

**PROPUESTA TÉCNICA QUE INCORPORA LOS PARÁMETROS DE  
COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN EL DISEÑO DE SISTEMAS DE  
PROTECCIÓN CONTRA RAYOS Y COORDINACIÓN DE PROTECCIONES EN  
INSTALACIONES ELECTRICAS DE USO FINAL.**

**DIEGO ARMANDO JAIMES JIMÉNEZ  
WILSON GAMBOA LAGUADO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2012**

**PROPUESTA TÉCNICA QUE INCORPORA LOS PARÁMETROS DE  
COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN EL DISEÑO DE SISTEMAS DE  
PROTECCIÓN CONTRA RAYOS Y COORDINACIÓN DE PROTECCIONES EN  
INSTALACIONES ELECTRICAS DE USO FINAL.**

**DIEGO ARMANDO JAIMES JIMÉNEZ  
WILSON GAMBOA LAGUADO**

**Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Electricista.**

**Director**

**M.Sc.(c) GABRIEL ALEXIS MALAGÓN CARVAJAL**

**Co-Directores**

**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  
2012**

## DEDICATORIA

*A Dios, por haberme dado la existencia y valentía de continuar  
en los momentos más difíciles de mi carrera y haberme permitido llegar  
a disfrutar las mieles del éxito.*

*A mis padres: Alvaro Jaimes Sanchez y Luz Stella Jiménez Acevedo,  
que dejaron gran parte de su vida,  
para dar vida a mis ilusiones que hoy en día se hacen realidad.*

*A mi novia: Lesli Tatiana Niño Antolínez,  
por su incondicional apoyo en el momento más difícil de mi carrera  
y ser parte esencial en la culminación de ésta.*

*A mis hermanas Laura y Darty, abuelos (C.E.P.D.), abuelas, tíos, tías, a  
mi prima Deisy y amigos por sus buenos deseos, sin ustedes difícilmente habría  
alcanzado éste logro.*

*Diego Armando Jaimes Jiménez*

## DEDICATORIA

*A Dios, porque sin él nada es posible.*

*A mis padres: Félix María Gamboa Rojas (Q.E.P.D.) y  
Teresa Laguado Mendoza me enseñaron lo más elemental de la vida,  
a quienes les deberé por siempre, lo que soy como persona  
y lo que llegaré a ser como profesional.*

*A todos mis familiares, especialmente a mi tía: Flor Elia Laguado Mendoza y  
a mis hermanas: Omaira y Helena por su apoyo incondicional.*

*A don Rafael Mujica Martínez (Q.E.P.D.) el primer ingeniero que conocí  
y la persona que más influyó en la decisión de estudiar esta carrera.*

*Wilson Gamboa Laguado*

## **AGRADECIMIENTOS**

A todos nuestros profesores por sus enseñanzas durante nuestra carrera.

A nuestro director Gabriel Alexis Malagón, por sus aportes en el desarrollo de éste trabajo de grado.

A nuestros codirectores Gabriel Ordoñez Plata y Wilson Giraldo Picón, por sus enseñanzas y aportes, durante el desarrollo del proyecto de grado y la carrera.

A nuestros familiares, compañeros y amigos que de alguna u otra forma colaboraron en esta etapa de nuestras vidas.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	24
1. CRITERIOS LEGALES, NORMATIVAS Y TECNICOS.....	26
1.1. Información general.....	26
1.2. Reglamentación y normas relacionadas con CEM en Colombia.....	26
1.3. Normas relacionadas con CEM en Colombia, con relación a SIPRA y coordinación de protecciones. ....	28
1.4. Normas relacionadas con CEM a nivel internacional. ....	29
1.5. Normas relacionadas con CEM a nivel internacional, con relación a SIPRA y coordinación de protecciones.....	32
2. PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN LA INCOMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA. ....	34
2.1. Información general.....	34
2.2. Control básico de la interferencia.....	34
2.3. Fuentes de perturbación. ....	35
2.4. Principales parámetros que intervienen en la CEM.....	37
2.5. Medio de acople de la interferencia.....	38
2.6. Efectos de las perturbaciones en una instalación eléctrica y la necesidad de la mitigación.....	40
2.7. Perturbaciones de mayor influencia en el SIPRA y la coordinación de protecciones eléctricas. ....	41
2.8. Mitigación del IER, en relación al SIPRA. ....	42
2.9. Mitigación de la contaminación armónica, en relación a la coordinación de protecciones eléctricas. ....	43
3. BUENAS PRÁCTICAS DE INGENIERÍA ORIENTADAS A LA MITIGACION DE LOS FENÓMENOS DE CEM OCASIONADOS POR EL IER.....	45

3.1.	SISTEMA COMPLETO DE PUESTA A TIERRA.....	45
3.1.1.	Información general .....	45
3.1.2.	Funciones y componentes básicos de un SCPT como parte del sistema de protección contra rayos.....	48
3.1.3.	Red de equipotencialización (RE).....	52
3.1.4.	Configuraciones de la red de equipotencialización (RE). .....	55
3.1.5.	Configuraciones de Terminales de Puesta a Tierra.....	59
3.1.5.1.	Configuración tipo A. ....	60
3.1.5.2.	Configuración tipo B. ....	62
3.1.6.	Barra de equipotencialización.....	65
3.1.7.	Equipotencialización en la frontera de una zona de protección contra el rayo. ....	68
3.1.8.	Recomendaciones para la Red de Equipotencialización (RE) en edificaciones. ....	71
3.2.	BLINDAJE MAGNÉTICO Y ENRUTAMIENTO DE LÍNEAS.....	73
3.2.1.	Información general. ....	73
3.2.2.	Blindaje espacial.....	74
3.2.3.	Blindaje de líneas internas.....	75
3.2.4.	Blindaje de líneas externas.....	75
3.2.5.	Enrutamiento de las líneas internas.....	76
3.3.	ZONAS DE PROTECCIÓN Y SISTEMA COORDINADO DE DPS. ...	84
3.3.1.	Información general. ....	84
3.3.2.	Dispositivos de protección contra “surges” (DPS) .....	84
3.3.3.	Clasificación de un DPS .....	85
3.3.4.	Selección e instalación de un sistema coordinado de DPS. ....	88

3.3.4.1.	Localización del DPS.....	88
3.3.4.2.	Conductores de conexión.....	89
3.3.4.3.	Distancia de protección debido al fenómeno oscilatorio.....	90
3.3.4.4.	Distancia de protección de acuerdo con el fenómeno inductivo. 91	
3.3.5.	Procedimiento para la selección de un sistema coordinado de DPS.    92	
3.3.6.	Zonas de protección contra rayos (ZPR). .....	98
3.3.6.1.	Zonas externas.....	99
3.3.6.2.	Zonas internas (Protección contra impactos directos del rayo). 100	
3.3.7.	Diseño de medidas de protección contra el IER (MPR).....	102
3.3.8.	Interconexión de ZPR's. ....	112
3.4.	SISTEMA ALTERNATIVO DE PROTECCION CONTRA RAYOS - PARARRAYOS DESIONIZADOR DE CARGA ELECTROSTÁTICA-PDCE .	119
3.4.1.	Información general.....	119
3.4.2.	Principio de funcionamiento del Pararrayos Desionizador de Carga Electrostática (PDCE) a nivel externo. ....	121
3.4.3.	El principio de funcionamiento del PDCE a nivel interno. ....	122
3.5.	SISTEMA ALTERNATIVO DE PROTECCION CONTRA RAYOS - PARARRAYOS DE PUNTA ENERGIZADA.....	124
3.5.1.	Información general.....	124
3.5.2.	Montaje con transformador elevador .....	125
4.	BUENAS PRÁCTICAS DE INGENIERÍA ORIENTADAS AL ADECUADO FUNCIONAMIENTO DE LAS PROTECCIONES ELÉCTRICAS.....	127
4.1.	FILTROS .....	127

4.1.1.	Información general.....	127
4.1.2.	Tipos de filtros .....	128
4.1.3.	Aplicación de un filtro activo en la industria .....	129
4.1.3.1.	Información general.....	129
4.1.3.2.	Descripción de la problemática y perspectiva de la solución..	129
4.1.3.3.	Recolección de datos. ....	130
4.1.3.4.	Análisis de datos y selección del tipo de filtro. ....	131
4.2.	NÚCLEOS DE FERRITA.....	132
4.2.1.	Información general.....	132
4.2.2.	Principio de funcionamiento.....	133
4.3.	CONEXIONADO: REGÍMENES DE NEUTRO.....	134
4.3.1.	Información general.....	134
4.3.2.	Conexionado-Sistema TN.....	135
4.3.3.	Conexionado sistema TT.....	138
4.3.4.	Conexionado sistema IT.....	139
4.4.	DISPOSITIVOS DE DESACOPLAMIENTO .....	143
4.4.1.	Información general.....	143
4.4.2.	Conjunto Motor-Generador.....	144
4.4.3.	Moto-Generador. ....	146
4.4.4.	Sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS).....	147
5.	GLOSARIO. ....	148
6.	CONCLUSIONES. ....	153
7.	RECOMENDACIONES. ....	158
8.	REFERENCIAS.....	160

9. BIBLIOGRAFÍA .....167

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema básico de CEM.....	35
Figura 2. Red de equipotencialización y terminal de puesta a tierra. ....	48
Figura 3. Terminal del sistema de puesta a tierra en forma de malla de una planta. .....	50
Figura 4. Utilización de las varillas de refuerzo de una estructura para la unión equipotencial. ....	53
Figura 5. Unión equipotencial en una estructura con refuerzos de acero. ....	55
Figura 6. Integración de las partes conductoras de los sistemas internos a la red de equipotencialización. ....	56
Figura 7. Combinaciones de los métodos de integración de las partes conductoras de los sistemas internos a la red de equipotencialización.....	59
Figura 8. Configuración de electrodos tipo A.....	61
Figura 9. Electrodo vertical con varilla extensible tipo A. ....	61
Figura 10. Esquema general de la configuración tipo A. ....	62
Figura 11. Esquema de anillo perimetral de tierra tipo B. ....	64
Figura 12. Esquema general de la configuración tipo B. ....	65
Figura 13. Barra de equipotencialización. ....	66
Figura 14. Arreglo de red de equipotencialización. ....	68
Figura 15. Equipotencialización en anillo de los electrodos de puesta a tierra. ....	70
Figura 16. Topología del concepto de blindajes con interfaces en puntos de penetración.....	74
Figura 17. Lazo de inducción entre generador de sobretensiones y receptor. ....	77
Figura 18. Circuito interconectado mediante cable coaxial sin conexión a masa. .	77
Figura 19. Circuito interconectado mediante cable coaxial con conexión a masa.	78
Figura 20. Blindaje efectivo frente a campos magnéticos sin conexión a masa. ...	79
Figura 21. Blindaje efectivo frente a campos magnéticos con conexión a masa. ...	80
Figura 22. Formas de conexión de un cable blindado. ....	82
Figura 23. Procedimiento de instalación de un sistema coordinado de DPS's.....	93

Figura 24. Ejemplo de aplicación de DPS en una instalación eléctrica. ....	95
Figura 25. Modelo básico para la coordinación de energía de DPS. ....	96
Figura 26. Esquema de coordinación energética de DPS.....	98
Figura 27. Principio general para las diferentes ZPR's.....	101
Figura 28. Zonas de protección contra rayos (ZPR's) definidas para medidas de protección contra el IER.....	102
Figura 29. Ejemplo de la situación del IER debido al impacto del rayo. ....	106
Figura 30. MPR que utilizan blindajes espaciales y un sistema coordinado de DPS – Protegiendo los equipos contra “surges” ( $U2 \ll U0$ y $I2 \ll I0$ ) y radiación de campos magnéticos ( $H2 \ll H0$ ). ....	108
Figura 31. MPR que utiliza un blindaje espacial de la ZPR 1 y protección de DPS en la entrada de la ZPR 1. Protegiendo los equipos contra “surges” ( $U1 < U0$ y $I1 < I0$ ) y radiación de campos magnéticos ( $H1 < H0$ ). ....	109
Figura 32. MPR que utiliza blindajes de líneas internas y DPS en la entrada de la ZPR 1. Protegiendo los equipos contra “surges” ( $U2 < U0$ y $I2 < I0$ ) y radiación de campos magnéticos ( $H2 < H0$ ). ....	110
Figura 33. MPR que utiliza solo un sistema coordinado de DPS. Protegiendo los equipos contra “surges” conducidas ( $I2 \ll I0$ y $U2 \ll U0$ ), pero no contra la radiación de campos magnéticos ( $H0$ ). ....	111
Figura 34. Interconexión de dos ZPR 1 usando DPS's. ....	113
Figura 35. Interconexión de dos ZPR 1 usando cables blindados o ductos portacables blindados.....	113
Figura 36. Interconexión de dos ZPR 2 usando DPS's. ....	114
Figura 37. Interconexión de dos ZPR 2 usando cables blindados o ductos portacables blindados.....	115
Figura 38. Transformador fuera de la estructura. ....	116
Figura 39. Transformador en el interior de la estructura. ....	116
Figura 40. Coordinación de dos DPS (DPS entre las ZPR 0/1) y (DPS entre la ZPR 1/2).....	117

Figura 41. Solo es necesario un DPS (DPS entre las ZPR 0/2) (La ZPR2 se extiende en el interior de la ZPR1).....	118
Figura 42. Diagrama esquemático de un PDCE. ....	120
Figura 43. Principio de funcionamiento del PDCE a nivel externo.....	122
Figura 44. Principio de funcionamiento del PDCE a nivel interno.....	123
Figura 45. Elementos constitutivos del Pararrayos de punta energizada. ....	124
Figura 46. Pararrayos de punta energizada, para niveles de tensión de 13.2kV y 34.5 kV. ....	125
Figura 47. Punta Pararrayos Energizada por transformador elevador montada sobre torrecilla. ....	126
Figura 48. Conexionado-Sistema TN-S.....	136
Figura 49. Conexionado-Sistema TN-C. ....	136
Figura 50. Conexionado-Sistema TN-C-S. ....	137
Figura 51. Conexionado-Sistema TT. ....	139
Figura 52. Conexionado-Sistema IT. ....	140
Figura 53. Dispositivo de desacoplamiento dinámico - Configuración básica. ....	145
Figura 54. Dispositivo de desacoplamiento dinámico. Configuración con banco de baterías. ....	146

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clase de DPS. ....	87
Tabla 2. Materiales y dimensiones para los componentes de equipotencialización. ....	89
Tabla 3. Parámetros relevantes para la fuente de daño y el equipo. ....	107
Tabla 4. Datos generales del sistema analizado. ....	130
Tabla 5. Desempeño de los regímenes de neutro en relación a parámetros de calidad de la energía. ....	142

## **LISTA DE ANEXOS**

ANEXO A. Principales normas internacionales de SIPRA.....	172
ANEXO B. MPR: El transformador de aislamiento.....	175
ANEXO C. Parámetros fundamentales para la selección de un DP S.....	180
ANEXO D. Aplicación de un sistema coordinado de DPS's.....	187

## LISTA DE FIGURAS – ANEXOS.

Figura B.1. Esquema de ruido de modo común.....	176
Figura B.2. Esquema de ruido de modo diferencial.....	176
Figura B.3. Representación eléctrica de una pantalla electrostática.....	177
Figura B.4. Aterrizaje del terminal neutro en el secundario.....	178
Figura B.5. Conexión eléctrica típica para la reducción del ruido en modo diferencial presente en el secundario.....	179
Figura D.1. Circuito equivalente de distribución de corrientes parciales de rayo en acometidas de servicio.....	189
Figura D.2. Esquema equivalente del bucle inductivo debido al enrutamiento de conductores ante una descarga atmosférica.....	196

## **LISTA DE TABLAS – ANEXOS.**

Tabla A.1. Principales normas internacionales de SIPRA.....	174
Tabla C.1. Parámetros fundamentales en la selección de un DPS.....	186
Tabla D.1. Parámetros para el diseño del sistema coordinado de DPS's.....	188

## RESUMEN

### TITULO:

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\*.

### AUTORES:

Diego Armando Jaimes Jiménez\*\*  
Wilson Gamboa Laguado\*\*

### PALABRAS CLAVES:

Compatibilidad electromagnética (CEM), sistemas de protección contra rayos (SIPRA), coordinación de protecciones eléctricas, instalaciones eléctricas de uso final, RETIE

### CONTENIDO:

La compatibilidad electromagnética CEM hace referencia a la capacidad que tiene un aparato, equipo, sistema o instalación, para funcionar de forma satisfactoria en su entorno electromagnético sin ser afectado por los campos electromagnéticos presentes y sin afectar el funcionamiento de otros aparatos, equipos o sistemas a su alrededor, debido a las emisiones de campo electromagnético propias de la operación. El aumento progresivo de cargas no lineales que se ha presentado durante las últimas décadas en instalaciones de uso final, han llevado a un cambio significativo en la calidad de la señal de los sistemas de distribución. En este sentido, son las cargas no lineales junto con las descargas atmosféricas y la sensibilidad de los componentes electrónicos que constituyen muchas de estas cargas, así como la importancia que representa su funcionamiento en relación con el tipo de proceso en los que intervienen las principales fuentes de incompatibilidad electromagnética.

El RETIE en el capítulo 2 - artículo 8: "Requerimientos generales de las instalaciones eléctricas", contempla 22 ítems para el diseño de una instalación eléctrica. El desarrollo de este proyecto de grado, busca identificar parámetros de CEM y prácticas que permitan la mitigación de las perturbaciones asociadas tan solo a dos de estos ítems, los cuales corresponden al ítem l) "Análisis de protección contra rayos" y el ítem h) "Cálculo y coordinación de protecciones".

---

\*Trabajo de investigación.

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Director M.Sc.(c) Gabriel Alexis Malagón Carvajal, Codirectores Dr. Gabriel Ordóñez Plata, MPE. Wilson Giraldo Picón.

## ABSTRACT

### TITLE:

Technical proposal that incorporates the parameters of electromagnetic compatibility in the design of lightning protection systems and protection coordination in end use electrical installation\*.

