estar sobre o muy cerca de la SRG.
- n) La documentación y los planos de la instalación deben estar completos y detallados, incluyendo la puesta a tierra de equipos de calefacción, ventilación y aire acondicionado, tuberías, canalizaciones y elementos similares. El ingeniero debe especificar los pormenores del diseño y no debe esperar a que los técnicos completen la instalación.

## **ANEXO D: BARRAS DE EQUIPOTENCIALIZACIÓN [18], [2].**

(Información adicional)

La barra de equipotencialización es un elemento de material conductor, en el cual se agrupan partes metálicas no energizadas de una instalación o parte de ella. En la instalación debe existir una barra de equipotencialización principal, la cual se conectará directamente a un electrodo del sistema de puesta a tierra.

Así mismo las barras de equipotencialización deben ser instaladas para la interconexión de:

- ✓ Todos los servicios conductivos que entran en una ZPR<sup>91</sup> (directamente o mediante el uso adecuado de DPS<sup>92</sup>).
- ✓ El conductor de protección a tierra (PE).
- ✓ Los componentes metálicos del sistema interno (ejemplo gabinetes, recintos, estantes).
- ✓ El blindaje magnético de las ZPR en la periferia y dentro de la estructura.

La Figura 7, muestra una representación de la equipotencialización de los servicios conductivos, a una barra de equipotencialización.

Por otro lado son importantes las siguientes reglas de instalación para una conexión eficiente:

- ✓ La base para todas las medidas de equipotencialización es una baja impedancia en la red de equipotencialización.
- ✓ Las barras de equipotencialización deberán ser conectadas al sistema de puesta a tierra por el camino más corto posible.
- ✓ El material y las dimensiones de la barra de equipotencialización y de los conductores de interconexión deberán cumplir con los requerimientos de norma de acuerdo a la capacidad de corriente y aislamiento.

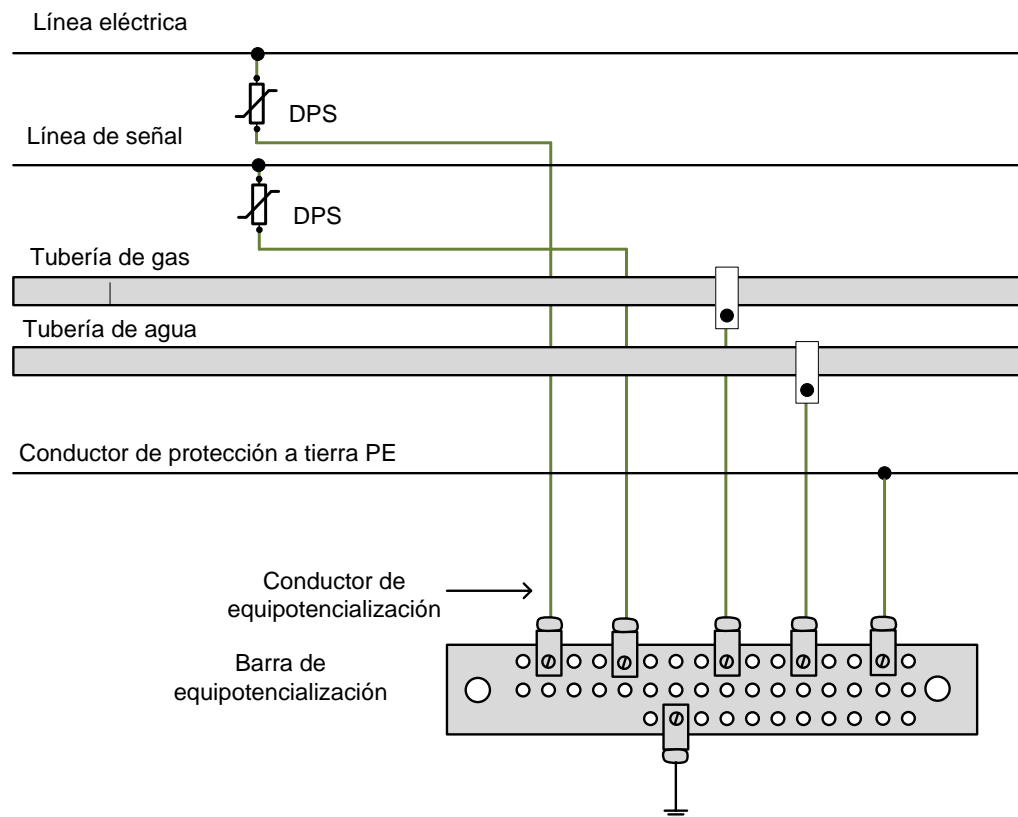
---

<sup>91</sup>Zona de protección contra rayos. "Lightning Protection Zone" en idioma inglés.

<sup>92</sup>Dispositivo de protección contra "surges". "Surge protective device" SPD en idioma inglés.

- ✓ Los DPS's deberán ser instalados de tal manera que se use la conexión más corta posible a la barra de equipotencialización, así como a conductores vivos. Esto minimiza los cambios de tensión inductivos.
- ✓ Sobre el lado protegido del circuito (aguas abajo de un DPS), los efectos de inducción mutua deberán ser minimizados, ya sea minimizando el área del bucle o utilizando cables o ductos portacables blindados.

**Figura 7. Configuración de para una barra de equipotencialización.**



Fuente: [18]. IEC 62305-4.

NOTA: Con base en las reglas de instalación, para una conexión eficiente se deben tomar medidas especiales para la equipotencialización de tuberías de gas metálicas, debido al riesgo de explosión que éstas representan.

Equipotencialización en la frontera de una zona de protección contra el rayo ZPR.

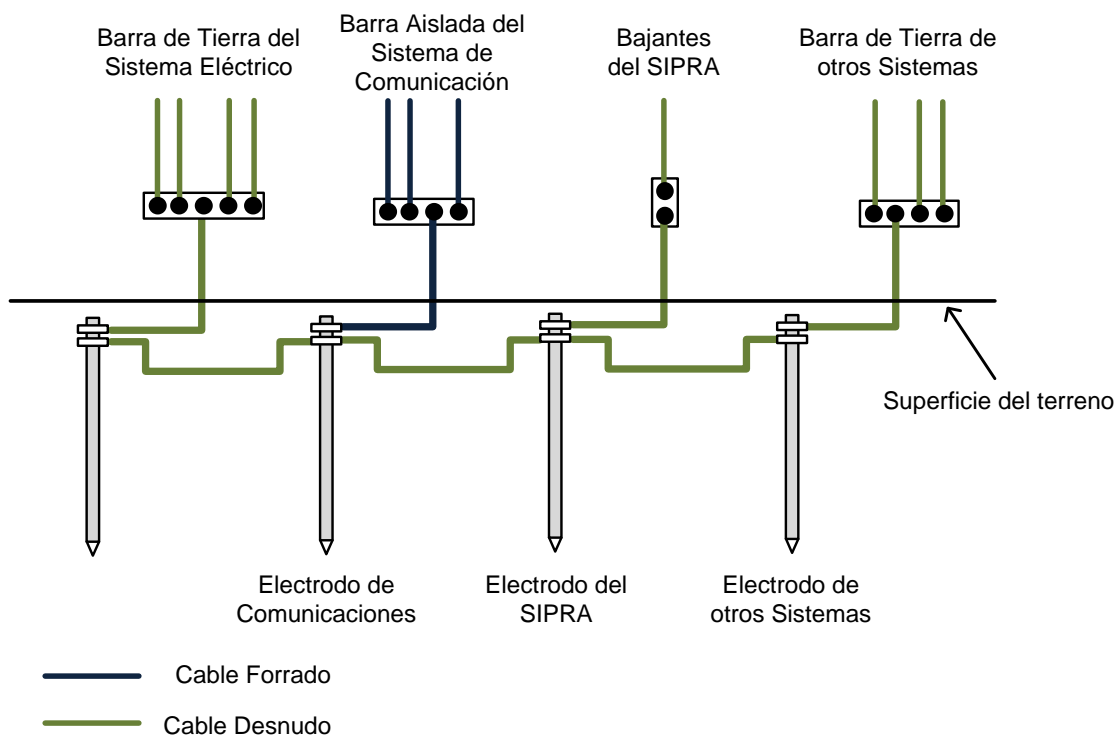
Cuando una ZPR es definida, deberá proveerse la equipotencialización para todas las partes metálicas y servicios (ejemplo, tuberías metálicas, líneas eléctricas o de señal) que penetran en la frontera de la ZPR.

NOTA: La equipotencialización de los servicios que entran a la ZPR 1 deberán ser discutidos con los diferentes operadores de redes involucradas (telecomunicaciones, red eléctrica) o autoridades concernientes, porque pueden haber requisitos opuestos y conflictivos.

La equipotencialización se realizará a través de barras de equipotencialización, las cuales se instalarán lo más cerca posible del punto de entrada de la frontera de la ZPR.

Siempre que sea posible, las entradas de los servicios deberán entrar en la misma localización de la ZPR y deberán estar conectados a una misma barra de equipotencialización como se muestra en la Figura 8. Si la entrada de los servicios está localizada en diferentes lugares, cada servicio deberá ser conectado a una barra de equipotencialización y todas éstas a su vez, deberán estar interconectadas. Para realizar esto, es recomendable una interconexión a una barra de equipotencialización en anillo (anillo conductor), entre los electrodos de puesta a tierra. También, es recomendado que los servicios entrantes, estén conectados a la misma barra de equipotencialización del sistema eléctrico, que corresponde a las masas de los equipos y de igual forma, interconectar en anillo las barras de equipotencialización del sistema de comunicaciones, de protección contra rayos y de otros sistemas, como se observa en la Figura 8.

**Figura 8. Equipotencialización en anillo de los electrodos de puesta a tierra.**



Fuente: Autor.

La unión equipotencial de los DPS's<sup>93</sup> es siempre requerida a la entrada de las ZPR's<sup>94</sup> para unir las líneas entrantes, que están conectados a los sistemas eléctricos y electrónicos dentro de la ZPR a la barra de equipotencialización. Usando una interconexión o extensión de la ZPR se puede reducir el número de DPS's requeridos.

Los cables blindados o los ductos portacables metálicos interconectados, se unen a cada frontera<sup>95</sup> de la ZPR, donde pueden ser utilizados para interconectar varias ZPR del mismo orden en una ZPR conjunta, o extender una ZPR hasta la siguiente frontera.

Puesta a tierra e infraestructura de equipotencialización para telecomunicaciones.