### AUTHORS:

Diego Armando Jaimes Jiménez\*\*

Wilson Gamboa Laguado\*\*

### KEYWORDS:

Electromagnetic compatibility (EMC), lightning protection systems (LPS), coordination of electric protection, end use electrical installation, RETIE.

### SUMMARY:

EMC Electromagnetic compatibility refers to the ability of a device, equipment, system or installation to operate satisfactorily in its electromagnetic environment without being affected by electromagnetic fields present and without affecting the operation of other appliances, equipment or systems around due to the electromagnetic field emissions typical of the operation. The progressive increase in nonlinear loads that has occurred during the last decades in end use electrical installation, has had a significant change in the quality of the signal distribution systems. In this sense, they are non-linear loads with atmospheric discharges and the sensitivity of the electronic components that constitute many of these loads, and the importance that represents its operation in relation to the type of process that involve the main sources electromagnetic incompatibility.

The RETIE in Chapter 2 - Article 8: "Requerimientos generales de las instalaciones eléctricas" includes 22 items for the design of an electrical installation. The development of this graduation project seeks to identify parameters of EMC and practices to mitigate the disturbances associated only two of these items, which correspond to the item l) "Análisis de protección contra rayos" and item h) "Cálculo y coordinación de protecciones".

---

\* Research work

\*\*Faculty of Physicist Mechanical Engineerings. School of Electrical, Electronical and Telecommunications Engineerings, Director M.Sc.(c) Gabriel Alexis Malagón Carvajal, Codirectores Dr. Gabriel Ordóñez Plata, MPE. Wilson Giraldo Picón.

## **INTRODUCCIÓN.**

La compatibilidad electromagnética CEM hace referencia a la capacidad que tiene un aparato, equipo, sistema o instalación, para funcionar de forma satisfactoria en su entorno electromagnético sin ser afectado por los campos electromagnéticos presentes y sin afectar el funcionamiento de otros aparatos, equipos o sistemas a su alrededor, debido a las emisiones de campo electromagnético propias de la operación [1]. En forma general, toda perturbación electromagnética que incide en el funcionamiento de una instalación eléctrica, ya sea con un grado mínimo de influencia, se considera como un parámetro generador de incompatibilidad electromagnética [2], [3].

El tema de CEM fue un tema secundario durante mucho tiempo. Esto se debía principalmente al tipo de cargas conectadas al sistema eléctrico, pues se tenía un predominio de cargas lineales y poco sensibles que no generaban problemas en los equipos alimentados. Esto llevó a que muchos de los parámetros no fuesen tenidos en cuenta o fuesen relegados a una estricta definición en los reglamentos y normas establecidos para el diseño de una instalación eléctrica.

El aumento progresivo de cargas no lineales que se ha presentado durante las últimas décadas en instalaciones de uso final, han llevado a un cambio significativo en la calidad de la señal de los sistemas de distribución. En este sentido, son las carga no lineales junto con las descargas atmosféricas y la sensibilidad de los componentes electrónicos que constituyen muchas de estas cargas, así como la importancia que representa su funcionamiento en relación con el tipo de proceso en los que intervienen (equipos médicos, rotativos, equipos de control entre otros) [4], las principales fuentes de incompatibilidad electromagnética. En consecuencia, esto implica hoy que la revisión de directrices

y recomendaciones de los parámetros que intervienen en la CEM se haga desde la etapa de diseño.

Durante el desarrollo de éste documento se mostrarán parámetros de compatibilidad electromagnética y prácticas que permiten mitigar las perturbaciones presentes en el sistema de protección contra rayos y coordinación de protecciones en una instalación eléctrica de uso final. En primer lugar, se expondrá un panorama de la reglamentación y la normativa vigente existente en el país en relación al sistema de protección contra rayos y coordinación de protecciones en una instalación eléctrica de uso final, con el objetivo de identificar información respecto a la CEM. Enseguida, se presentará un enfoque global en donde se definirán parámetros que intervienen en la CEM, la influencia y la forma en que se buscará la mitigación a dichas perturbaciones. Luego, se darán a conocer las prácticas tomadas de normas internacionales, artículos relacionados, e informes técnicos de fabricantes de dispositivos de protección eléctrica a nivel mundial, abordando primero las prácticas relacionadas con protección contra rayos y luego las correspondientes a coordinación de protecciones. Finalmente, se establecerán las conclusiones pertinentes al desarrollo del documento, junto con las recomendaciones, las referencias bibliográficas y anexos con información complementaria.

## **1. CRITERIOS LEGALES, NORMATIVAS Y TECNICOS.**

### **1.1. Información general.**

Los criterios legales, normativos y técnicos establecen las bases bajo las cuales se debe desarrollar el diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento de cualquier proyecto de ingeniería. Así mismo éstos criterios hacen referencia a los componentes reglamentarios y técnicos, que como tal son de obligatorio cumplimiento y que están dados por estamentos gubernamentales, con el objetivo de establecer las condiciones mínimas que deben cumplir tales proyectos.

Esta parte del documento está dirigida a identificar los trabajos desarrollados en relación con la CEM<sup>1</sup> desde la perspectiva reglamentaria y normativa existentes en Colombia; las principales normas existentes a nivel internacional; y finalmente la especificación técnicas para el diseño de SIPRA<sup>2</sup> y la coordinación de protecciones en las instalaciones eléctricas de uso final, de las cuales se tomaron las prácticas dirigidas a la mitigación de las perturbaciones de mayor incidencia.

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

El reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE), es el documento reglamentario en nuestro país en relación con el diseño, instalación, montaje, operación y mantenimiento de 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

---

<sup>1</sup> Compatibilidad Electromagnética. “Electromagnetic Compatibility” – EMC, en idioma inglés.

<sup>2</sup> Sistema de protección contra rayos. “Lightning protection system” – LPS, en idioma inglés.

garantizar el adecuado funcionamiento de las instalaciones y la seguridad de quienes las operan, como textualmente se especifica en el artículo 1º: *“El objeto fundamental de este reglamento es establecer las medidas tendientes a garantizar la seguridad de las personas, de la vida animal y vegetal y la preservación del medio ambiente; previniendo, minimizando o eliminando los riesgos de origen eléctrico”.*

Revisando el RETIE<sup>3</sup> desde la perspectiva de la CEM, se han observa que se han dado algunos pasos importantes con la inclusión del Artículo 6º. Análisis de compatibilidad electromagnética. En este artículo se dan algunas definiciones importantes pero no se incluye ninguna información respecto a los problemas provocados por la incompatibilidad, la forma en que se generan y la manera en que se podrían llegar a mitigar.

Por su parte, el Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC<sup>4</sup> ha realizado algunos trabajos previos con el propósito de fomentar la cultura en torno al tema de compatibilidad electromagnética y calidad de la energía, en la cual se han revisado algunas normas internacionales IEEE<sup>5</sup> e IEC<sup>6</sup> y se han aterrizado al modelo colombiano, ejemplo de ello se relacionan las normas a continuación:

- NTC7 5000 Calidad de la potencia eléctrica CPE. Definiciones y términos fundamentales. ICONTEC. 2002.
- NTC 5001 Calidad de la potencia eléctrica, límites y metodología de evaluación en punto de conexión común. ICONTEC. 2008.

---

<sup>3</sup> Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas.

<sup>4</sup> Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

<sup>5</sup> Institute of Electrical and Electronics Engineers.

<sup>6</sup> International Electrotechnical Commission.

<sup>7</sup> Norma Técnica Colombiana.

- NTC-IEC 61000-1-1 Compatibilidad electromagnética CEM parte I Generalidades. Sección 1. Aplicación y presentación de definiciones y términos fundamentales. ICONTEC. 2000.
- NTC 4552 Protección contra descargas eléctricas atmosféricas (Rayos).

Estas normas en su mayoría, presentan algunas definiciones pero no especifican prácticas o directrices claras para la mitigación de las perturbaciones que genera la incompatibilidad electromagnética en una instalación.

### **1.3. Normas relacionadas con CEM en Colombia, con relación a SIPRA y coordinación de protecciones.**

El RETIE en el capítulo 2 - artículo 8: “Requerimientos generales de las instalaciones eléctricas”, contempla 22 ítems para el diseño de una instalación eléctrica. El desarrollo de este proyecto de grado, busca identificar parámetros de CEM y prácticas que permitan la mitigación de las perturbaciones asociadas tan solo a dos de estos ítems, los cuales corresponden al ítem l) Análisis de protección contra rayos y el ítem h) Cálculo y coordinación de protecciones.

Por su parte, el RETIE asocia para el diseño de sistemas de protección contra rayos la serie de la NTC 4552-Protección contra descargas eléctricas atmosféricas (rayos), la cual está dividida de la siguiente manera:

- Parte 1: Principios generales.
- Parte 2: Manejo del riesgo.
- Parte 3: Daños físicos a estructuras y amenazas a la vida.

Tan solo la parte 3 de la NTC 4552, en el anexo E.4.1 (Observaciones generales), se hace referencia a la compatibilidad electromagnética, en donde textualmente se dice *“El diseñador e instalador de un SIPRA deben ser capaces de evaluar ambos efectos: el eléctrico y el mecánico de la descarga del rayo y estar familiarizado con los principios generales de compatibilidad electromagnética CEM”*. Al igual que en

el RETIE, en la NTC 4552 no se hace referencia a la forma en que la descarga de un rayo puede llegar a causar incompatibilidad electromagnética en una instalación, ni mucho menos a la manera en que se podrían mitigar dichas perturbaciones.

Respecto a la coordinación de protecciones el RETIE se sustenta en la NTC 2050-Código eléctrico colombiano, en el que se encuentran especificaciones referentes a la coordinación de las protecciones como la ubicación y el dimensionamiento, pero sin contemplar el tema de la CEM y su afectación sobre el diseño.

#### **1.4. Normas relacionadas con CEM a nivel internacional.**

Internacionalmente se han presentado grandes avances con relación a la identificación, el estudio, la medición y la estructuración de lineamientos de mitigación, frente a los parámetros que generan incompatibilidad electromagnética en una la 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), constituido por tres comités administrativos:

1. ACEC – Advisory Committee on Electromagnetic Compatibility.
2. TC – Technical Committee.
3. CISPR - Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques.

En donde el TC y el CISPR se encargan de realizar trabajos de pruebas y ensayos en materia de CEM, y el ACEC es responsable de revisar internamente el trabajo de estos dos comités, buscando armonía entre las normas existentes y las que se pretenden publicar. Si se cumplen los requisitos establecidos por el ACEC, tales trabajos se convierten en normas IEC.

*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.*

Las normas IEC que hasta ahora han sido publicadas respecto al tema específico de la CEM son:

- 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>8</sup>, CENELEC<sup>9</sup>, AENOR<sup>10</sup> y la EC<sup>11</sup> son normativas establecidas por comités regionales que

---

<sup>8</sup> Asociación Nacional contra Incendios. "National Fire Protection Association" en idioma inglés.

toman de referencia de las publicaciones de las normas IEC, como es el caso de la versión en borrador de la referencia 2004/108/EC EMC<sup>12</sup> Directive (y recientemente en abril de 2010 la versión revisada) publicada en julio de 2007 en el Reino Unido y Europa, 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, 2nd 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. Con esto se espera que se empleen prácticas de ingeniería relacionadas con la CEM con el sustento de la documentación técnica para el cumplimiento necesario para el diseño de instalaciones eléctricas.

Finalmente, no hay que desconocer que muchas de las normas IEC que no están dirigidas al tema de la CEM como alcance principal, tienen en cuenta parámetros que afectan la CEM de la instalación. Tal es el caso de la serie IEC 62305 Protection against lightning de donde se basa la NTC 4552 y la contraparte NFPA 780-2004 Standard for the Installation of Lightning Protection System y la serie Electrical Installations for Buildings, contrapartes de la NTC 2050 (NEC 2005) y la NFPA 70 (NEC).

---

<sup>9</sup> Comité Europeo de Normalización Electrotécnica. "Comité Européen de Normalisation Electrotechnique" en idioma francés.

<sup>10</sup> Asociación Española de Normalización y Certificación.

<sup>11</sup> Comité Europeo. "European Commission" en idioma inglés.

<sup>12</sup> Electromagnetic Compatibility.

### **1.5. Normas relacionadas con CEM a nivel internacional, con relación a SIPRA y coordinación de protecciones.**

Tomando la NTC 4552 respecto a la protección contra rayos, como se mencionó en el literal 1.3, se logró identificar en las referencias la norma IEC 62305 - Protection against lightning, la cual corresponde a la base principal de la NTC 4552 y que se encuentra dividida en cinco partes:

- Part 1: General principles.
- Part 2: Risk management.
- Part 3: Physical damage to structures and life hazard.
- Part 4: Electrical and electronic systems within structures.
- Part 5: Services.

Las primeras tres partes de la IEC están descritas en la NTC 4552, y por consiguiente de amplia masificación y acceso en Colombia. Las otras dos partes se encuentran en estudio, para futuras publicaciones.

Al abordar la parte 4 de la IEC 62305 se logró identificar que aunque su alcance principal no es la CEM de la instalación eléctrica, las prácticas que allí recomiendan permiten la mitigación de las perturbaciones asociadas al IER<sup>13</sup>, que es la fuente principal de CEM en relación al SIPRA.

El anexo A se presenta una tabla con las principales normas internacionales que tienen influencia directa al SIPRA.

---

<sup>13</sup> Impulso Electromagnético del Rayo. LEMP-“Lightning Electromagnetic Impulse” en idioma inglés.

*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.*

Respecto a la coordinación de protecciones, se tomó de referencia la parte 5 de la IEC 61000 (IEC 61000-5: Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 5: Installation and Mitigation Guidelines) puesto que está orientada a las prácticas de mitigación de los parámetros que causan incompatibilidad electromagnética en la instalación, como el caso de los armónicos, principal causa de mal funcionamiento en la protecciones. Finalmente también se abordó algunos parámetros descritos en la IEC 60364-4-43 Low-voltage electrical installations - Part 4-43: Protection for safety - Protection against overcurrent, en el que se definen algunas buenas prácticas en instalaciones de telecomunicaciones y ambientes con alto contenido de armónico.

## **2. PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN LA INCOMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA.**

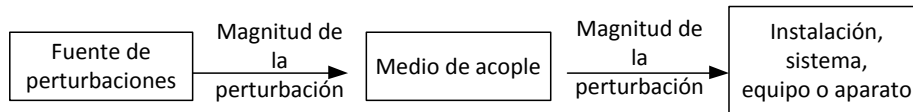
### **2.1. Información general.**

Las perturbaciones electromagnéticas son fenómenos que afectan el funcionamiento de las instalaciones y tienen un gran número de repercusiones sobre éstas, desde influencias aceptables como en el caso de los flickers (Ver literal 2.4) en los sistemas de iluminación, hasta la destrucción de componentes internos de equipos sensibles provocado por sobretensiones [5]. Muchos de los fenómenos que aquí se abordan son ampliamente conocidos, pero no siempre son tomados como problemas relacionados con la CEM de la instalación eléctrica de uso final. En este capítulo se abordarán temas como el control de la interferencia, las fuentes y las perturbaciones que provocan incompatibilidad electromagnética, los efectos de dichas perturbaciones en una instalación eléctrica y finalmente, se abordarán los parámetros de mayor influencia con relación a los sistemas de protección contra rayos y la coordinación de protecciones eléctricas; mostrando el panorama bajo el cual se desarrolló este trabajo de grado con el objetivo de identificar buenas prácticas que permitan mitigar dichas perturbaciones.

### **2.2. Control básico de la interferencia.**

En su forma más simple, el problema de la CEM consiste en una alteración electromagnética que se transmiten desde una fuente de perturbación a través del medio de acople a un aparato, equipo o en nuestro caso de interés, a una instalación eléctrica de uso final (ver figura 1). El control de la interferencia puede estar dirigido a: suprimir la fuente de interferencia, el fortalecimiento de la víctima o impedir la interacción fuente-victima a través del medio de acople. Dependiendo de la naturaleza de cada uno de los elementos anteriormente nombrados, se

pueden establecer prácticas que permitan reducir los efectos de los parámetros que generen incompatibilidades electromagnéticas en la instalación [6].



**Figura 1. Esquema básico de CEM.**

**Fuente: [7].**

NOTA: En relación a la figura 1, la salida del medio de acople se puede estar entregando una magnitud inferior de la perturbación, mitigando la influencia de dicho parámetro sobre la CEM de la instalación.

### **2.3. Fuentes de perturbación.**

Las fuentes de las incompatibilidades electromagnéticas son clasificadas de acuerdo a diferentes parámetros y características. Las principales categorizaciones se dan según [8]:

✓ El origen.

Las de origen natural incluyen el ruido atmosférico terrestre debido a tormentas, descargas electrostáticas, emisiones de rayos procedentes del sol y del cosmos que inciden sobre el planeta. Las de origen humano incluyen tanto las radiaciones intencionadas ligadas fundamentalmente a los equipos de comunicaciones como las no intencionadas, como por ejemplo los armónicos provocados por el funcionamiento de cargas no lineales.

✓ El espectro en frecuencia.

Se encuentran las de banda estrecha, que son fuentes de señal con frecuencias discretas tales como: transmisores y receptores de radio, radares, generadores industriales de alta frecuencia, hornos microondas, equipos de soldadura, receptores de sonido, dispositivos de ultrasonido y convertidores de corriente. También se encuentran las de banda ancha que son potentes disruptores en las instalaciones electrónicas de automatización, debido a las altas frecuencias asociadas a su funcionamiento. Entre los principales generadores de este tipo de perturbaciones tenemos: motores, lámpara de descarga, circuitos de control con semiconductores, dispositivos de conmutación, descargas electrostáticas, efecto corona y explosiones nucleares.

- ✓ La frecuencia con la que se presenta la perturbación y el tiempo que tarda en desaparecer.

Existen perturbaciones en las que la influencia sobre la instalación es momentánea o transitoria. Los efectos aparecen en la instalación y en poco tiempo desaparecen, pero aun cuando la duración es corta los efectos pueden llegar a ser graves, como en el caso de las descargas atmosféricas a tierra.

También hay perturbaciones en las que la influencia sobre la red es constante y la afectación en la instalación se puede dar por sobreexposición de los elementos de la instalación a dichas perturbaciones, como en el caso de las distorsiones armónicas que causa calentamiento excesivo sobre conductores y dispositivos de protección, provocando pérdidas eléctricas y disparo de las protecciones.