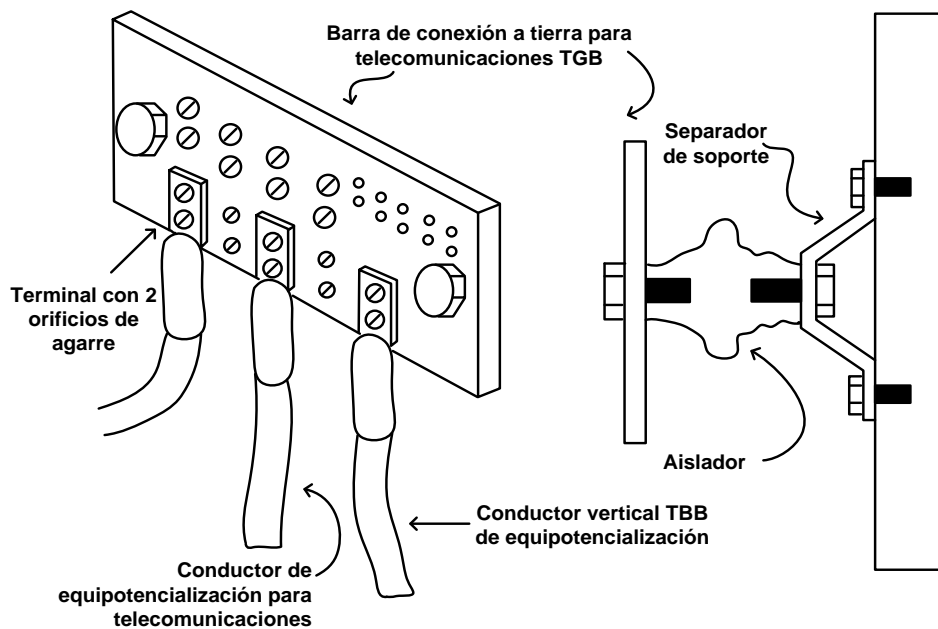
<sup>93</sup>Dispositivo de protección contra "surges". "Surge protective device" SPD en idioma inglés.

<sup>94</sup>Zonas de protección contra rayos. "Lightning Protection Zones" en idioma inglés.

<sup>95</sup> "Boundary" en idioma inglés.

Para instalaciones con abundante equipamiento sensible, como en el caso de sistemas de comunicación, se recomienda tener una barra de equipotencialización para los equipos eléctricos en general y otra exclusiva para los equipos de comunicaciones (Ver Figura 9. Concepto de barra de equipotencialización principal para sistemas de telecomunicaciones.).

**Figura 9. Concepto de barra de equipotencialización principal para sistemas de telecomunicaciones.**



Fuente: [2]. IEEE Std. 1100.

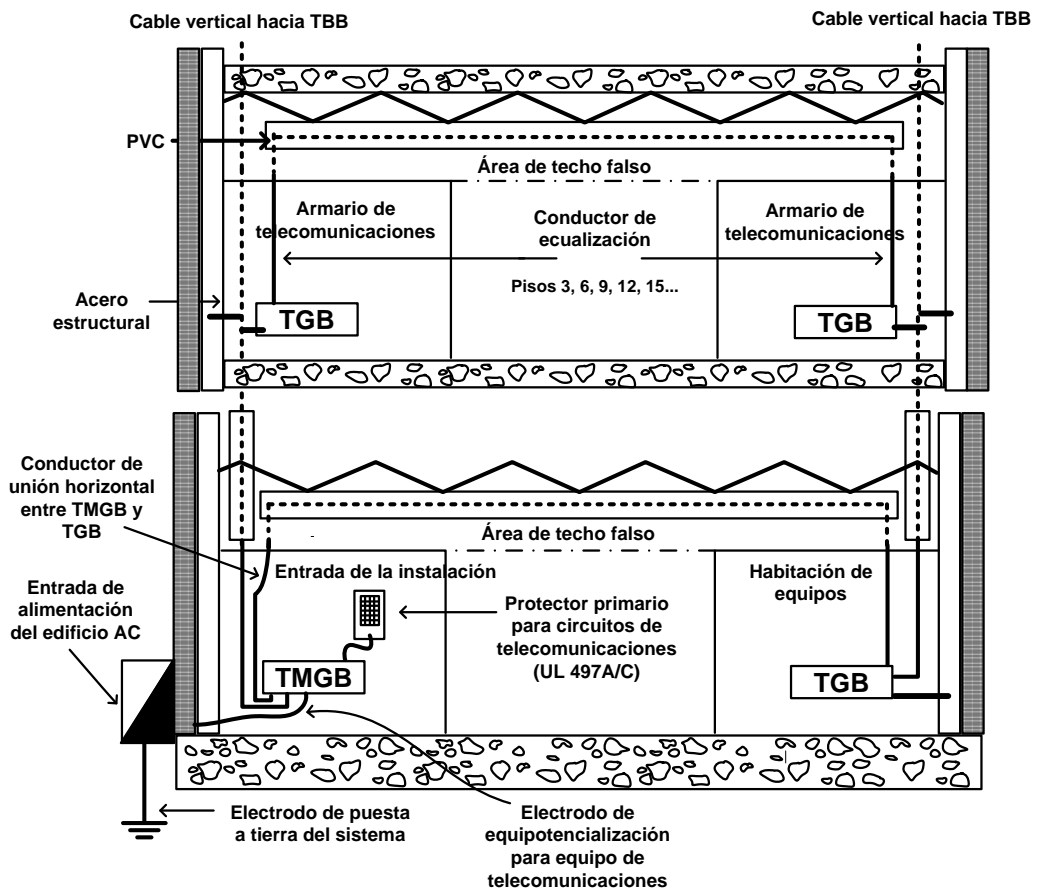
La Figura 10, ilustra el arreglo de barras de puesta a tierra para telecomunicaciones TGB<sup>96</sup>, correspondiente a una práctica aceptada para obtener un punto de conexión a tierra específicamente para conectar los equipos de telecomunicaciones de un piso determinado. La TGB se instala en cada piso, proporcionando una trayectoria vertical directa para un conductor ascendente de tierra.

---

<sup>96</sup> TGB (Telecommunications Ground Bar): Barra de puesta a tierra para equipos de telecomunicaciones.

El sistema incluye una barra principal de puesta a tierra para telecomunicaciones TMGB<sup>97</sup>, que se ubica en las proximidades de la entrada del servicio eléctrico al edificio, y que corresponde al punto de origen para la red de puesta a tierra de telecomunicaciones. La TMGB se interconecta al sistema de electrodos de puesta a tierra y a los conductores de equipotencialización verticales que integran la columna vertebral del SPT para telecomunicaciones.

**Figura 10. Configuración de la red de equipotencialización para edificios de telecomunicaciones.**



- TBB Columna vertebral de equipotencialización. (Telecommunication bonding backbone)
- TGB Barra de conexión a tierra para telecomunicaciones. (Telecommunication grounding bus bar)
- TMGB Barra principal de conexión a tierra para telecomunicaciones. (Telecommunication main grounding bar)

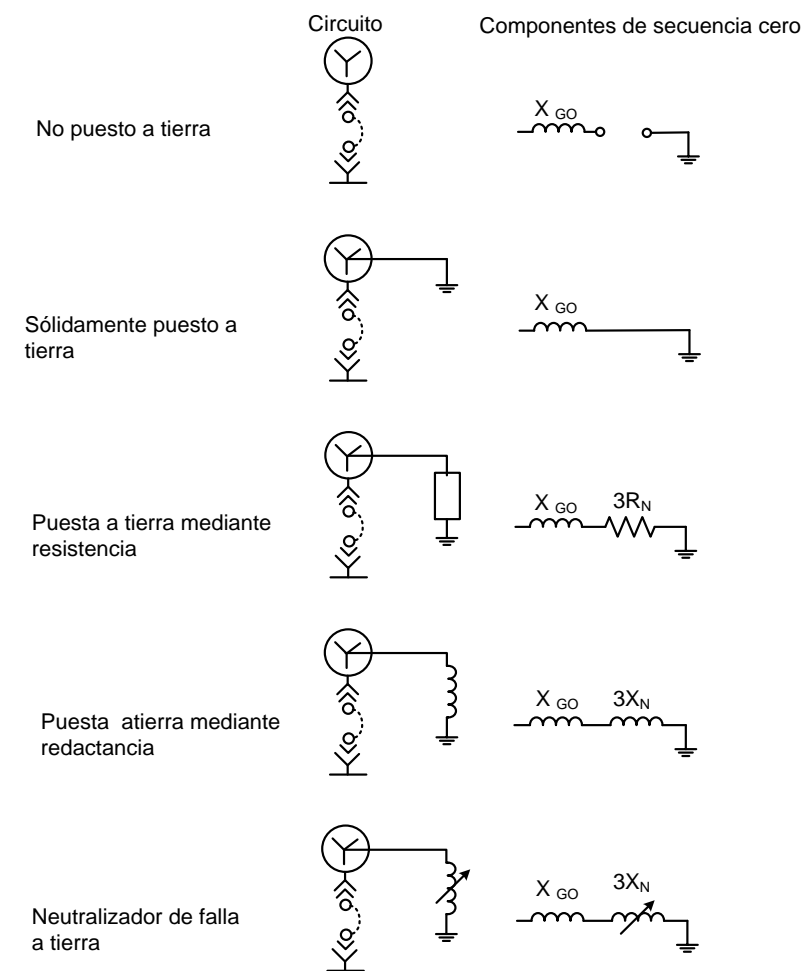
Fuente: [2]. IEEE Std. 1100.

<sup>97</sup> TMGB (Telecommunications Main Ground Bar): Barra principal de puesta a tierra para equipos de telecomunicaciones.

## ANEXO E: MÉTODOS DE CONEXIÓN A TIERRA [8].

Los sistemas eléctricos pueden emplear diferentes métodos para conectar el neutro a tierra. Estos métodos pueden ser divididos en dos categorías generales: Sólidamente puesto a tierra y puesto a tierra mediante una impedancia. A su vez, la puesta a tierra por impedancia se divide en puesta a tierra por: reactancia, resistencia y neutralizador de falla a tierra. La Figura 11 muestra ejemplos de estos métodos.