## **2.4. Principales parámetros que intervienen en la CEM.**

Tras haber especificado las fuentes de incompatibilidad electromagnética, se darán a conocer las perturbaciones de mayor incidencia en una instalación eléctrica de uso final, dichas perturbaciones son las siguientes:

- **Impulso Electromagnético del Rayo (IER):** Hace referencia a todos los efectos relacionados con las descargas atmosféricas a través de acoplamientos que tiene con la instalación afectada, que originan sobretensiones y sobrecorrientes en la instalación [9].
- **Transitorios:** Son alteraciones de la forma de onda esperada ya sea, en tensión o en corriente, caracterizadas por su corta duración en relación con el periodo de la señal [9].
- **Hundimiento o caídas de tensión (Sag):** Fluctuación de tensión caracterizada por producir una depresión transitoria de tensión respecto a la onda de alimentación proveniente del suministro eléctrico [10].
- **Pico o subidas de tensión (Swell):** Fluctuación de tensión caracterizada por producir un aumento transitorio de tensión respecto de la onda de alimentación proveniente del suministro eléctrico [10].
- **Flicker:** Consiste en variaciones periódicas de la amplitud o frecuencia en la forma de onda de la tensión, de tal manera de que puede ser detectada a simple vista (se observa como un parpadeo, cuando dicha perturbación se presenta al alimentar una lámpara). La Norma IEC 555-3 (1982) establece que una caída brusca de voltaje de un 3% es visible para el ojo humano y causará el centelleo de lámparas incandescentes. La IEEE 1159

la define como la impresión de inestabilidad de la sensación visual causada por un estímulo luminoso, cuya luminosidad o distribución espectral fluctúa en el tiempo.

- **Armónicos:** Onda sinusoidal de tensión o de corriente cuya frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema [11].
- **Ruido de modo común:** Son tensiones indeseadas de alta frecuencia que aparecen entre la fase y la tierra o el neutro y la tierra de la red eléctrica. Es causada principalmente por falencias en el sistema de puesta a tierra de la instalación [9].
- **Ruido de modo diferencial:** Consiste en señales indeseadas que aparecen entre la fase y el neutro de la instalación. Tales señales son el resultado de los campos electromagnéticos radiados sobre los conductores de la instalación [9].

## **2.5. Medio de acople de la interferencia.**

Las principales medidas que permiten desarrollar un control efectivo sobre las perturbaciones electromagnéticas, están basadas en alterar el medio de acople a través del cual se transfiere dicha perturbación, pues debido a la naturaleza, tanto de la fuente como de la víctima, son pocas las modificaciones que se pueden realizar para disminuir la influencia de incompatibilidad en la instalación, como se presenta en el caso de las descargas atmosféricas. A continuación se muestran los principales acoples que se pueden llegar a presentar en una instalación eléctrica [8], [12]:

- Acople galvánico.

Acoplamiento que se presenta a lo largo de todo el circuito de alimentación de los circuitos eléctricos en general y de los cables de señal para los equipos de comunicación. De aquí en adelante este tipo de acoplamiento se tomara como perturbaciones conducidas a través de la red eléctrica o de señal.

➤ Acople capacitivo.

Acoplamiento que se da a través del campo eléctrico. Se presenta por la interacción de campos eléctricos entre los conductores. Un conductor que pasa próximo a una fuente de ruido (perturbación), capta el ruido y lo transporta a otra parte del circuito (víctima). Este es el efecto entre dos cuerpos con cargas eléctricas separadas por un dieléctrico, lo que comúnmente se conoce como efecto de la capacitancia mutua. Este tipo de acoplamiento será tratado en este documento como los ruidos en modo común y diferencial que se pueden presentar en una instalación.

➤ Acople inductivo.

Acoplamiento que se presenta a través del campo magnético provocado por la circulación de corrientes por medio de un material conductor, donde se generan campos magnéticos que a su vez inciden sobre otros circuitos, provocando tensiones inducidas en relación con la forma como dicha señal varia con el tiempo y con la inductancia mutua entre los dos circuitos.

➤ Acople de influencia por ondas o radiación.

Acoplamiento que se da a través del campo electromagnético. Con altas frecuencias, el campo eléctrico y magnético debe observarse en conjunto. De esta forma, se consideran fuentes potenciales de perturbación todos los dispositivos en los que se generen altas frecuencias y en los que los

componentes funcionen, ya sea de forma deliberada o no, como antenas para tales perturbaciones.

## **2.6. Efectos de las perturbaciones en una instalación eléctrica y la necesidad de la mitigación.**

Los efectos de las corrientes y las tensiones no deseadas en las instalaciones eléctricas van desde una degradación tolerable en el funcionamiento de los aparatos, hasta fallos inaceptables, en donde por causa de la no contemplación de parámetros que afectan la CEM durante el diseño de la instalación, ocurren graves fallas sobre componentes que finalmente comprometen todo el funcionamiento de la instalación y las tareas que dichos sistemas desarrollan. Un ejemplo que a menudo se presenta en equipos de procesamiento y almacenamiento de datos son los impulsos individuales de sobretensión, que pueden llegar a provocar interferencias en el funcionamiento de los sistemas digitales, estableciendo o eliminando registros cuando se excede el umbral de perturbación de sus dispositivos [13].

Ahora bien, los efectos de las perturbaciones pueden llegar a tener una mayor importancia en relación con el tipo de instalación, con la forma como están constituidas las instalaciones, la sensibilidad de los aparatos, el enrutamiento de los conductores, el sistema de puesta a tierra y los sistemas de protección, haciendo que el tratamiento de la CEM en una instalación sea un problema de múltiples variables, que al no ser tenidas en cuenta desde la etapa del diseño generan costosas inversiones durante la etapa de operación y que está representada por la sustitución de equipos, las pérdidas asociadas con la salida de funcionamiento de los mismos, el mantenimiento no programado, y la inversión en los mecanismos de mitigación de dichas perturbaciones [14].

## **2.7. Perturbaciones de mayor influencia en el SIPRA y la coordinación de protecciones eléctricas.**

Como anteriormente fue mencionado, el desarrollo de éste proyecto está focalizado en identificar parámetros que intervienen en la CEM y prácticas que permitan mitigar dichas perturbaciones en una instalación eléctrica de uso final. En primer lugar, se busca identificar los parámetros con mayor incidencia en el funcionamiento de una instalación eléctrica, en relación con la protección contra rayos y la coordinación de protecciones eléctricas.

Para la identificación de parámetros se toman como base los artículos relacionados con la calidad de la energía eléctrica, los estudios estadísticos sobre las principales causas de daño y mal funcionamiento de equipos electrónicos y los documentos que en general están relacionados con accidentes provocados por rayos y las principales causas de mal funcionamiento en las protecciones eléctricas.

Con base en las afectaciones anteriormente mencionadas, se logró identificar que el principal parámetro de incompatibilidad electromagnética que afecta el SIPRA<sup>14</sup> es el impulso electromagnético del rayo (IER), el cual involucra todos los efectos provocados durante una descarga atmosférica a tierra y la forma como la corriente del rayo y el campo electromagnético afectan la instalación, al estar sometida a los efectos parciales o totales en el caso de una descarga directa [15].

De la misma manera, para el caso de las protecciones eléctricas se logra identificar que el parámetro con mayor incidencia en el funcionamiento, y por ende en la coordinación de las protecciones, corresponde a la distorsión armónica presente en la distribución de la energía eléctrica a la instalación o en su efecto, la

---

<sup>14</sup> Sistema de protección contra rayos. "Lightning protection system" – LPS, en idioma inglés.

contaminación de la instalación desde el punto de vista de la inyección de armónicos al sistema. Esta contaminación provoca sobrecalentamiento en las protecciones termo-magnéticas debido a la circulación de corrientes no fundamentales, que empeoran a medida que aumenta la frecuencia por causa del efecto piel, pues la corriente tiende a circular por la superficie del material conductor generando mayor calentamiento y haciendo que finalmente dicha protección se dispare, simulando el comportamiento que por diseño deben presentar, ante una sobrecarga del circuito [16].

## **2.8. Mitigación del IER, en relación al SIPRA.**

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, y principalmente las cargas sensibles [4]. Todas estas alteraciones son debidas al IER<sup>15</sup> generado a partir de las descargas atmosféricas. Una perspectiva de la problemática resulta al hacer una comparación entre los cientos de mega joule de energía que se generan a través del IER con los diversos fenómenos relacionados (sobretensiones y sobrecorrientes) y los mili joule que pueden soportar los sistemas sensibles [17]. Es claro que se deben tomar medidas adicionales que conlleven a la protección de estos equipos, la protección de la instalación y la disminución del riesgo eléctrico para el usuario.

Las practicas dirigidas a la mitigación de las perturbaciones asociadas al IER que se presentaran en este documento, son tomadas principalmente de la norma IEC 62305-4:2010- Protection against lightning – Part 4: Electrical and electronic

---

<sup>15</sup> Impulso Electromagnético del Rayo. LEMP-“Lightning Electromagnetic Impulse” en idioma inglés.

systems within structures. Por último, se presentan sistemas alternativos de protección contra el rayo, que muestran un enfoque diferente en relación con la protección contra descargas atmosféricas a tierra, reduciendo los parámetros del IER a magnitudes considerables.

## **2.9. Mitigación de la contaminación armónica, en relación a la coordinación de protecciones eléctricas.**

El cambio significativo en la calidad de la señal, debido a la proliferación de cargas no lineales, han introduciendo en la instalación fenómenos que afectan el correcto funcionamiento de las protecciones eléctricas, provocando un aumento de riesgo eléctrico y cortes innecesarios en el suministro. La razón por la que se presentan estos funcionamientos erráticos en la operación de las protecciones, se deben al principio bajo el cual está establecido el funcionamiento de dichos dispositivos, ya que su diseño parte de la contemplación de una señal libre de contaminación armónica [16].

Tomando la definición de los elementos básicos de la CEM, se puede decir que la fuente de tal perturbación se debe a la presencia de cargas no lineales al interior de la instalación o a la distorsión de la señal de alimentación, debido a corrientes armónicas presente en la red, lo cual hace inviable un posible control de este elemento, desde el punto de vista del diseñador de una instalación eléctrica de uso final. La misma situación se presenta si pensamos en el dispositivo víctima de tal perturbación, pues sería pensar en la modificación del diseño de las protecciones eléctricas. Por tanto solo nos queda pensar en el medio de acople, en donde con la salida de dicho elemento se logre la disminución en la magnitud de la perturbación y con esto una mitigación en su influencia.

*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.*

Las prácticas identificadas en el capítulo 3 y 4 de éste documento, están dirigidas especialmente a combatir las corrientes armónicas presentes en la señal de alimentación, desde el medio de acople. Dichas prácticas son tomadas especialmente del reporte técnico IEC TR 61000-5-6:2002- Electromagnetic compatibility (EMC)- Part 5-6: Installation and mitigation guidelines- Mitigation of external EM influences, ampliamente difundida entre el gremio de fabricantes de protecciones eléctricas a nivel mundial.

### **3. BUENAS PRÁCTICAS DE INGENIERÍA ORIENTADAS A LA MITIGACION DE LOS FENÓMENOS DE CEM OCASIONADOS POR EL IER<sup>16</sup>.**

Las buenas prácticas que se presentan a continuación, son referentes interpretados de la norma IEC 62305-4:2010- Protection against lightning – Part 4: Electrical and electronic systems within structures, junto con artículos técnicos y catálogos de fabricantes.

#### **3.1. SISTEMA COMPLETO DE PUESTA A TIERRA**

##### **3.1.1. Información general [17], [18].**

El sistema de puesta a tierra (SPT), hace parte del sistema de protección externa que conduce y dispersa corrientes del rayo en el suelo o terreno. Comprende toda unión directa entre los equipos eléctricos y electrónicos con el terreno o una masa metálica, con el objeto de conseguir que el conjunto de instalaciones, edificios y superficie próxima del terreno no existan diferencias de potencial peligrosas (tensiones de paso y de contacto) y que, al mismo tiempo, permita el paso a tierra de las corrientes de falla o de rayo.

Aunque algunos elementos de un SPT pueden disponerse para que cumplan una función específica, forman parte de un único sistema. La norma internacional IEC 62305-4:2010, exige que todos los elementos de un SPT estén conectados entre sí formando una red de equipotencialización. Por lo tanto, un sistema completo de puesta a tierra (SCPT<sup>17</sup>), está compuesto por la red de equipotencialización (RE<sup>18</sup>)

---

<sup>16</sup> Impulso Electromagnético del Rayo. LEMP-“Lightning Electromagnetic Impulse” en idioma inglés.

<sup>17</sup> Sistema Completo de Puesta a Tierra. “Complete Earthing System” en idioma inglés.

y el terminal de puesta a tierra (TPT<sup>19</sup>), de forma que con esto se aseguren los siguientes parámetros:

- ✓ La protección de las personas, limitando las tensiones de paso y de contacto a valores seguros.
- ✓ La protección de instalaciones contra daños por rayos.
- ✓ La compatibilidad electromagnética (CEM<sup>20</sup>), para la limitación de perturbaciones electromagnéticas.
- ✓ El correcto funcionamiento de la red de energía eléctrica al servir de referencia común de tensión y al mismo tiempo asegurar una buena calidad de energía eléctrica.

Los rayos y las fallas a tierra en los sistemas de potencia pueden causar la circulación de grandes corrientes, las cuales pueden crear tensiones peligrosas en las instalaciones (tensiones de paso y de contacto). Estas corrientes pueden tener una amplitud que abarca un rango entre unos pocos ampere hasta decenas de kilo ampere por fallas o rayos. Desde el punto de vista del espectro de frecuencia, estos fenómenos producen señales cuyas frecuencias varían entre los 60 Hz hasta varios megahertz.

Por otra parte, la red de equipotencialización es el conjunto de conductores que conectan varias partes del sistema eléctrico y las estructuras de una instalación a un potencial uniforme. Así mismo, tiene como función interconectar el terminal de puesta a tierra con todas las partes conductivas de la estructura y del sistema interno (sistemas eléctricos y electrónicos dentro de una estructura, excluidos los

---

<sup>18</sup> Red de Equipotencialización. "Bonding Network" en idioma inglés.

<sup>19</sup> Terminal de Puesta a Tierra. "Earth-Termination System" en idioma inglés.

<sup>20</sup> Compatibilidad Electromagnética - EMC- "Electromagnetic compatibility" en idioma inglés.

conductores activos), con el fin de reducir las diferencias de potencial y el campo magnético causado por las corrientes del rayo. Del mismo modo el TPT<sup>21</sup> es un conjunto de elementos conductores que proveen un contacto eléctrico directo con el suelo y dispersan las corrientes de rayo a tierra. Estos elementos pueden ser:

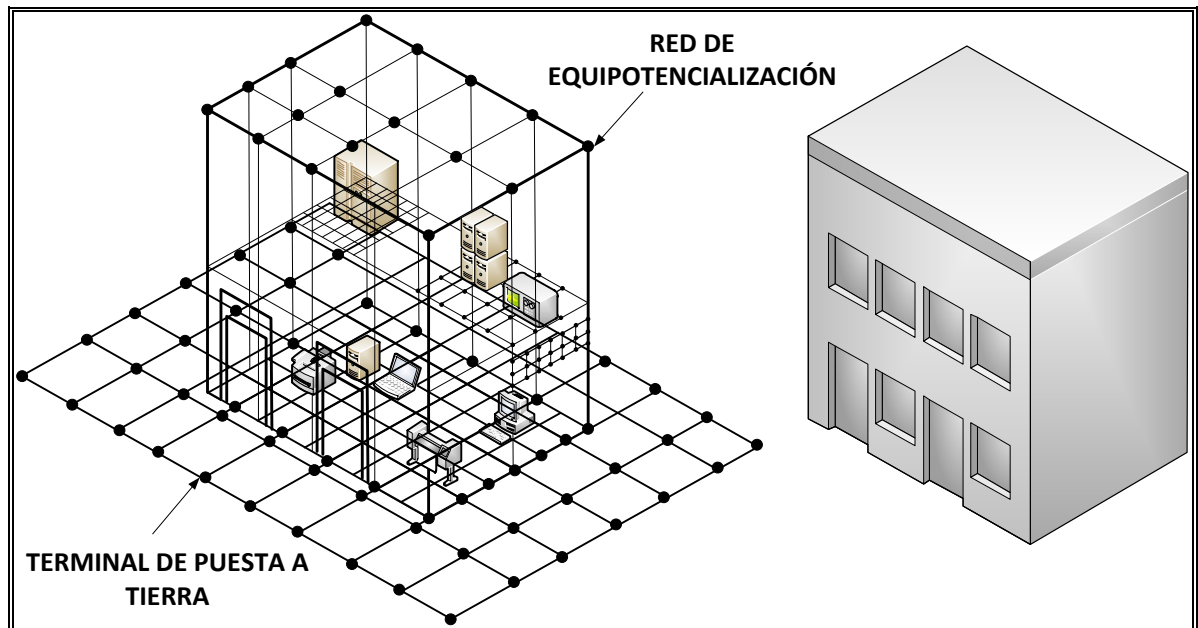
- **Electrodos:** Parte o grupo de partes del TPT que suministran contacto directo eléctrico con la tierra y dispersa las corrientes del rayo en ésta. Pueden ser verticales, horizontales o se puede utilizar la cimentación de acero reforzado de la estructura. En este último caso se conocen como electrodos de puesta a tierra de cimentación.
- **Anillos:** Electrodos a tierra que forman un lazo cerrado alrededor de la estructura. Interconectan las bajantes para distribuir las corrientes de rayo entre ellos.
- **Enmallados:** Interconexión de los terminales de sistemas de puesta a tierra de varias estructuras.

En la figura 2, se presenta esquemáticamente un ejemplo de un sistema de puesta a tierra completo, en el que se ha construido una red de equipotencialización a lo largo, alto y ancho de la estructura junto con la posterior equipotencialización del terminal de puesta a tierra.

---

<sup>21</sup> Terminal de Puesta a Tierra. "Earth-Termination System" en idioma inglés.

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.



**Figura 2. Red de equipotencialización y terminal de puesta a tierra.**

**Fuente: [17].**

NOTA: Respecto a la figura 2, el terminal de puesta a tierra puede estar constituido por electrodos naturales como: los cimientos metálicos de la estructura y las tuberías metálicas de los servicios; y electrodos fabricados como placas o conductores en diferentes configuraciones.

### **3.1.2. Funciones y componentes básicos de un SCPT<sup>22</sup> como parte del sistema de protección contra rayos.**

En términos generales un SCPT, como parte del sistema de protección contra rayos, debe realizar las siguientes tareas específicas:

- Dispersar las corrientes del rayo.

---

<sup>22</sup> Sistema Completo de Puesta a Tierra. "Complete Earthing System" en idioma inglés.

*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.*

- Disipar las corrientes del rayo.
- Controlar diferencias de potenciales peligrosos.

Los electrodos de puesta a tierra, de los cimientos de la estructura (ver la nota de la página 20) y los electrodos a lo largo del anillo presente en la configuraciones tipo B (ver literal 3.1.5.2), cumplen a cabalidad con los tres anteriores requerimientos. Esto sucede debido a que las cimentaciones de la estructura son excelentes electrodos de puesta a tierra, puesto que estos presentan muy baja resistencia y actúan como excelente referencia de equipotencialización. En contra parte, una configuración tipo A de electrodos radiales (ver literal 3.1.5.1) o de electrodos verticales profundos, no cumplen con las tareas específicas antes mencionadas con respecto a la unión equipotencial.

NOTA: Los cimientos corresponden a las bases estructurales de una edificación en contacto directo con la tierra. Éstos pueden estar contruidos en acero reforzado y concreto.

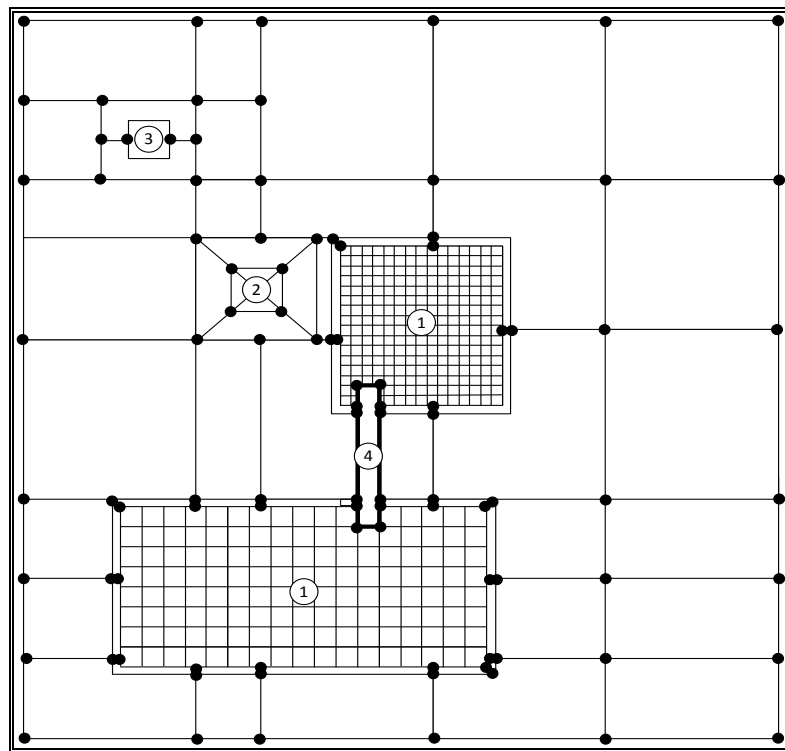
Para interconectar el TPT <sup>23</sup> de varias estructuras pertenecientes a la misma instalación, que puede estar constituidas por diferentes estructuras, torres de comunicación y equipos en las partes externas de las edificaciones, como en el caso de una planta industrial, se puede realizar mediante la construcción de un enmallado, como se muestra en la figura 3. Este sistema provee una baja impedancia entre edificios y tiene una ventaja significativa en la mitigación de fenómenos CEM.

---

<sup>23</sup> Terminal de Puesta a Tierra. "Earth-Termination System" en idioma inglés.

*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.*

El electrodo de tierra del anillo equipotencial <sup>24</sup> alrededor de la estructura y el electrodo de tierra del anillo equipotencial dentro de la estructura deberá ser unidos a los electrodos de puesta a tierra de la cimentación, es decir que estos componentes deberán formar una red enmallada dentro y alrededor de la estructura, teniendo un ancho de la malla generalmente de 5 m en el interior. Para estructuras adyacentes no separadas más de 30 metros, se recomienda un ancho de malla de 20 m x 20 m. Más allá de ésta distancia de separación de estructuras adyacentes, las mallas pueden ser ensanchadas a 40 m x 40 m.



**Figura 3. Terminal del sistema de puesta a tierra en forma de malla de una planta.**

**Fuente: [17].**

---

<sup>24</sup> “Ring Earth Electrode” en idioma inglés.

- 1) Construcción de una red mallada<sup>25</sup> con los electrodos de puesta a tierra de la cimentación.
- 2) Torre de comunicaciones al interior de la planta.
- 3) Equipos en partes externas a las edificaciones.
- 4) Zanjas portacables.

NOTA: La figura 3 representa una vista de planta.

Lograr un efectivo SPT<sup>26</sup> en una edificación construida puede ser bastante difícil, sino imposible, pues no es tan sencillo garantizar la conexión a tierra de los bajantes y el uso apropiado de la cimentación. Por ello, se recomienda que desde las primeras etapas del diseño se considere la resistividad del suelo y la naturaleza del terreno de una estructura. Esta información es importante para el diseño de un SPT y puede condicionar el diseño de la edificación. Por ésta razón, es primordial realizar reuniones previas al inicio de la construcción entre diseñadores de un SPT, arquitectos y constructores con el fin de lograr un buen resultado con alta seguridad al mínimo costo.

Una mínima impedancia del sistema de puesta a tierra y la equipotencialización de las partes metálicas no energizadas permiten una optimización en el diseño de un SIPRA, pues soporta una mayor disipación de las corrientes presentes ante una descarga atmosférica y una disminución de las diferencias de potenciales peligrosas.

---

<sup>25</sup> “Meshed Network” en idioma inglés.

<sup>26</sup> Sistema de Puesta a Tierra. “Earthing System” en idioma inglés.

### **3.1.3. Red de equipotencialización (RE).**

La RE es el conjunto de conductores que conecta partes metálicas no energizadas del sistema eléctrico y la estructura de una instalación, hasta el terminal de puesta a tierra, permitiendo disminuir las diferencias de potencial peligrosas ante la circulación de una corriente de falla y su respectiva disipación a tierra.

Es necesario que la RE, tenga una baja impedancia para evitar diferencias de potencial peligrosas entre todos los equipos en el interior de la ZPR<sup>27</sup>. Esto se puede lograr integrando las partes conductoras de la estructura, a partes conductoras del sistema interno, elementos metálicos y servicios entrantes en material conductor; todo esto se une directamente en la frontera de cada ZPR o mediante el adecuado uso de dispositivos de protección contra “surges”<sup>28</sup> (DPS<sup>29</sup>), junto con la red de equipotencialización la cual reduce el campo magnético de fuentes externas (ver anexo A-IEC 62305-4:2010).

Del mismo modo cuando se establecen uniones equipotenciales en los sistemas internos, las corrientes parciales del rayo (provocadas por el campo magnético del rayo) pueden fluir dentro de estos sistemas. Por lo tanto, este efecto debe ser considerado en el diseño de las zonas de protección y la coordinación de DPS (ver literal 3.3), estas uniones equipotenciales a menudo son provistas por conductores, para aparatos dentro de una misma zona de protección, y a través de un DPS cuando la unión equipotencial que se busca, está dada entre diferentes zonas de protección.

---

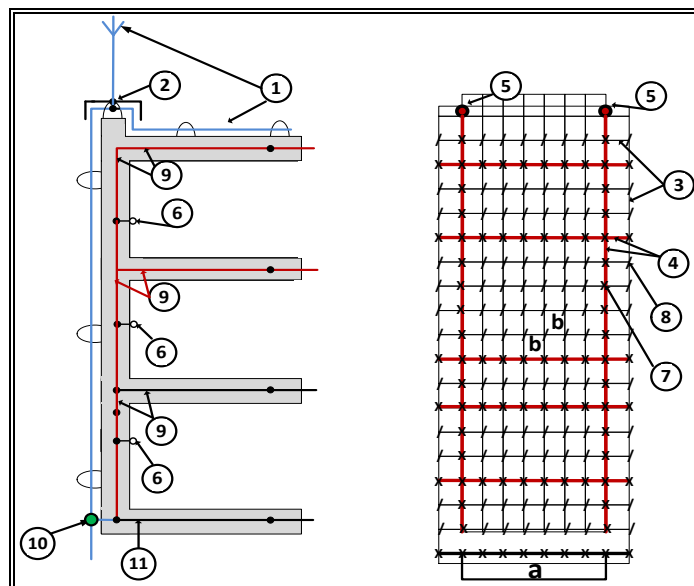
<sup>27</sup> Zona de protección contra rayos. “Lightning Protection Zone” en idioma inglés.

<sup>28</sup> “Surge” en idioma inglés está definida como Transitorio creado por un impulso electromagnético que aparece como una sobretensión y/o sobrecorriente.

<sup>29</sup> Dispositivo de protección contra “surges”. SPD en idioma inglés.

Por otro lado la RE puede ser diseñada como una estructura de malla tridimensional, con un ancho de malla típico de 5 m (ver figura 2). Esto 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). Así mismo se deben integrar de la misma manera las barras de equipotencialización (ver ítem 3.1.6) y los blindajes magnéticos de la ZPR (ver literal 3.2).

Ejemplos de redes de equipotencialización (RE) son mostrados en las figuras 4 y 5. En la parte izquierda de la figura 4 se muestra un corte vertical sobre la vista frontal de una edificación, esquematizando la RE. A la derecha se muestra un corte horizontal sobre las placas de la edificación, en donde se muestra la forma como se debe integrar el acero de refuerzo de la estructura a la RE.



**Figura 4. Utilización de las varillas de refuerzo de una estructura para la unión equipotencial.**

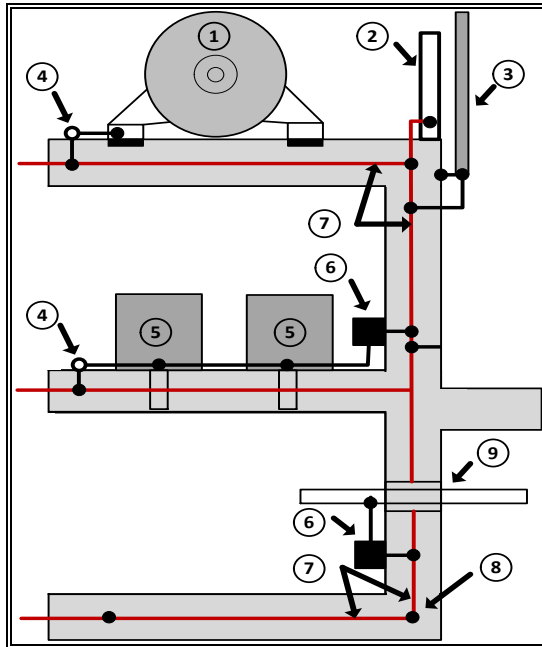
**Fuente: [17].**

- 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>30</sup> en concreto (con los conductores de malla superpuestos).
- 10) Anillo del electrodo de puesta a tierra (punto verde). Es aquel en el cuál se equipotencializa 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.

---

<sup>30</sup> “Steel Reinforcement” en idioma inglés.

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.



**Figura 5. Unión equipotencial en una estructura con refuerzos de acero.**

**Fuente: [17].**

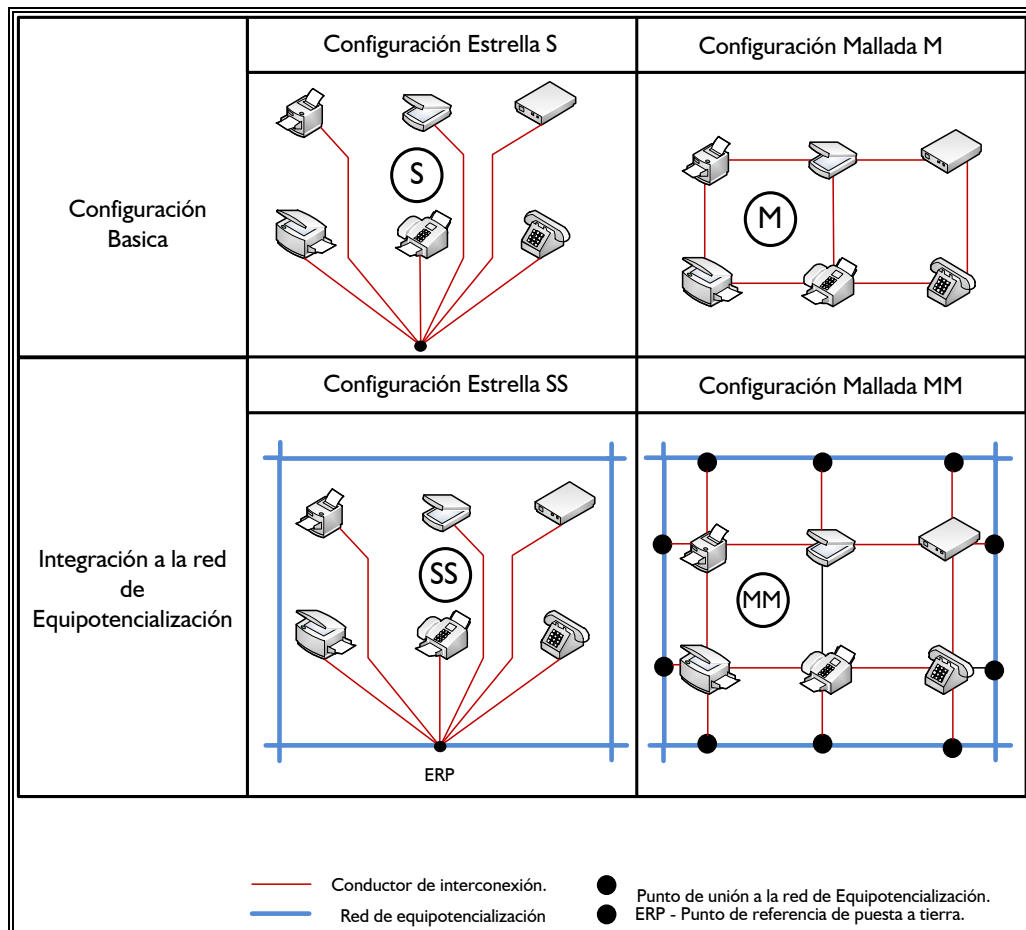
- 1) Equipo eléctrico. (Motor, generador)
- 2) Vigas de acero
- 3) Cubierta metálica de la fachada
- 4) Conjunto de interconexiones.
- 5) Equipos eléctricos o electrónicos
- 6) Barra de equipotencialización.
- 7) Acero de refuerzo en concreto (Con los conductores de malla sobrepuestos).
- 8) Cimentación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

NOTA: La figura 5 muestra un corte vertical sobre la vista frontal de una edificación.

### 3.1.4. Configuraciones de la red de equipotencialización (RE).

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.

Las partes conductoras (gabinetes, recintos<sup>31</sup>, estantes) y el conductor de protección<sup>32</sup> (PE) de los sistemas internos (sistemas eléctrico o electrónico), deben estar conectadas a tierra mediante una red de equipotencialización de acuerdo con las siguientes configuraciones (ver figura 6):



**Figura 6. Integración de las partes conductoras de los sistemas internos a la red de equipotencialización.**

<sup>31</sup> “Enclosures” en idioma inglés.

<sup>32</sup> “Protective Earth Conductor” en idioma inglés.

**Fuente: [17].**

- ✓ Configuración en estrella (*S*): Configuración básica en donde todos los componentes metálicos (ejemplo gabinetes, recintos, estantes) de los sistemas eléctricos y electrónicos deberán estar aislados adecuadamente del SPT.
  
- ✓ Configuración en estrella (*SS*): Configuración en donde la configuración *S* básica se integra al sistema de puesta a tierra mediante una barra de equipotencialización, que actúa como punto de referencia de tierra (PRT<sup>33</sup>).

Cuando se utiliza la configuración *S*, todas las líneas energizadas de cada uno de los equipos, deben ser cableadas de tal forma que dichos conductores queden en paralelo y cerca a los conductores de equipotencialización o de protección eléctrica (PE), siguiendo la configuración en *S*, con el fin de evitar bucles de inducción. La configuración *S* puede ser utilizada, cuando los sistemas eléctricos y electrónicos, estén localizados en zonas relativamente pequeñas, donde las líneas que entran en la zona lo hacen por un solo punto.

NOTA: Los bucles de inducción son creados debido al enrutamiento de las líneas (ver literal 3.2.5), la parte crítica de estos bucles, radica en que a mayor área de inducción (tamaño del bucle) una mayor sobretensión se presentara ante la incidencia de un campo magnético.

- ✓ Configuración enmallada (*M*)

---

<sup>33</sup> “Earthing Reference Point” en idioma inglés.

*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.*

Configuración básica en donde todos los componentes metálicos (ejemplo gabinetes, recintos, estantes) de los sistemas eléctricos y electrónicos<sup>34</sup>, no deben ser aisladas del SPT.

- ✓ Configuración enmallada (*MM*): Configuración en donde la configuración *M* básica se integra al sistema de puesta a tierra mediante múltiples puntos de unión<sup>35</sup>, a la RE.

La configuración *M* es preferida para sistemas eléctricos y electrónicos extendidos sobre zonas relativamente amplias o en estructuras donde muchas de los conductores se encuentran entre las partes individuales de los equipos, y en donde las líneas entran a la estructura por diferentes puntos.