**Figura 11. Métodos de puesta a tierra del neutro y sus diagramas equivalentes.**



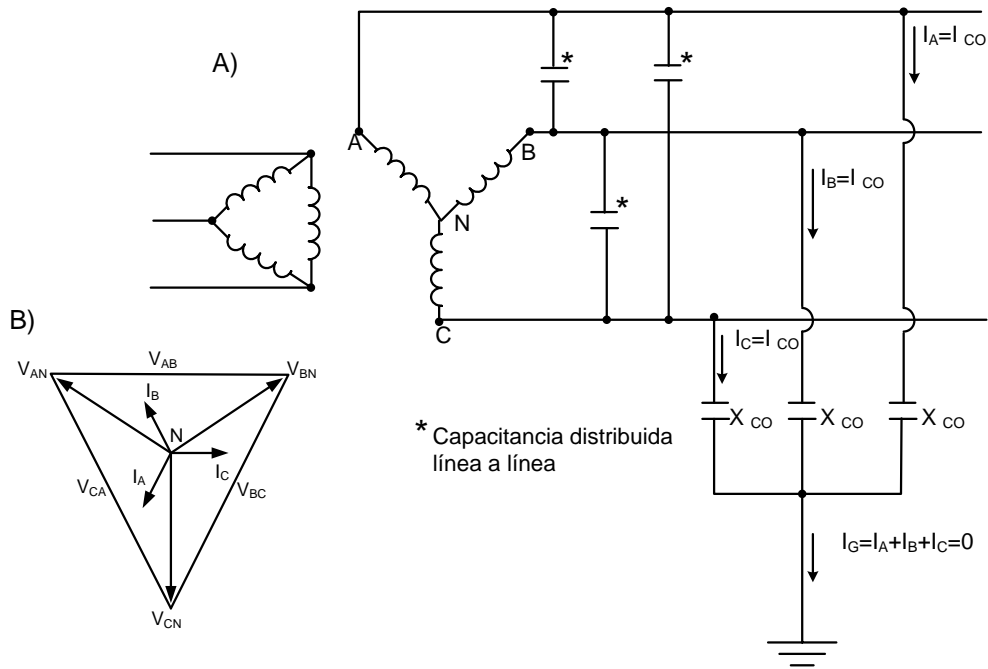
$X_{GO}$  = Reactancia de frecuencia cero del transformador o generador  
 $X_N$  = Reactancia del reactor de puesta a tierra  
 $R_N$  = Resistencia del resistor de puesta a tierra

Fuente: [8]. IEEE Std. 142.

- **Sistema no aterrizado (intencionalmente)**

En un sistema no puesto a tierra, no existe una conexión intencional entre los conductores del sistema y tierra. Sin embargo, como lo muestra la Figura 12, siempre existirá un acoplamiento capacitivo entre los conductores del sistema, y también entre conductores del sistema y tierra. Ya que la capacitancia entre fases tiene poco efecto en las características de puesta a tierra del sistema, es despreciada. Por simplicidad, la capacitancia distribuida a tierra,  $X_{co}$ , es asumida balanceada.

**Figura 12. Sistema no puesto a tierra: (A) Configuración del circuito, (B) Diagrama vectorial.**



Fuente: [8]. IEEE Std. 142.

En condiciones normales, con tensiones trifásicas balanceadas en las líneas, las corrientes capacitivas,  $I_{co}$ , en la fase serán iguales y desplazadas entre ellas  $120^\circ$ . De la misma manera las tensiones de fase a tierra, serán de igual magnitud y desplazadas  $120^\circ$  entre ellas. Mientras el neutro de las capacitancias distribuidas este al potencial de tierra, permite que el neutro del transformador también se encuentre al potencial de tierra.

Si uno de los conductores del sistema, la fase C por ejemplo, falla a tierra, la corriente que fluirá a través de la capacitancia a tierra desaparecerá, ya que no existe diferencia de potencial. La tensión a tierra a través de las dos capacitancias distribuidas restantes aumentara a valores de tensión de línea. De esta manera la corriente  $I_{co}$ , en las dos fases (A, B) se incrementara  $\sqrt{3}$  veces. Adicionalmente las

tensiones de fase estarán desplazadas entre ellas  $60^\circ$ . De esta manera, en un sistema no puesto a tierra, es posible que se presenten sobretensiones y desbalances que pueden afectar seriamente los equipos conectados, haciendo que su empleo ya no sea recomendado.

- **Sistema puesto a tierra mediante una resistencia.**

En un sistema puesto a tierra mediante una resistencia, el neutro del transformador o generador está conectado a tierra a través de una resistencia. Comúnmente, la resistencia tiene un valor considerablemente alto comparado con la reactancia del sistema donde se ubica la resistencia. A consecuencia de esto, la corriente de falla a tierra es limitada por esta resistencia (Ver Figura 13).

Las razones para limitar esta corriente mediante la resistencia incluyen:

- a) Para reducir efectos de quemado y fundición en equipos eléctricos bajo falla, tales como breakers, transformadores, conductores y maquinas rotatorias.
- b) Para reducir el estrés mecánico en circuitos y aparatos que conducen corrientes de falla.
- c) Para reducir los riesgos de choque eléctrico en el personal causado por corrientes parasitas de falla en el camino de retorno.
- d) Para controlar los huecos de tensión transitorios presentados durante el despeje de la falla.
- e) Para controlar sobretensiones mientras al mismo tiempo se evita la parada del circuito en falla.

Este método de puesta a tierra presenta dos variaciones, alta resistencia y baja resistencia, diferenciadas por la magnitud de la corriente de falla a tierra, que se permite que circule. Ambos métodos son especificados para limitar las sobretensiones transitorias a limites seguros (250% de lo normal).