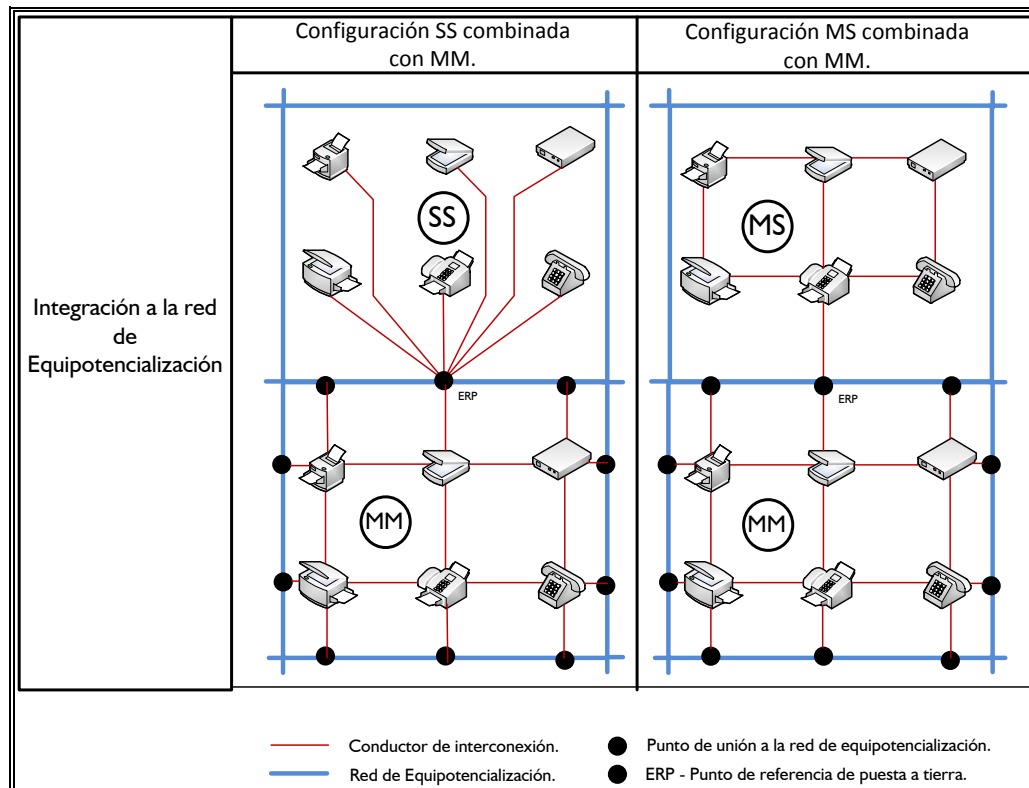
En sistemas complejos, las ventajas de ambas configuraciones (configuraciones *S* y *M*) pueden ser combinadas como se muestra en la figura 7, resultando una combinación 1 (*SS* combinada con *MM*) o una combinación 2 (*MS* combinada con *MM*).

---

<sup>34</sup> “Internal Systems” en idioma inglés.

<sup>35</sup> “Bonding Points” en idioma inglés.

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.



**Figura 7. Combinaciones de los métodos de integración de las partes conductoras de los sistemas internos a la red de equipotencialización.**

**Fuente: [17].**

### 3.1.5. Configuraciones de Terminales de Puesta a Tierra [19], [20].

El terminal de puesta a tierra es usado para dispersar y disipar la corriente del rayo en la tierra que proviene de los bajantes, reduciendo el riesgo de tener tensiones de paso y de contacto peligrosas. En términos generales, para un sistema de protección externo se debe buscar un bajo valor de resistencia de puesta a tierra (si es posible valores menores a 10  $\Omega$ , frente a transitorios de baja frecuencia).

Para los SPT's es recomendable que estos estén integrados con todos los demás sistemas de puesta a tierra (comunicaciones, potencia, tuberías de conducción),

por medio de uniones que garanticen la equipotencialidad en todas las condiciones de operación.

En general la norma NTC 4552-3:2008 considera 2 tipos básicos de configuraciones de terminales de puesta a tierra, conocidas como A y B.

### **3.1.5.1. Configuración tipo A.**

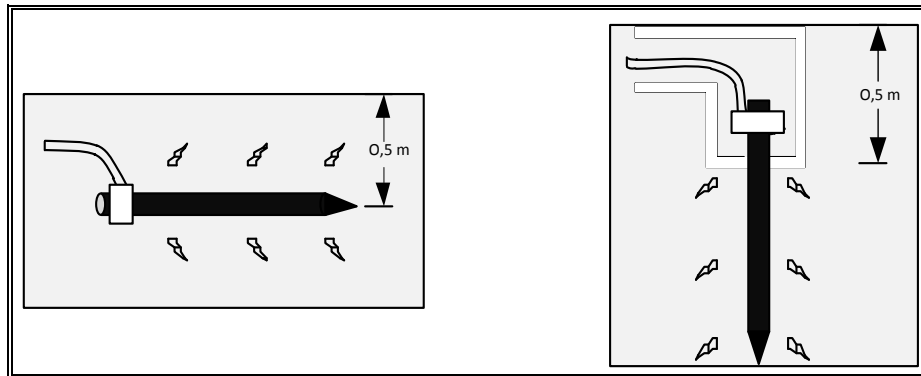
Este tipo de configuración consiste en un terminal de puesta a tierra que incluye electrodos horizontales o verticales instalados fuera de la estructura a ser protegida y conectados a cada una de las bajantes del sistema de protección externa. Esta configuración es conveniente para estructuras bajas, por ejemplo residencias familiares, en estructuras existentes, en sistemas de protección con varillas y cables extendidos o para un sistema aislado.

En la configuración tipo A, el número total de electrodos de puesta a tierra no debe ser menor a 2.

NOTA: Para información de longitudes mínimas de los electrodos de puesta a tierra a utilizarse, refiérase a la norma NTC 4552-3:2008 en el capítulo 5.4.

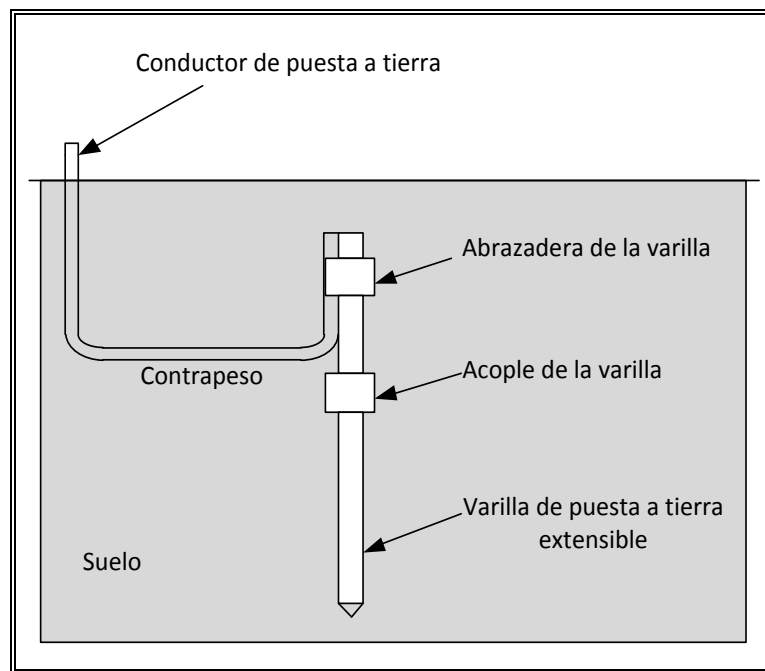
De acuerdo con la norma NTC 4552-3:2008, los terminales de puesta a tierra tipo A deberán ser instaladas a una profundidad de al menos 0,5 m en su parte superior, distribuidos uniformemente para poder minimizar efectos de acople eléctrico en la tierra e instalados de tal forma que permita su inspección durante la construcción. La figura 8 muestra las distancias que deben cumplir los electrodos de puesta a tierra, según su disposición en el terreno.

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.



**Figura 8. Configuración de electrodos tipo A.**

**Fuente: [20].**



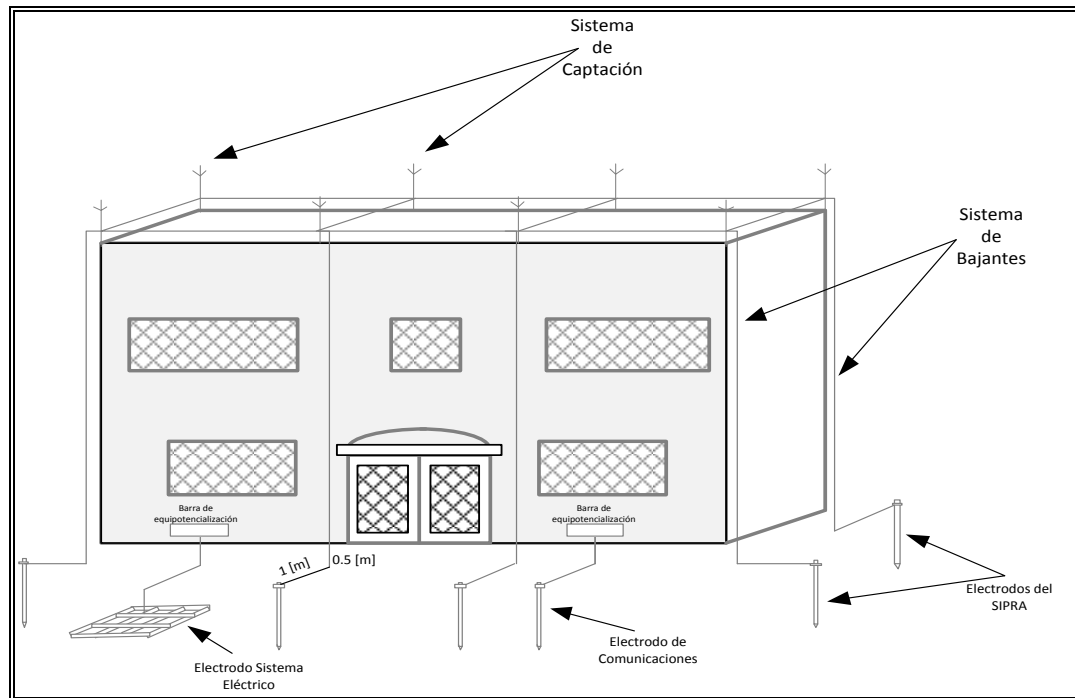
**Figura 9. Electrodo vertical con varilla extensible tipo A.**

**Fuente: [19].**

La figura 9 presenta un ejemplo de un electrodo vertical tipo A con varilla extensible, en el que se usa un compresor o un equipo de perforación para anclar éste tipo de varillas.

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.

En la figura 10, se muestra un esquema general de la configuración tipo A en una edificación.



**Figura 10. Esquema general de la configuración tipo A.**

**Fuente: [20].**

### 3.1.5.2. Configuración tipo B.

Este tipo de configuración está formada por un terminal de puesta a tierra que incluye un anillo conductor externo a la estructura a proteger y el cual debe estar en contacto con el suelo en por lo menos un 80 % de su longitud total o en contacto con los electrodos de la cimentación o electrodos a tierra los cuales deben estar interconectados. Estos electrodos también pueden ser del tipo mallado (Ver figura 12).

Generalmente la configuración tipo B es recomendada para:

*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.*

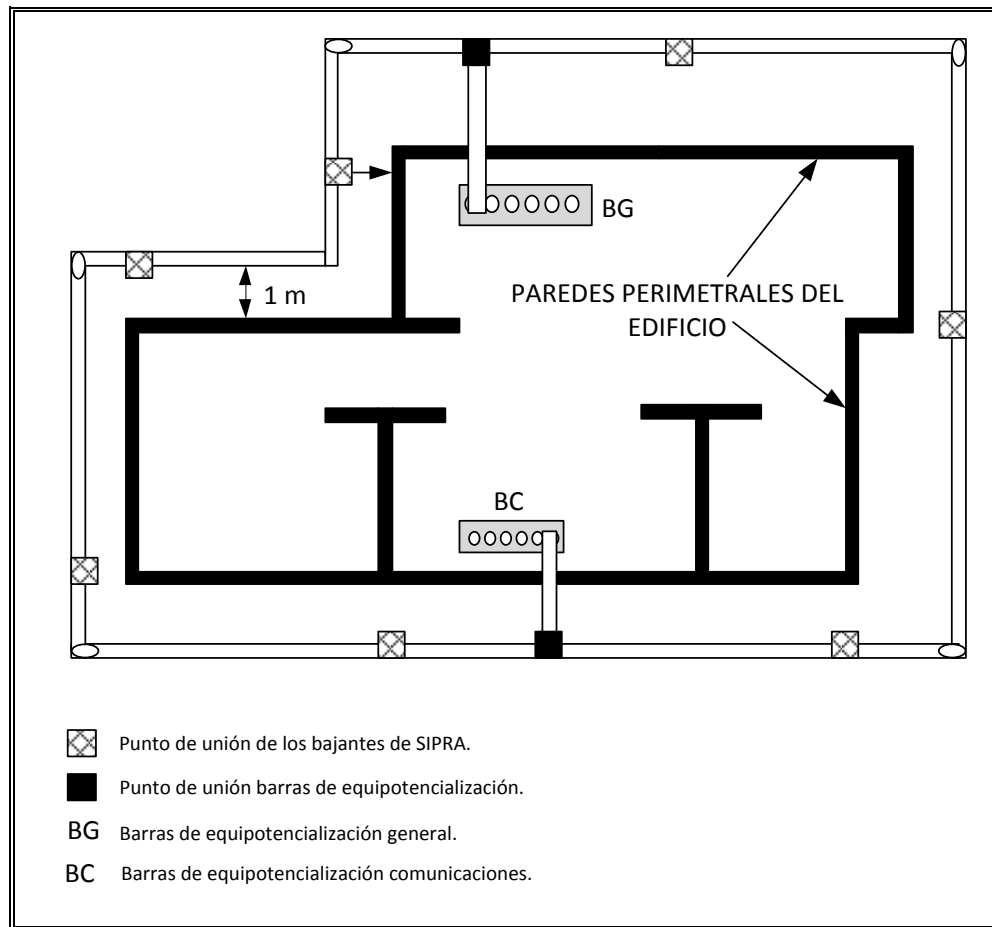
- ✓ Sistemas de captación enmallados (ver Anexo C de la NTC 4552-3:2008).
- ✓ Estructuras con peligro de incendio y explosión (ver capítulo 5.4.2 de la NTC 4552-3:2008).
- ✓ Terrenos de roca sólida al descubierto.
- ✓ Estructuras que usan material aislante en ladrillo o madera sin cimentación de acero reforzado

NOTA: Para información del área a encerrar por el anillo conductor externo, y la necesidad de adicionar electrodos horizontales o verticales, refiérase a la norma NTC 4552-3:2008 en el capítulo 5.4.

Se recomienda que el número de electrodos no sea menor que el número de bajantes, con un mínimo de 2. Los electrodos adicionales deben ser conectados al anillo de puesta a tierra en los puntos en donde las bajantes son conectados a éste y, en lo posible, deben ser equidistantes.

Para este tipo de configuración, el anillo perimetral se debe situar a una profundidad de al menos, 0,5 metros y separado de la fachada del edificio mínimo 1 metro. Desde este anillo se deben prever las conexiones necesarias para los bajantes y para las barras de equipotencialización, como se muestra esquemáticamente en la figura 11 [21].

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.



**Figura 11. Esquema de anillo perimetral de tierra tipo B.**

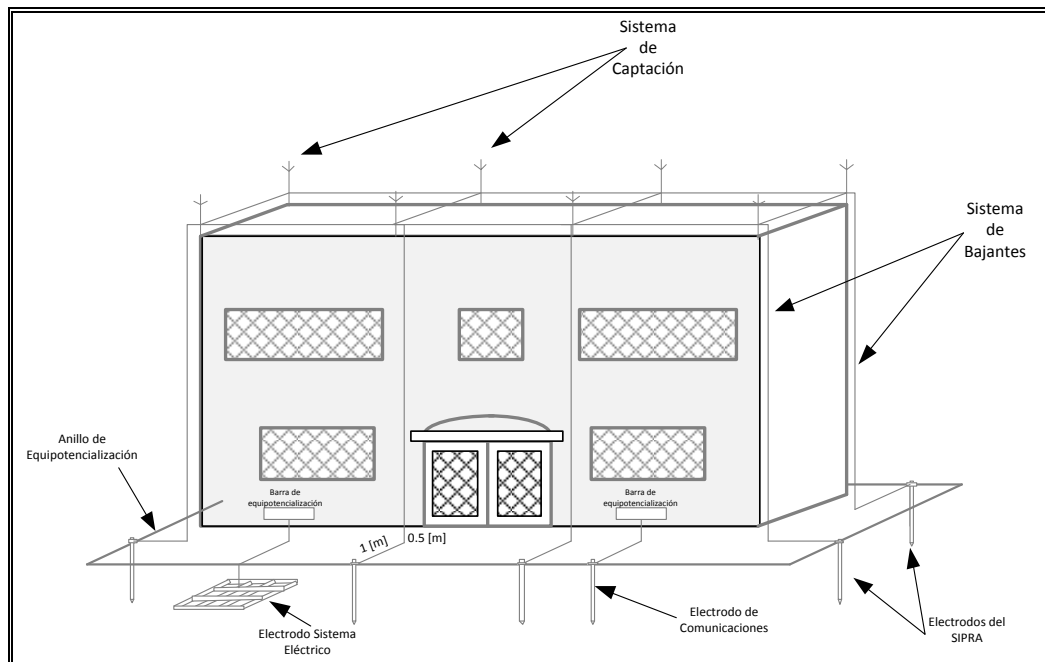
**Fuente: [21].**

Así mismo, las puestas a tierra tipo B también realizan la función de igualar el potencial entre los bajantes a nivel de tierra. Debido a que los bajantes del sistema de protección externo presentan diferentes potenciales por una distribución desigual de las corrientes del rayo, como sucede en sistemas con múltiples puntas de captación y bajantes, pues cada camino por el que se drena la corriente mostrará un valor de impedancia diferente y de esta manera una caída de potencial diferente.

En resumen, la norma NTC 4552-3:2008 recomienda que en estructuras provistas de aparatos eléctricos no sensibles como en el caso de instalaciones eléctricas

*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.*

residenciales, puede ser usada una disposición de puesta a tierra tipo A, pero en sistemas de equipos sensibles o sistemas electrónicos, como el caso de un centro de comunicaciones o procesamiento de datos, se recomienda una disposición de tierra tipo B, pues esta provee una mayor equipotencialización de la instalación debido a su construcción. La figura 12, muestra un esquema general de la configuración tipo B en una edificación.



**Figura 12. Esquema general de la configuración tipo B.**

**Fuente: [20].**

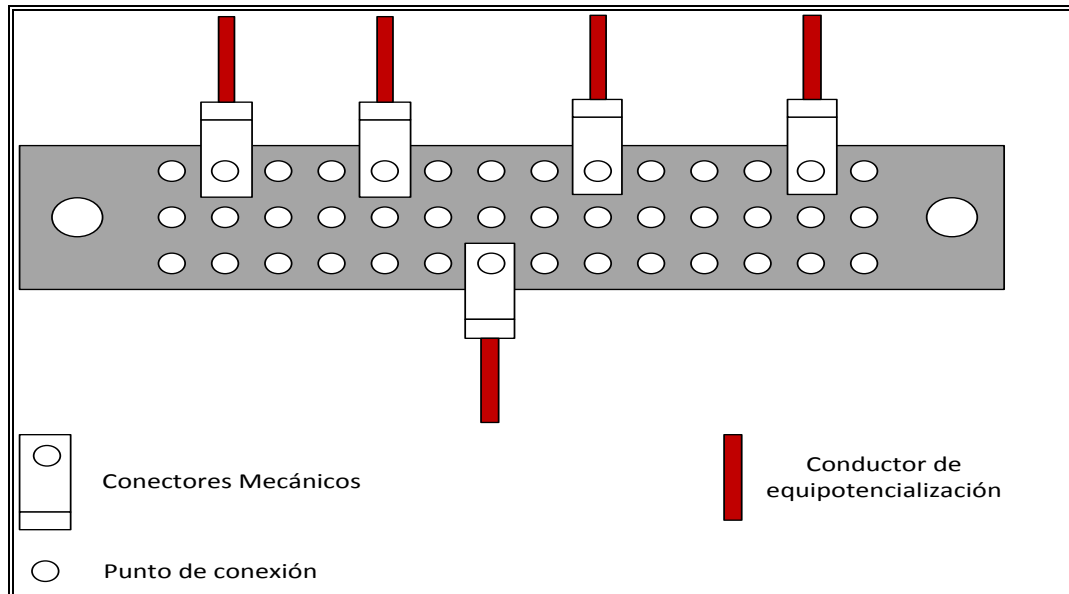
### **3.1.6. Barra de equipotencialización [17].**

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. Para instalaciones con abundante equipamiento sensible, como en el caso de sistemas de comunicación, se recomienda tener una barra de equipotencialización para los

*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.*

equipos eléctricos en general y otra exclusiva para los equipos de comunicaciones como se muestra en las figuras 11 y 12.

En la figura 13 se muestra una representación de dicha barra.



**Figura 13. Barra de equipotencialización.**

**Fuente: [20].**

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

- ✓ Todos los servicios conductivos que entran en una ZPR<sup>36</sup> (directamente o mediante el uso adecuado de DPS).
- ✓ El conductor de protección a tierra (PE).
- ✓ Los componentes metálicos del sistema interno (ejemplo gabinetes, recintos, estantes).

---

<sup>36</sup> Zona de protección contra rayos. "Lightning Protection Zone" en idioma inglés.

- ✓ El blindaje magnético de las ZPR en la periferia y dentro de la estructura.

La figura 14, 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:

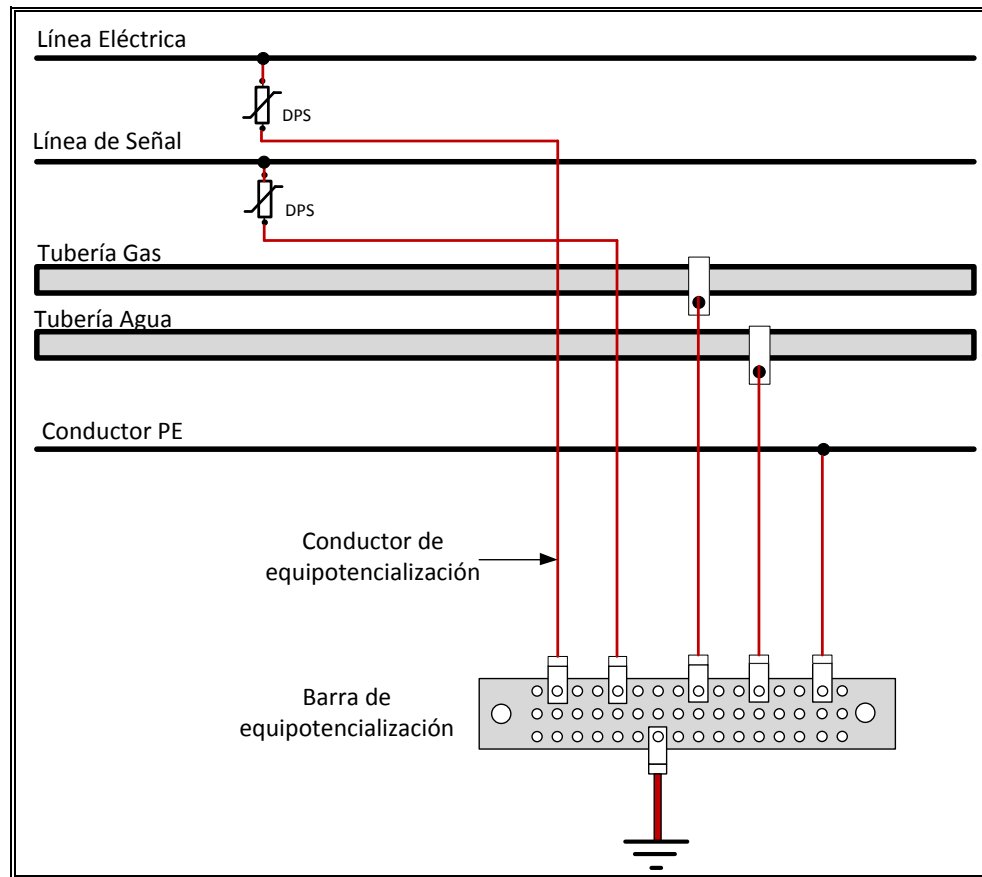
- ✓ La base para todas las medidas de equipotencialización es una baja impedancia en la red de equipotencialización.
- ✓ Las barras de equipotencialización deberán ser conectadas al sistema de puesta a tierra por el camino más corto posible.
- ✓ El material y las dimensiones de la barra de equipotencialización y de los conductores de interconexión deberán cumplir con la tabla 3.
- ✓ Los DPS's<sup>37</sup> 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.

Nota: El área de los bucles producidos por el enrutamiento de las líneas (ver literal 3.2.5), es directamente proporcional a la sobretensión generada al incidir un campo magnético sobre la instalación.

---

<sup>37</sup> Dispositivo de protección contra sobretensiones y/o sobrecorrientes. "Surge protective device" SPD en idioma inglés.

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.



**Figura 14. Arreglo de red de equipotencialización.**

**Fuente: [19].**

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.

### **3.1.7. Equipotencialización en la frontera de una zona de protección contra el rayo.**

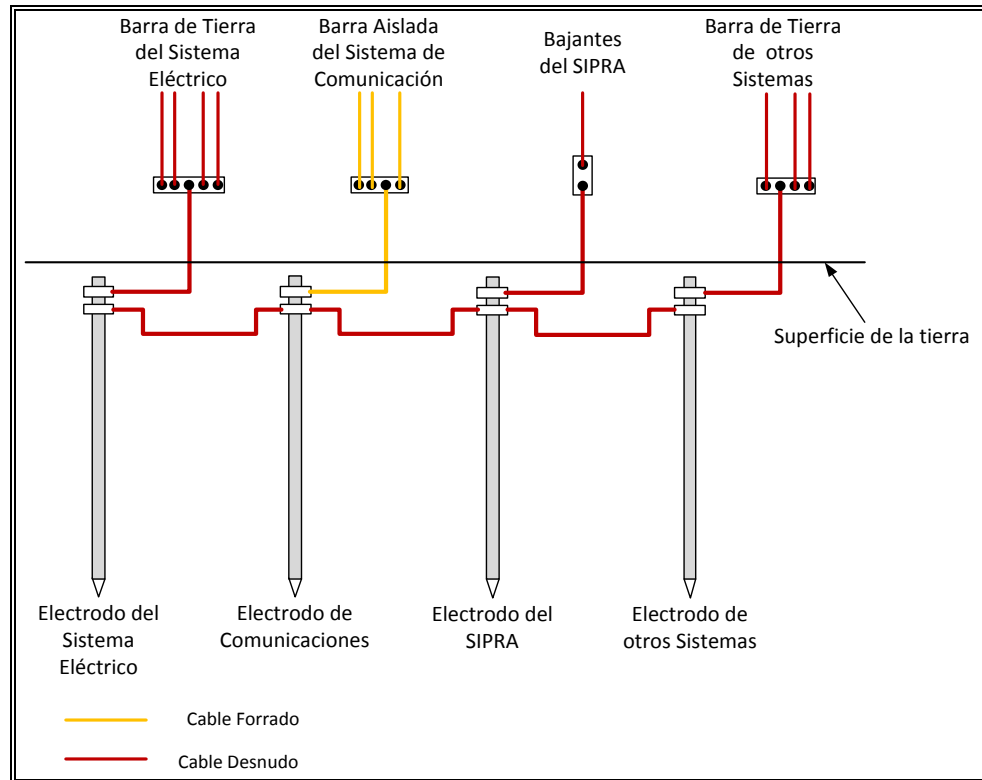
Cuando una ZPR es definida, deberá proveerse la equipotencialización para todas las partes metálicas y servicios (ejemplo, tuberías metálicas, líneas eléctricas o de señal) que penetran en la frontera de la ZPR.

NOTA: La equipotencialización de los servicios que entran a la ZPR 1 deberán ser discutidos con los diferentes operadores de red 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 instalaran 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 15. 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 15.

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.



**Figura 15. Equipotencialización en anillo de los electrodos de puesta a tierra.**

**Fuente: [20].**

La unión equipotencial de los DPS's<sup>38</sup> es siempre requerida a la entrada de las ZPR's<sup>39</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>40</sup> de la ZPR, donde pueden ser utilizados para interconectar varias

<sup>38</sup> Dispositivo de protección contra "surges". "Surge protective device" SPD en idioma inglés.

<sup>39</sup> Zonas de protección contra rayos. "Lightning Protection Zones" en idioma inglés.

<sup>40</sup> "Boundary" en idioma inglés.

ZPR del mismo orden en una ZPR conjunta, o extender una ZPR hasta la siguiente frontera.

### **3.1.8. Recomendaciones para la Red de Equipotencialización (RE) en edificaciones.**

A continuación se presenta una recopilación de las principales recomendaciones a tener en cuenta para la RE en edificaciones como producto de la experiencia internacional:

- ✓ En grandes edificios varias BE's<sup>41</sup> pueden ser usadas, siempre y cuando ellas se interconecten.
- ✓ Es importante tener en cuenta que las conexiones muy largas pueden formar grandes lazos que pueden conducir corrientes y tensiones inducidas. Para minimizar estos efectos, se debe considerar la interconexión enmallada de estas conexiones, la estructura y el terminal de puesta a tierra.
- ✓ Las estructuras de acero reforzado en concreto puede ser usado para la BE. En este caso, una red adicional enmallada de uniones soldadas o aseguradas debe ser instalada en los muros, para que las BE puedan ser conectadas a los conductores por soldadura.
- ✓ Todas las partes conductoras internas de tamaño significativo, tales como los relés del ascensor, grúas, pisos metálicos, tuberías y servicios eléctricos, deben ser unidas a la BE más cercana por medio de un conductor corto a nivel de tierra. Las BE's y las otras partes de la instalación deben resistir las posibles corrientes del rayo.

---

<sup>41</sup> Barras de equipotencialización.

- ✓ Cuando las partes conductoras externas, como las líneas de los sistemas de energía y comunicaciones tienen entradas diferentes, se necesita instalar varias BE's, y estas deben ser conectadas tan cerca como sea posible al terminal de puesta a tierra.
- ✓ Cuando se utiliza un terminal de puesta a tierra tipo A como parte del SIPRA, las BE's se deben conectar a los electrodos individuales y deben ser conectados por un anillo conductor interno en forma de un semi-anillo.
- ✓ Para los servicios que entran en forma aérea, las BE's se deben conectar al anillo horizontal interno o externo. Si es aplicable, unirlos a las bajantes y al acero reforzado metálico de la estructura. El anillo conductor debe ser conectado al acero de refuerzo y a otros elementos metálicos de la estructura.
- ✓ En el caso de estructuras industriales, las partes con continuidad eléctrica de la estructura y el techo pueden ser usadas como componentes naturales del sistema de protección externa. Las partes conductoras de la estructura, y los equipos instalados allí dentro, pueden ser conectadas a la RE<sup>42</sup>, al igual que los conductores del servicio de energía eléctrica y equipos de comunicación. Para electrodos ubicados dentro de la estructura se debe tener especial cuidado para el control de las tensiones de paso. Las medidas incluyen la conexión al acero de refuerzo en concreto, a los electrodos locales de puesta a tierra o a los cimientos de la estructura cuando éstos están hechos en acero de refuerzo en concreto.
- ✓ Para edificaciones con una altura mayor a 23 m, se recomienda repetir la RE<sup>43</sup> a un nivel de 20 m y cada 20 m por encima de éste. Sin embargo, en cualquier caso se debe mantener la distancia de separación. Esto significa que, en la parte baja de la estructura, los bajantes externos, los bajantes

---

<sup>42</sup> Red de Equipotencialización. "Bonding Network" en idioma inglés.

<sup>43</sup> Red de equipotencialización

internos y las partes metálicas deben ser unidas. Los conductores vivos deben ser unidos vía DPS.

- ✓ En edificios o instalaciones diseñados para centros de cómputo, edificios de comunicaciones y otras estructuras que requieren de un bajo nivel de IER<sup>44</sup> para los efectos de inducción, el anillo conductor se debe conectar al acero de refuerzo típicamente cada 5 m.
- ✓ Para las uniones de los servicios externos en edificios con concreto reforzado que contienen grandes instalaciones de comunicación y cómputo o estructuras donde la CEM<sup>45</sup> demandada son severas, se debe usar una platina de tierra con múltiples conexiones al acero de refuerzo metálico u otros elementos metálicos de la estructura.

### **3.2. BLINDAJE MAGNÉTICO Y ENRUTAMIENTO DE LÍNEAS [17].**

#### **3.2.1. Información general.**

Los blindajes magnéticos<sup>46</sup> son usados para la atenuación del acoplamiento directo de perturbaciones electromagnéticas radiadas desde el exterior al interior de los circuitos electrónicos e inversamente mediante la atenuación de las perturbaciones radiadas de los circuitos internos hacia el exterior, contribuyendo de esta manera a la CEM de la instalación. Entre los ejemplos de estructuras blindadas se encuentran: las instalaciones de telecomunicaciones y de radio, instalaciones de prueba y laboratorios, instalaciones de metrología, instalaciones médicas para la terapia y el diagnóstico e instalaciones de cómputo, entre otras.

---

<sup>44</sup> Impulso Electromagnético del Rayo. LEMP-“Lightning Electromagnetic Impulse” en idioma inglés.

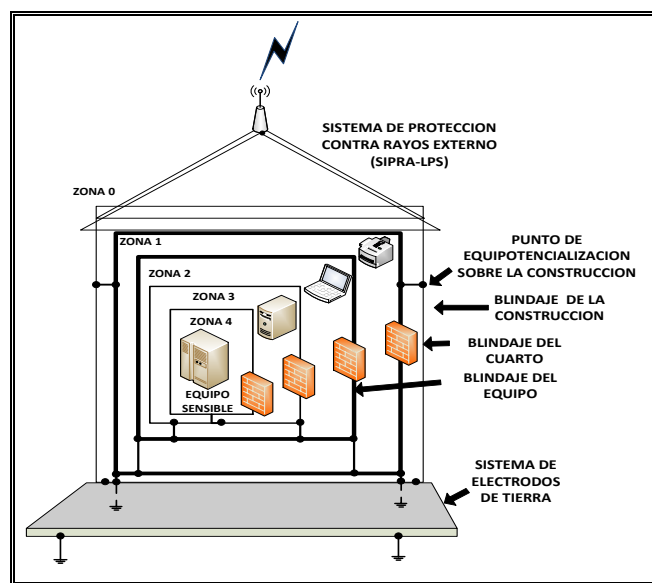
<sup>45</sup> Compatibilidad Electromagnética.

<sup>46</sup> “Magnetic Shielding” en idioma inglés.

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.

En la figura 16 se aprecian los blindajes definidos mediante los fronteras de las diferentes zonas, junto con las interfaces de aislamiento (dispositivos) representadas a través de los muros encargados de limitar los efectos de las sobretensiones y/o sobrecorrientes (“surges”) conducidas sobre las líneas que entran en las ZPR.

El enrutamiento de líneas<sup>47</sup> es la forma en la cual se realiza la distribución de los conductores dentro de una instalación. Por lo general en una instalación se utilizan circuitos separados para las líneas eléctricas y las líneas de datos.



**Figura 16. Topología del concepto de blindajes con interfaces en puntos de penetración.**

**Fuente: [6].**

### 3.2.2. Blindaje espacial.

<sup>47</sup> “Line Routing” en idioma inglés.

Los blindajes espaciales<sup>48</sup> definen las zonas de protección que pueden cubrir toda la estructura o parte de ella, una sola habitación o solo la carcasa del equipo<sup>49</sup>. Estos pueden ser en forma de cuadrícula<sup>50</sup>, blindajes de metal continuo o compuesto por los “componentes naturales<sup>51</sup>” de la misma estructura.