La puesta a tierra mediante alta resistencia presenta las siguientes ventajas:

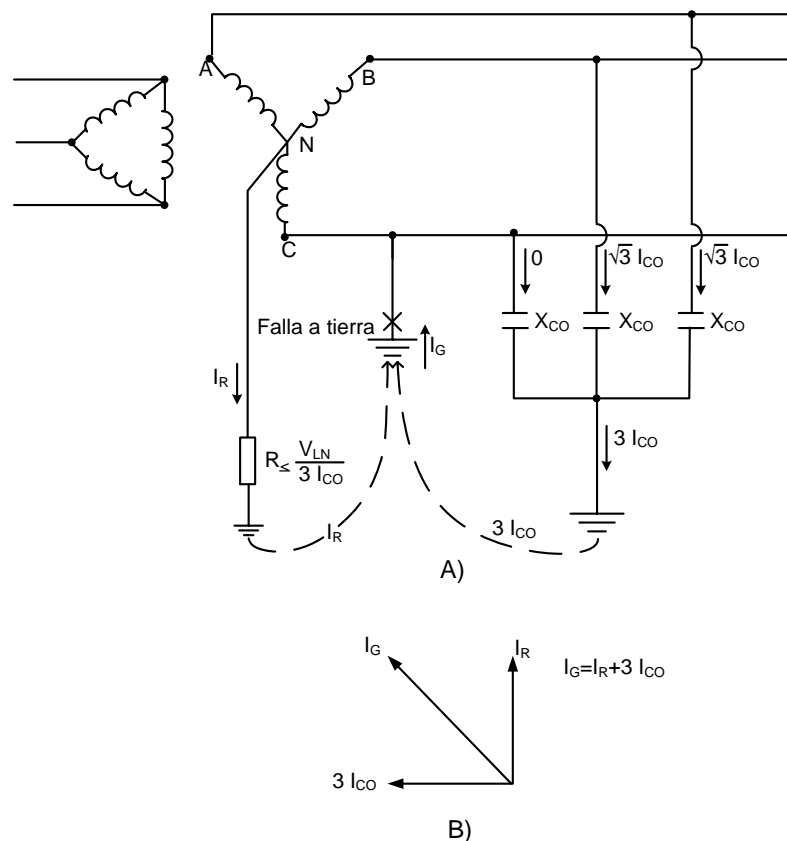
- a) La continuidad del servicio es mantenida. La primera falla a tierra no requiere que los equipos y procesos sean parados.
- b) Las sobretensiones transitorias, debidas al reenganche del sistema son reducidos.
- c) Un sistema de seguimiento de señal o de pulsos facilitara la localización de una falla a tierra.

d) La necesidad de reinstalar un sistema coordinado de protecciones es eliminado.

Este método de puesta a tierra es generalmente utilizado en:

- 1) Baja tensión (si es permitido), tal como locaciones industriales y comerciales donde no existen cargas monofásicas.
- 2) Media tensión, donde la continuidad del servicio es indispensable y la corriente capacitiva no es excesiva.
- 3) Modificaciones de sistemas previamente no puestos a tierra, donde se desea reducir las sobretensiones transitorias, causadas potencialmente por el despeje de las fallas a tierra.

**Figura 13. Limitación de la corriente de falla mediante el método de puesta a tierra mediante resistencia.**



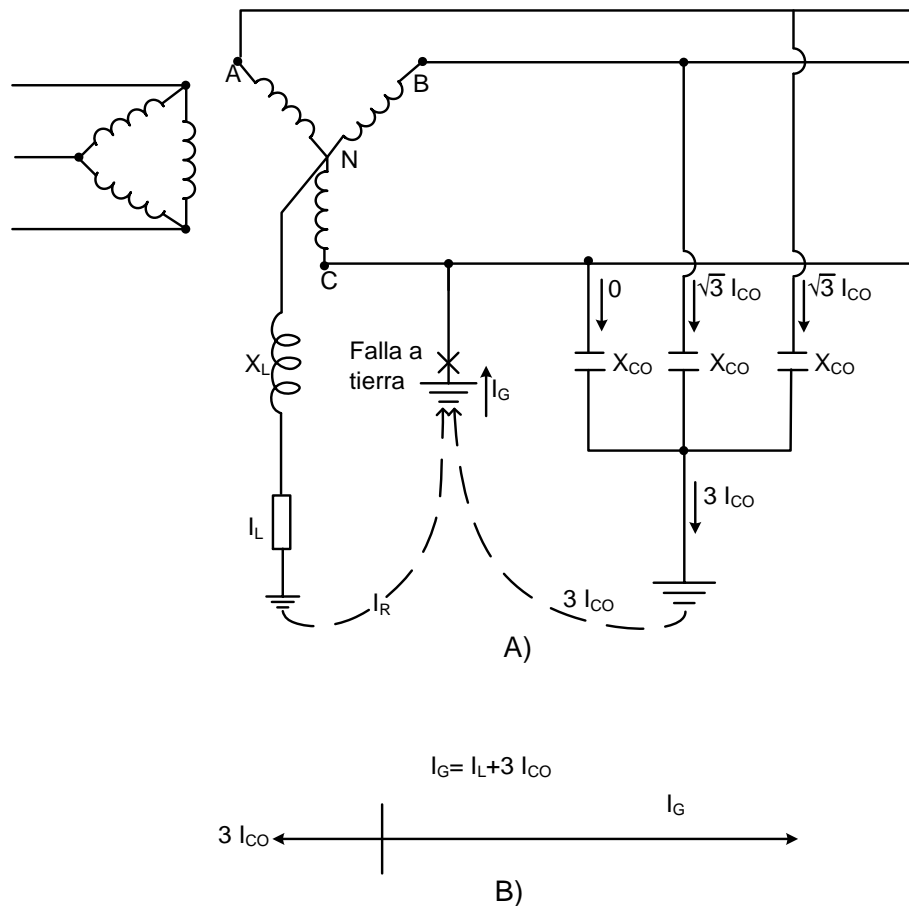
Fuente: [8]. IEEE Std. 142.