Los blindajes espaciales son aconsejables donde sea más prácticos y útiles para proteger una zona definida de la estructura en vez de algunas piezas individuales de los equipos. Los blindajes espaciales deben ser previstos en la etapa de planeación inicial de una nueva estructura o un nuevo sistema eléctrico y electrónico. La aplicación de estos blindajes en instalaciones existentes, conlleva a altos costos de dinero y grandes dificultades técnicas.

### **3.2.3. Blindaje de líneas internas.**

El blindaje puede estar restringido al cableado y equipo de un sistema que está protegido. El blindaje metálico de cables, los ductos metálicos cerrados portacables y la carcasa metálica del equipo son utilizados para éste propósito.

### **3.2.4. Blindaje de líneas externas.**

El blindaje de las líneas externas que entran a la estructura incluye cables blindados, ductos metálicos portacables y ductos portacables en concreto

---

<sup>48</sup> “Spatial Shielding” en idioma inglés.

<sup>49</sup> “Equipment Enclosure” en idioma inglés.

<sup>50</sup> “Grid-Like” en idioma inglés.

<sup>51</sup> “Natural components” en idioma inglés.

interconectado con acero reforzado. El blindaje de las líneas externas es útil pero no es responsabilidad del diseñador de la instalación eléctrica, dicha medida de protección (ya que el proveedor de la red es normalmente el dueño de las líneas externas).

### **3.2.5. Enrutamiento de las líneas internas [17], [22].**

El enrutamiento<sup>52</sup> adecuado de las líneas internas minimiza los bucles de inducción y reduce la creación de picos de tensión internamente en la estructura. El área de los bucles<sup>53</sup> puede ser minimizada por el enrutamiento de los cables cerca a los componentes naturales de la estructura que se han conectado a tierra y/o por enrutamiento de las líneas eléctricas junto con las de señal. Puede ser necesaria cierta distancia entre las líneas eléctricas y las líneas de señal sin blindaje para evitar interferencia.

Una regla fundamental para mitigar las sobretensiones que se presentan por acoples inductivos en el caso de campos magnéticos generados por corrientes de rayo, es la reducción de lazos de inducción.

En las figuras de la 17 a la 22, se representa esquemáticamente un cable que une un generador de sobretensiones “V” (sobretensión provocada por una descarga atmosférica o por una maniobra en el sistema eléctrico) con un receptor “R” (correspondiente a la instalación eléctrica de uso final).

En la figura 17, se forma un lazo de inducción que en principio no está definido, ya que el camino de retorno de la corriente “i” a través del sistema de masas depende

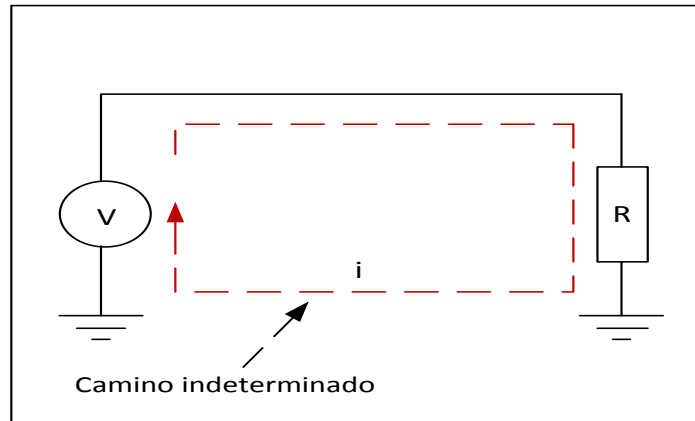
---

<sup>52</sup> “Routing” en idioma inglés.

<sup>53</sup> “Loops” en idioma inglés.

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.

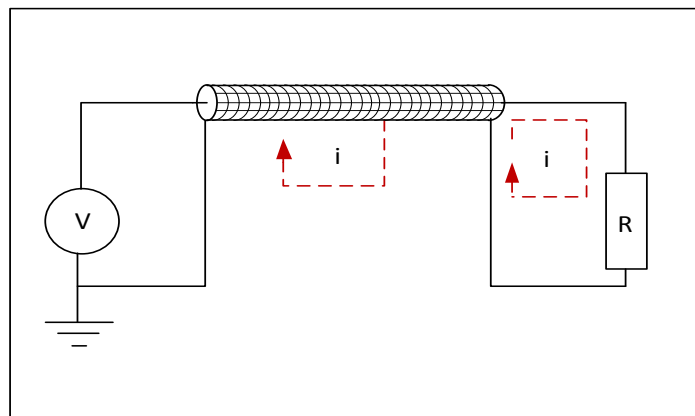
de varios factores como la frecuencia de la señal, la existencia de otras corrientes que circulen por las masas, etc.



**Figura 17. Lazo de inducción entre generador de sobretensiones y receptor.**

**Fuente: [22].**

Si la unión entre el generador de sobretensiones y el receptor se hace mediante un cable coaxial (ver la figura 18) y no se consideran por el momento las conexiones de masa, el campo neto exterior creado por el cable es cero, ya que el campo generado por la corriente de ida se anula con el generado por la corriente de regreso y el propio cable es además inmune a influencia externas.



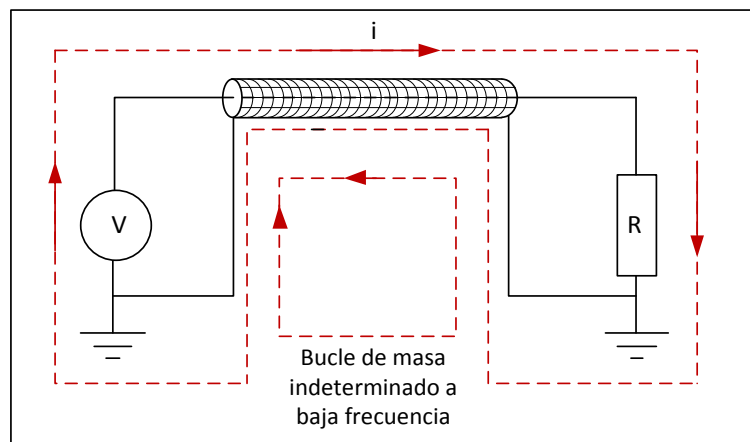
**Figura 18. Circuito interconectado mediante cable coaxial sin conexión a masa.**

**Fuente: [22].**

Sin embargo, si se consideran las conexiones a masa, como en la figura 19, no toda la corriente de retorno circula por el cable. El lazo de corriente seguirá el camino de menor impedancia, de tal manera que a altas frecuencias, como en el caso de corrientes de rayo, la inductancia del lazo externo aumenta debido a su mayor área y prácticamente toda la corriente retornará por el cable blindado. Este será, entonces, efectivo contra la generación y recepción de interferencias.

No obstante, a bajas frecuencias, en las que la inductancia es menos significativa, la distribución es indeterminada y depende de nuevo de la impedancia de la línea de masa, como en el caso anterior presentado en la figura 17. Es decir, a frecuencias bajas la corriente retorna por el plano de masa y no por el blindaje, por tanto este no es efectivo.

De una manera práctica, se puede afirmar que la corriente retorna por el blindaje si la frecuencia es mayor a 5 veces la frecuencia de corte del blindaje.

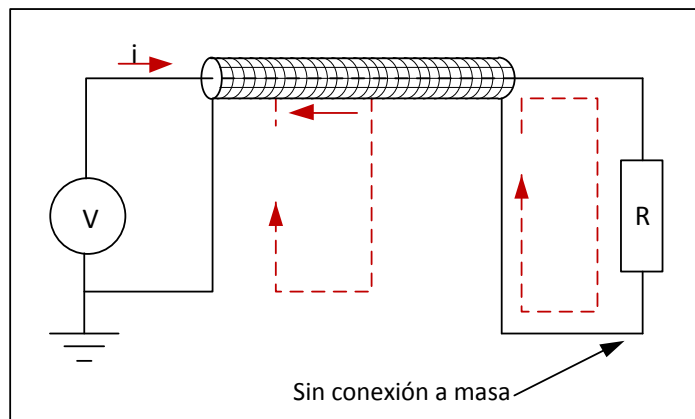


**Figura 19. Circuito interconectado mediante cable coaxial con conexión a masa.**

**Fuente: [22].**

En la figura 20 se presenta que a bajas frecuencias, el blindaje no debe ser uno de los conductores de señal y uno de sus extremos debe quedar aislado de masa. Al desconectar la masa en uno de los puntos del blindaje, el circuito se vuelve efectivo frente a campos magnéticos ya que toda la corriente retorna por él y no existe bucle de masa.

Del mismo modo en la figura 21 se presenta el caso en que el blindaje no se utiliza como conductor, conectándose en un solo punto. En este caso se forma de nuevo un lazo de corriente que no está definido a través del conductor central y la conexión entre las masas. Esta conexión tiene interés como protección electrostática frente a campos eléctricos.

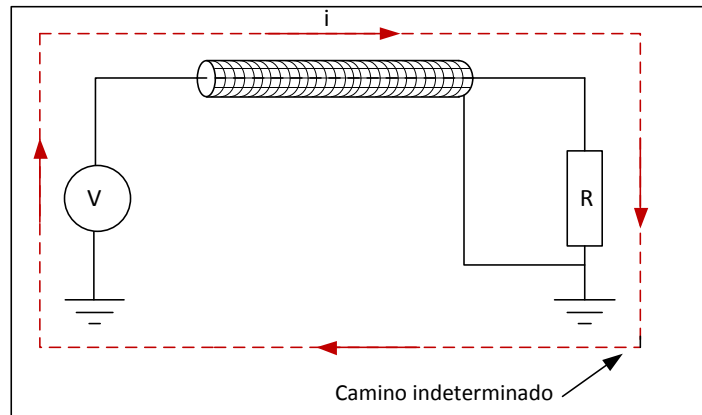


**Figura 20. Blindaje efectivo frente a campos magnéticos sin conexión a masa.**

**Fuente: [22].**

Como regla general, a frecuencias menores a 1 MHz, los blindajes deben conectarse a masa solamente en un extremo y no utilizarse como conductores. A frecuencias superiores o donde la longitud del cable exceda de  $1/20$  la longitud de onda, usualmente es necesario conectar a masa el blindaje en más de un punto para garantizar el potencial cero.

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.



**Figura 21. Blindaje efectivo frente a campos magnéticos con conexión a masa.**

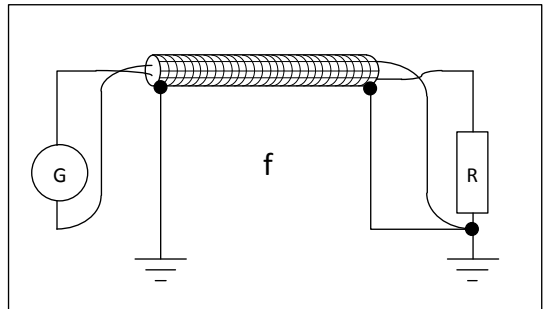
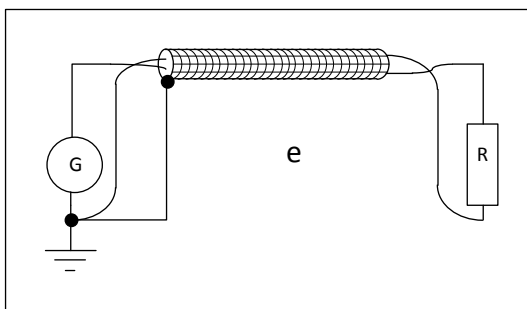
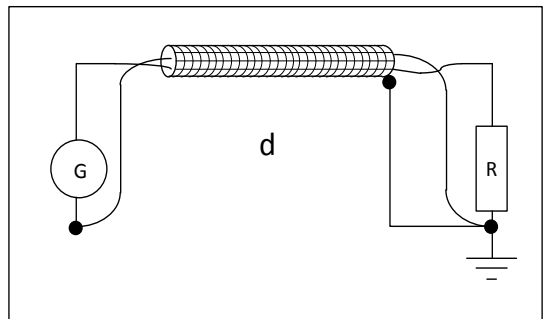
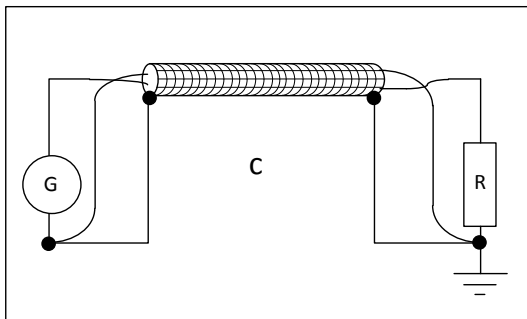
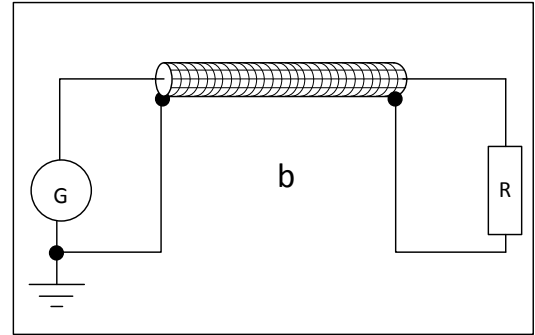
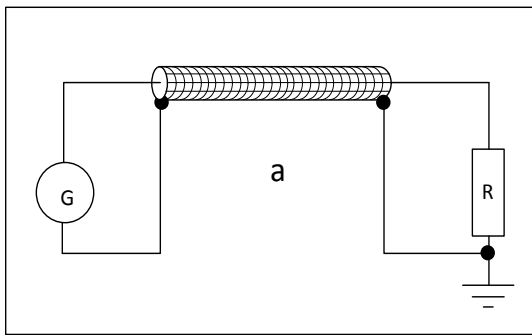
**Fuente: [22].**

Con respecto a la protección frente a campos electromagnéticos externos, se presentan en la figura 22 varias formas de conectar un cable blindado, ordenadas de mayor a menor protección general, siendo la menor la conexión m de la figura 22, que es equivalente a no tener blindaje. Esta comparación se hace con base en una frecuencia de 50 kHz, que se supone 5 veces superior a la frecuencia de corte de los blindajes.

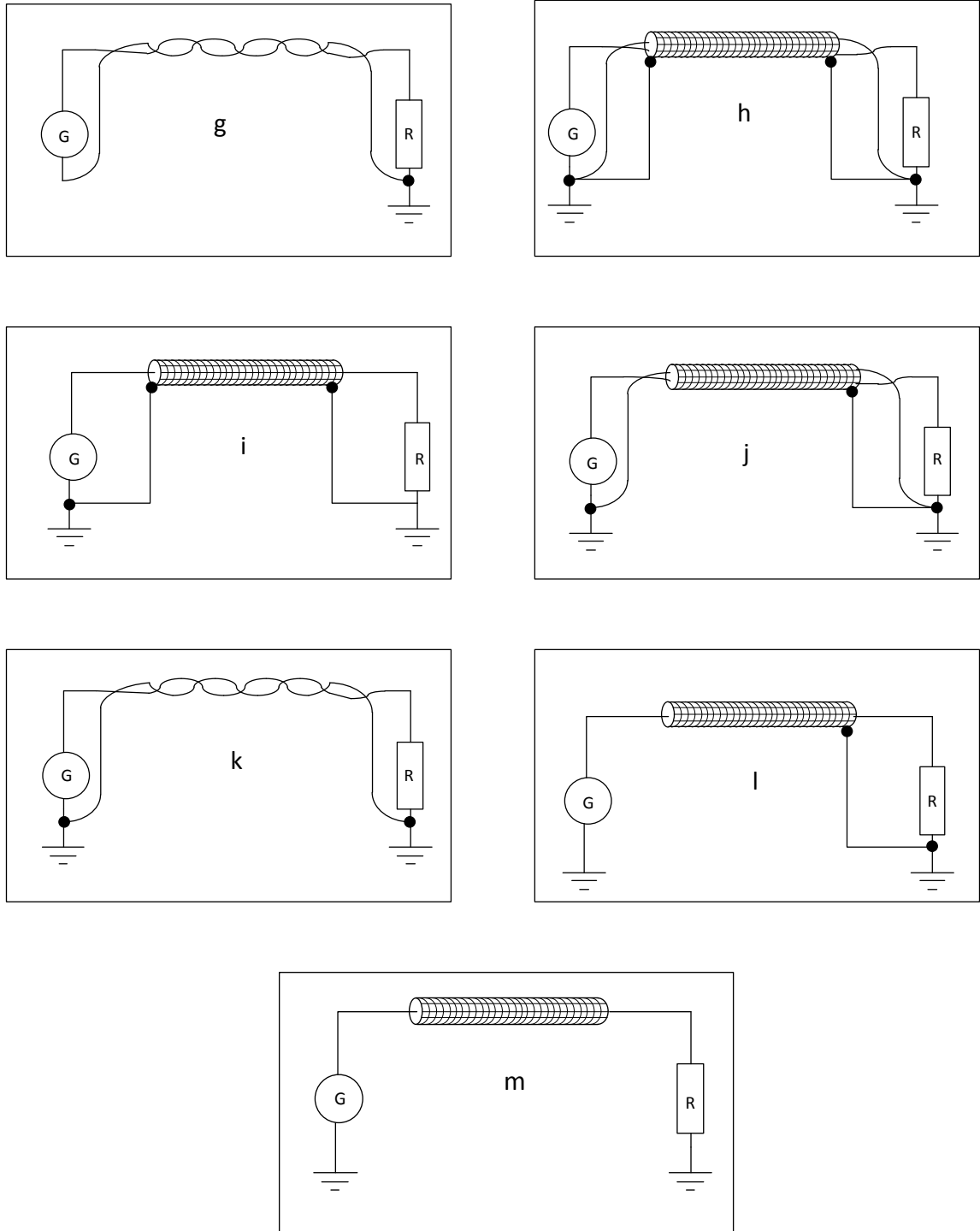
Todas las conexiones de la h a la m de la figura 22 presentan una doble conexión a masa, por lo que no son muy efectivas contra campos magnéticos, pues existe la posibilidad de que parte de las corrientes de retorno circulen por un lazo de masa no definido, en especial a bajas frecuencias. La conexión (l) de la figura 22 tiene un solo extremo de blindaje a masa y puede ofrecer protección electrostática, pero no magnética.