Por su parte, la puesta a tierra mediante una baja resistencia encuentra su aplicación en sistemas de media tensión de 13.2 kV y menores, particularmente donde se usan maquinas rotatorias. Al limitar las corrientes de falla a tierra a cientos de amperes, en vez de miles, los daños a equipos costosos es reducido.

- **Puesta a tierra mediante una reactancia.**

Como se muestra en la Figura 14, esta configuración, utiliza una reactancia para conectar el neutro a tierra. Ya que la corriente que puede circular durante una falla a tierra en este tipo de sistema es función de la reactancia del neutro, su magnitud es utilizada usualmente como criterio para describir el grado de conexión a tierra.

**Figura 14. Falla monofásica a tierra en un sistema puesto a tierra mediante una reactancia. A) Configuración del circuito, B) Diagrama fasorial.**



Fuente: [8].

La conexión a tierra mediante una reactancia es típicamente reservada para aplicaciones donde se desea limitar la magnitud de la corriente de falla a una magnitud relativamente cercana a la de una falla trifásica. Esta situación suele presentarse cuando una subestación grande, alimenta un sistema de distribución de media tensión, y la impedancia de secuencia cero de los transformadores reductores en la subestación causa que la corriente de falla monofásica exceda la magnitud de la corriente de una falla trifásica. Adicionalmente también es aplicado cuando se desea alimentar cargas monofásicas directamente en los terminales de salida de un generador, sin la intervención de un transformador de aislamiento. En este caso, la corriente en el neutro del generador debida al desbalance será limitada por esta reactancia.

El empleo de reactancias para limitar la corriente de fallas o desbalances, suele ser menos costoso que utilizar resistencias, si la magnitud de la corriente de falla deseada es de orden de varios miles de amperes.

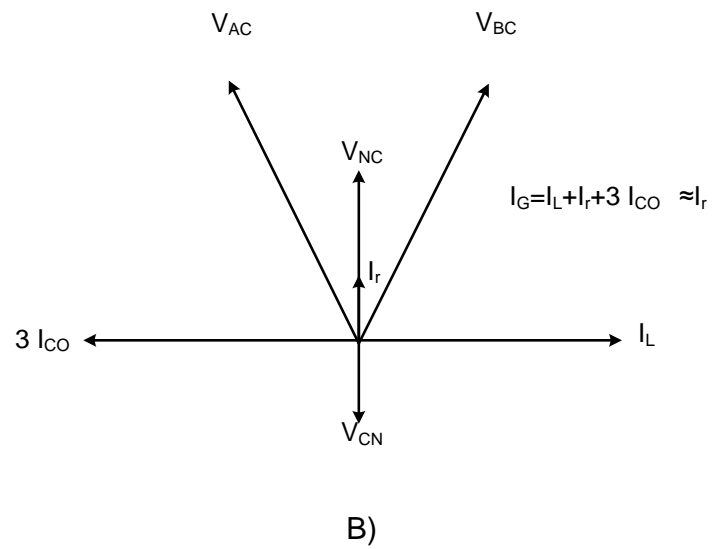
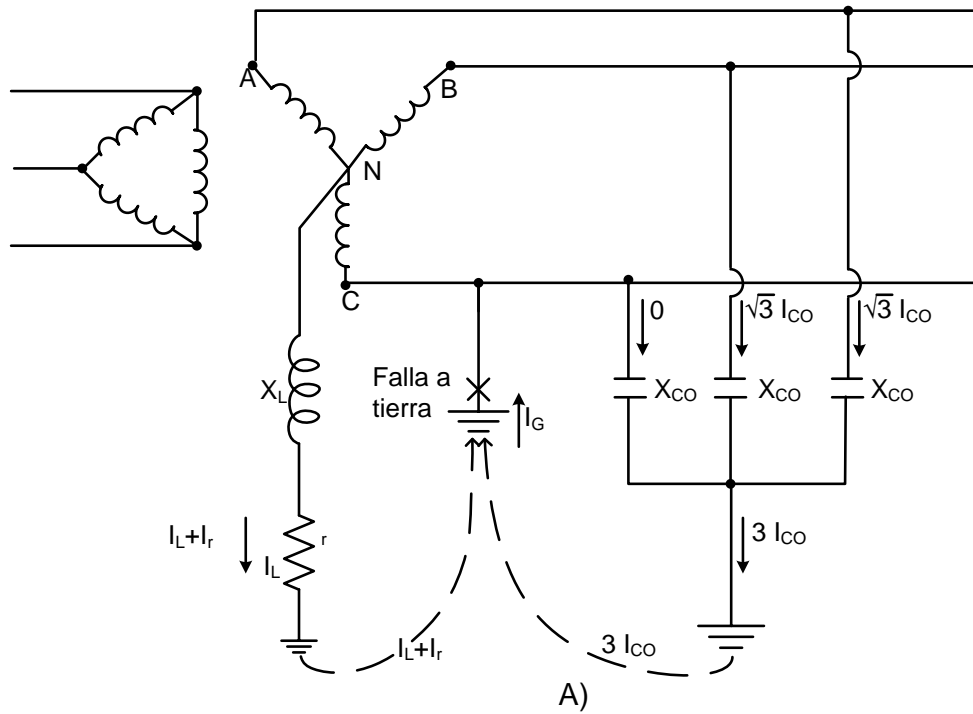
- **Puesta a tierra resonante (neutralizador de falla a tierra)**

Un neutralizador de falla a tierra corresponde a una reactancia conectada entre el neutro de un sistema y tierra. Esta reactancia está especialmente seleccionada o sintonizada para resonar con la capacitancia distribuida  $X_{CO}$  del sistema, de tal manera que la corriente de falla a tierra sea resistiva y de una magnitud pequeña (Ver Figura 15). La resistencia  $r$  representa las pérdidas de la reactancia. La corriente de falla a tierra resultante estará en fase con la tensión monofásica, luego tanto la tensión como la corriente se hacen cero de manera simultánea.

Para explicar su funcionamiento, la capacitancia por fase se asume balanceada. Cuando existe una falla a tierra en una de las fases del sistema (la fase C en la Figura 15), se le aplicara una tensión monofásica a la reactancia. Esto produce una corriente inductiva en atraso  $I_1$ , que fluye por la reactancia de puesta a tierra y por el transformador. Al mismo tiempo una corriente capacitiva en adelanto  $3I_{CO}$ , fluye por las capacitancias distribuidas de las otras dos fases no aterrizadas. De esta manera, la corriente en atraso que viene de la reactancia y la corriente en adelanto de las capacitancias distribuidas están prácticamente desfasadas  $180^\circ$ . Ajustando de forma adecuada esta reactancia (seleccionando el tap correcto), las componentes inductivas y capacitivas de la corriente pueden neutralizarse mutuamente, dejando relativamente una pequeña componente resistiva  $I_r$ , fluyendo durante la falla.

Ya que al realizarse cambios en los parámetros distribuidos del sistema el circuito resonante debe ser sincronizado de nuevo, su aplicación es ideal en sistemas que no envuelvan switcheo o reconfiguraciones de los circuitos frecuentes. Este método ha sido aplicado en sistemas de transmisión de alta tensión y también se encuentra de manera poco frecuente en la conexión a tierra de generadores de grandes centrales. Sin embargo, su aplicación es relativamente común en sistemas de distribución en Europa y Reino Unido.

Figura 15. Falla monofásica a tierra en un sistema de puesta a tierra resonante. A) Configuración del circuito B) Diagrama vectorial.



Fuente: [8].

- **Sistemas sólidamente puestos a tierra.**

Sólidamente puesto a tierra se refiere a la conexión de un conductor del sistema, usualmente el neutro de un generador o transformador de potencia directamente a tierra sin la intervención de impedancias. Sin embargo, tanto la impedancia de la fuente como la de los conductores de conexión a tierra deben ser consideradas cuando se evalúa la puesta a tierra del sistema.

Para alcanzar los beneficios de una conexión sólida a tierra, es necesario determinar el grado de conexión a tierra provista en el sistema. Una buena guía para responder a esta pregunta es la magnitud de la corriente de falla a tierra comparada con la corriente de falla trifásica. Mientras más grande sea la corriente de falla a tierra en relación a la corriente de falla trifásica, mayor será el grado de conexión a tierra del sistema. Sistemas efectivamente puestos a tierra presentan una corriente de falla monofásica a tierra del orden de 60% de la corriente de falla de cortocircuito trifásico.

Conectar el sistema a tierra sólidamente es recomendado en las siguientes situaciones:

- a) Sistemas de baja tensión (tensiones iguales o inferiores a 600 V) en donde un aislamiento automático de un circuito en condiciones de falla, puede ser tolerado o cuando hay una muy limitada capacidad para aislar una falla a tierra en un sistema puesto a tierra mediante alta resistencia.
- b) Sistemas de media y alta tensión (con tensiones superiores a 15 kV) de manera que se permita la aplicación de equipos con niveles de aislamiento a tierra.
- c) Aplicaciones de media o alta tensión, donde se desea que la magnitud de la corriente de falla a tierra sea mayor, con el fin de proveer detectores selectivos de falla a tierra.

### **Características de los métodos de conexión a tierra del sistema.**

Las ventajas y desventajas de los diferentes métodos de conexión a tierra se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5. Características de los métodos de conexión a tierra.

	No aterrizado	Sólidamente puesto a tierra	Puesto a tierra mediante reactancias		Neutralizador de falla a tierra	Puesto a tierra mediante una resistencia	
			Reactores de valores bajos	Reactores de valores altos		Bajas resistencias	Altas resistencias
% De la corriente de falla trifásica presentada en una falla monofásica a tierra	Menos del 1%	Diferentes, pueden ser del 100% o mas	Usualmente diseñados para producir corrientes del 25% al 100%	5% al 25%	Cerca de cero	20% o menores, pueden estar entre 100 A a 1000 A	Menos del 1%, no menores que la corriente de carga del sistema, $3I_{co}$
Sobretensiones transitorias	Muy altas	No excesivas	No excesivas	No excesivas	No excesivas	No excesivas	No excesivas
Observaciones	No recomendado debido a sobretensiones	Generalmente usado en sistemas (1) tensiones por debajo de 600 V (2) Mayores de 15 kV	No recomendado debido a sobretensiones excesivas		Adecuado para sistemas industriales y comerciales que se encuentran aislados de la red mediante transformadores	Generalmente usado en sistemas de 2.4 kV a 15 kV, particularmente donde maquinas rotatorias son conectadas.	Se utiliza en sistemas de 600 V o inferiores donde la continuidad del servicio es requerida.

Fuente: [8]. IEEE Std. 142.