*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.*

El uso de un par trenzado como en la conexión (k) de la figura 22 podría dar una mejor protección magnética, pero lo impide el lazo formado por la doble conexión de masa.



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.



**Figura 22. Formas de conexión de un cable blindado.**

**Fuente: [22].**

La conexión (g) es similar a la conexión (k) pero con un solo punto de conexión a masa. La protección se mejora significativamente y los campos magnéticos producidos por lazos de inducción adyacentes en el par trenzado se compensan, pues las corrientes de ida y retorno son idénticas. Sin embargo, la ausencia de blindaje hace que se acople el campo eléctrico. Esto se soluciona en las conexiones (d), (e) y (f) con blindaje alrededor del par trenzado; aunque la conexión (f) es la menos efectiva debido a la doble conexión de masa del blindaje. En general, resulta preferible la conexión (d) porque suele ser mejor conectar en el lado del receptor que en el de emisor.

Las conexiones (a) y (b) son las que proporcionan la mejor protección magnética, debido al área muy pequeña del lazo de masa que proporciona el cable coaxial. Esto no es necesariamente cierto ya que se puede incrementar el número de vueltas por unidad de longitud en los pares trenzados y reducir así notablemente la captación. Estas conexiones (a) y (b) también proporcionan una aceptable protección electrostática, aunque tienen el inconveniente que utilizan el blindaje como conductor. La conexión (c) tiene el inconveniente de que la doble conexión del blindaje puede hacer que se capten en él sobretensiones de interferencia.

Como regla general la conexión más recomendable es la (d), porque combina las ventajas de los pares trenzados con las del apantallamiento electrostático y evitando que el blindaje sea un conductor del circuito.

En resumen, el blindaje de los conductores puede reducir la influencia de un campo magnético que incide sobre éstos, dependiendo de la frecuencia de dicho campo y de la forma en cómo se realiza el enrutamiento de los conductores en la instalación. Se debe tener en cuenta que a mayor frecuencia del campo magnético, la efectividad de dichos blindajes sobre los conductores disminuye.

### **3.3. ZONAS DE PROTECCIÓN Y SISTEMA COORDINADO DE DPS [17].**

#### **3.3.1. Información general.**

Las zonas de protección corresponden a la división que se le da al entorno, en donde se encuentra una instalación eléctrica, teniendo en cuenta los posibles daños causados por impulsos electromagnéticos tipo rayo a los equipos eléctricos y electrónicos en el interior de ésta. Por lo tanto, los sistemas internos deben estar provistos de un sistema coordinado de DPS y otras medidas que garanticen el buen funcionamiento y eviten fallas.

De acuerdo a la severidad del IER<sup>54</sup> se prevé que existen diferentes clasificaciones, las cuales permiten garantizar la protección, el funcionamiento de dichos equipos y con esto la CEM presente en la instalación. Para alcanzar éste propósito se utilizará el concepto de zonas de protección contra el rayo (ZPR) respecto a los efectos derivados del IER.

#### **3.3.2. Dispositivos de protección contra “surges” (DPS) [23].**

Los dispositivos de protección contra “surges” (DPS) buscan mitigar las interferencias electromagnéticas, cuyas componentes básicas son para control de tensión y corriente: varistores, diodos supresores y vía de chispas. Los DPS son dispositivos que intentan limitar las sobretensiones transitorias y desviar las sobrecorrientes. Dichos dispositivos contienen al menos un componente no lineal. La función es proteger contra sobretensiones y sobrecorrientes a los equipos eléctricos o electrónicos e instalaciones, así como para establecer conexiones equipotenciales.

---

<sup>54</sup> Impulso electromagnético del rayo.

Para la selección de una protección contra “surges”, es importante que la protección seleccionada cumpla con los siguientes requerimientos:

- ✓ **Supervivencia:** Es vital que la protección escogida sea capaz de sobrevivir al caso transitorio más desfavorable esperado en su punto de instalación. Debido a que los rayos presentan múltiples eventos, la protección no debe fallar después del primer transitorio.
- ✓ **Control transitorio:** La protección debe ser capaz de controlar el transitorio a un nivel por encima del nivel de inmunidad del equipo a proteger. Por ejemplo, si una computadora tiene un nivel de inmunidad ( $U_W$ ) de 500 V, entonces el nivel de protección de tensión ( $U_P$ ) será 600 V (o un poco menor).
- ✓ **Compatibilidad electromagnética:** La protección no deberá interferir con la operación normal del equipo a proteger. Los sistemas de comunicación e intrínsecamente los equipos de seguridad son particularmente susceptibles a este tipo de problemas.

### **3.3.3. Clasificación de un DPS [23].**

Los DPS se clasifican por:

- ✓ Números de puertos: Uno o dos.
- ✓ Topología de diseño: Operado por tensión (vía de chispas) o limitador de tensión o la combinación de ambos.
- ✓ Clase: I, II o III.
- ✓ Localización: Interior o exterior.
- ✓ Accesibilidad: Accesible o no accesible.
- ✓ Método de montaje: Fijo o portátil.

*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.*

- ✓ Desconectador: Ubicación (externo, interno, ambos externo e interno o ninguno) y función (térmica, corriente de fuga, sobrecorriente).
- ✓ Protección de sobrecorriente de respaldo: Especificada o no.
- ✓ Grado de protección: Código IP.
- ✓ Rango de temperatura.

De acuerdo con su aplicación [23], los DPS's pueden ser clasificados en:

- ✓ DPS para sistemas de distribución de energía eléctrica en clases I, II y III y rangos de tensión hasta 1000 voltios.
- ✓ DPS para sistemas electrónicos en redes de telecomunicación y procesamiento de señales con tensiones nominales hasta 1000 voltios AC (r.m.s) y 1500 voltios DC contra efectos directos o indirectos de impactos de rayos y otros transitorios.
- ✓ Aislamiento tipo vía de chispas para sistemas de tierra o para conexiones equipotenciales.

La tabla 2 describe las diferentes clases de DPS's, que se deben tener en cuenta en una instalación eléctrica.

Descripción	Clase	Descripción
Descargadores de corriente del rayo y descargadores combinados de sobretensión y corriente del rayo	Clase I	<p><b><u>Descargadores de corriente del rayo:</u></b> Se utilizan para protección de instalaciones y equipos por interferencias debidas a impactos de rayo directos o cercanos a la instalación a proteger (ZPR 0). Se prueban con corrientes de choque con forma de onda 10/350 <math>\mu\text{s}</math><sup>55</sup>, según la norma IEC 61643-1.</p> <p><b><u>Combinación de descargadores de corriente del rayo y descargadores de sobretensión:</u></b> Se utilizan para protección de instalaciones, equipos y dispositivos terminales por interferencias debidas a impactos de rayos directos o cercanos a la instalación a proteger.</p>
Descargadores de sobretensión para tableros de distribución e instalaciones fijas	Clase II	<p><b><u>Descargadores de sobretensión:</u></b> Se utilizan para protección de instalaciones, equipos y dispositivos terminales por impactos de rayo distantes, sobretensiones por maniobra así como para descargas electrostáticas (ZPR 1 y ZPR2). Se prueban con corrientes de choque con forma de onda 8/20 <math>\mu\text{s}</math>, según la norma IEC 61643-1</p>
Descargadores de sobretensión para tomacorrientes y equipos	Clase III	<p>Se prueban con corrientes de choque con forma de onda 8/20 <math>\mu\text{s}</math>, según la norma IEC 61643-1</p>

**Tabla 1. Clase de DPS.**

**Fuente: [23].**

---

<sup>55</sup> Formas de onda para evaluación de DPS. Para mayor información consulte la norma IEEE C62.41.2:2002 y la norma IEC 61643-1:1998.

### **3.3.4. Selección e instalación de un sistema coordinado de DPS [23].**

En sistemas eléctricos y electrónicos complejos, tanto las redes de energía como las de señal deben ser tenidas en cuenta para la selección e instalación de un adecuado sistema coordinado de DPS<sup>56</sup>.

La eficiencia de un sistema coordinado de DPS's, depende no solo de la selección adecuada de los DPS's sino también de su correcta instalación. Los 4 aspectos a ser considerados son los siguientes:

#### **3.3.4.1. Localización del DPS.**

La localización del DPS está principalmente afectada por:

- ✓ La fuente de daño<sup>57</sup> específica, por ejemplo impactos de rayo directos a la estructura (S1), impactos a tierra cercanos (S2), impactos directos a una línea (S3) o impactos cercanos a la línea (S4).
- ✓ El lugar más cercano para desviar la onda de corriente a tierra (tan cerca como sea posible al punto de entrada de la línea a la estructura).

Además, según su ventaja en la instalación se tienen dos criterios:

---

<sup>56</sup> "Coordinated SPD System" en idioma inglés.

<sup>57</sup> Para más información consulte la NTC 4552-1:2008.

*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.*

- ✓ El primer criterio a ser considerado es que mientras más cercano esté el DPS del punto de entrada de la línea, mayor es la cantidad de equipos en el interior de la estructura que serán protegidos por éste DPS (Ventaja económica).
- ✓ El segundo criterio es que mientras más cercano esté el DPS del equipo a ser protegido más efectiva será la protección (Ventaja técnica).

### **3.3.4.2. Conductores de conexión.**

Los conductores de conexión de los DPS deben tener la mínima sección transversal posible, de acuerdo con la tabla 2.

Componente de equipotencialización		Material	Sección transversal <i>mm</i> <sup>2</sup>
Barras de equipotencialización		Cu, Fe	50
Conductores de conexión entre las barras de equipotencialización y el sistema de puesta a tierra u otra barra equipotencial.		Cu	14
		Al	22
		Fe	50
Conductores de conexión entre instalaciones metálicas internas y barras equipotenciales		Cu	5
		Al	8
		Fe	16
Conductores de conexión para DPS	Clase I	Cu	5
	Clase II		3
	Clase III		1
NOTA: Otros materiales usados en vez del cobre deben tener una sección transversal equivalente.			

***Tabla 2. Materiales y dimensiones para los componentes de equipotencialización.***

***Fuente: [17].***

### **3.3.4.3. Distancia de protección debido al fenómeno oscilatorio.**

Durante la operación de un DPS la tensión entre los terminales del mismo es limitada al nivel de protección de tensión  $U_p$  en el punto de instalación. Si la longitud del circuito entre el DPS y equipo a proteger es demasiado larga, la propagación de las ondas puede producir un fenómeno oscilatorio. En caso de circuito abierto en las terminales del equipo a proteger, puede incrementar la sobretensión a  $2U_p$  provocando posible falla del equipo.

La distancia de protección contra oscilaciones  $d_{po}$  es la máxima longitud del circuito entre el DPS y el equipo para la cual la protección del DPS es aún adecuada. Esto depende de la tecnología del DPS. Las formas de instalación y la capacidad de la carga.

Si la longitud es menor a 10 metros o  $U_p$  es menor que  $U_w/2$ , la distancia de protección  $d_{po}$  puede ser despreciada. Donde  $U_w$  es el nivel de inmunidad del equipo (ver literal 3.3.2).

Cuando la longitud máxima entre el DPS y el equipo es mayor a 10 metros y  $U_p$  es mayor a  $U_w/2$ , la distancia de protección  $d_{po}$  puede ser estimada usando la siguiente expresión:

$$d_{po} = \frac{U_w - U_p}{k} (m)$$

Donde  $k= 25$  [V/m]

NOTA: Los parámetros fundamentales de un DPS como  $U_p, U_w$  entre otros, son definidos en el ANEXO C de éste documento como información complementaria.

#### **3.3.4.4. Distancia de protección de acuerdo con el fenómeno inductivo.**

Los impactos de rayo directos a la estructura o cercanos pueden inducir sobretensiones en los lazos formados entre el DPS y el equipo a ser protegido, las cuales se suman a  $U_p$  y por lo tanto reducen la eficiencia de protección del DPS. Las sobretensiones inducidas se incrementan con la dimensión del lazo y decrece con la atenuación del campo magnético.

La distancia de protección contra inducciones  $d_{pi}$  es la máxima longitud del circuito entre el DPS y el equipo para la cual la protección del DPS es aún adecuada (teniendo en cuenta el fenómeno de inducción).

En general, se debe minimizar el lazo formado entre el DPS y el equipo cuando el campo magnético generado por el rayo es demasiado alto. El campo magnético y el fenómeno de inducción puede ser reducido por:

- ✓ Blindajes espaciales de la estructura (ZPR 1) o de los espacios interiores (ZPR 2 o superiores) (ver literales 3.2.2 y 3.3.6).
- ✓ Blindaje de líneas (usando cables blindados o cables en tuberías metálicas).

Cuando estos blindajes son tomados en cuenta como una medida de protección en el diseño de una ZPR<sup>58</sup>, la protección en relación a la distancia del tramo del conductor debido a fenómenos inducidos, puede ser despreciada.

---

<sup>58</sup> Zona de protección contra rayos. "Lightning Protection Zone" en idioma inglés.

En condiciones extremas (grandes lazos de conductores no blindados y valores muy altos de inducciones por rayo) la distancia de protección contra inducción  $d_{pi}$  puede ser estimada usando la siguiente expresión:

$$d_{pi} = \frac{U_w - U_p}{h} \text{ (m)}$$

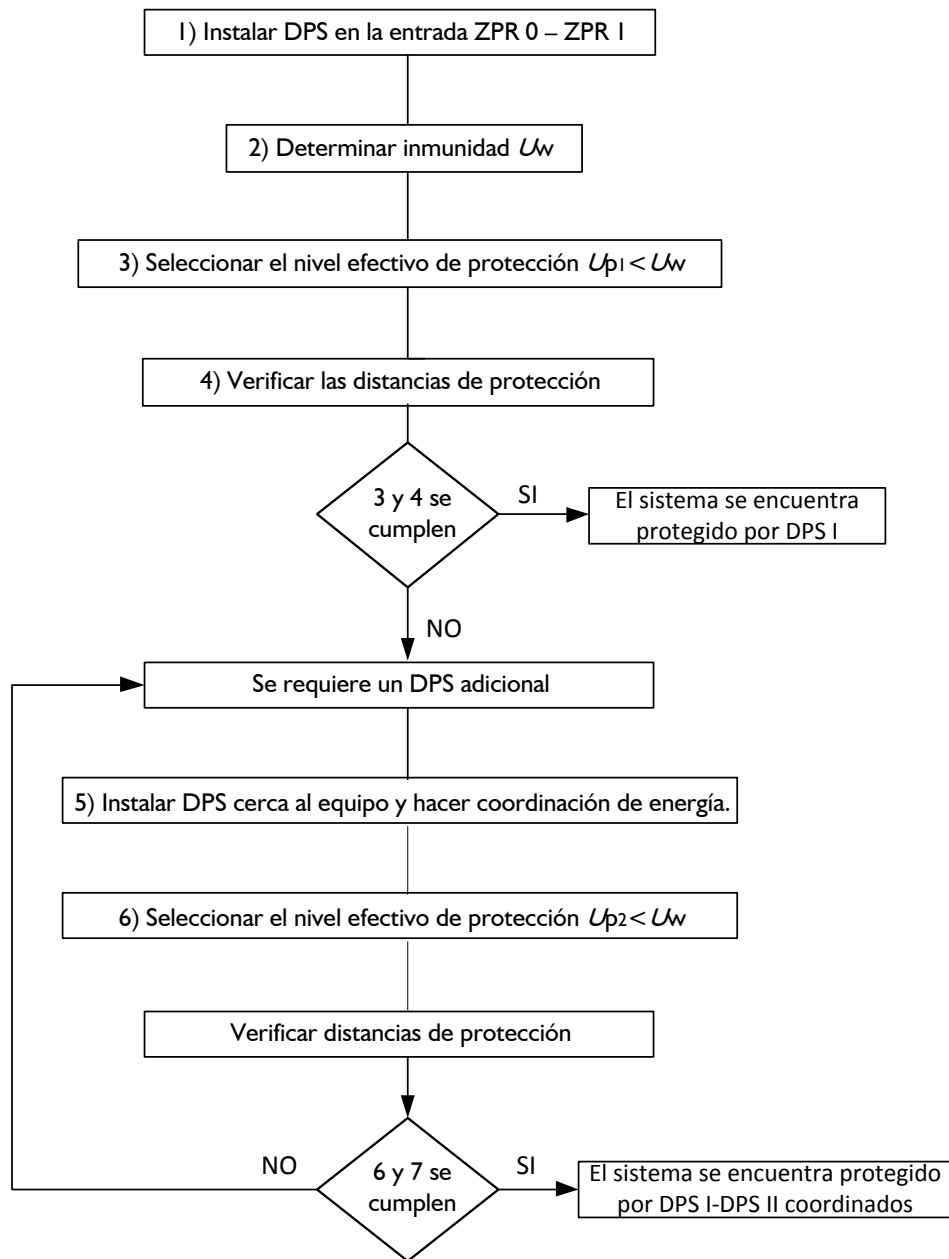
Dónde:

- ✓  $h = 300 * k_{S1} * k_{S2} * k_{S3}$ , (V/m) para impactos cercanos a la estructura.
- ✓  $h = 30000 * k_{S0} * k_{S2} * k_{S3}$ , (V/m) para impactos directos a la estructura (el peor caso).
- ✓  $k_{S0} * k_{S1} * k_{S2} * k_{S3}$ , son los valores reportados en la NTC 4552-2 llamados:
  
- ✓  $k_{S0}$ : Es un factor que tiene en cuenta la efectividad del blindaje debido al sistema de protección contra rayos en la frontera ZPR 0/1 y está dado por:  
  
 $k_{S0} = 0.06 * w^{0.5}$ , para mallas con un enmallado de  $w$  (m) ó  
 $k_{S0} = k_c$ , para sistemas de protección contra rayos sin mallas.
  
- ✓  $k_{S1}$ : Blindaje espacial debido al sistema de protección contra rayos u otro blindaje en la frontera ZPR 0 y ZPR1.
- ✓  $k_{S2}$ : Blindajes espaciales para las fronteras ZPR 1 y ZPR 2.
- ✓  $k_{S2}$ : Características de los conductores internos.

### **3.3.5. Procedimiento para la selección de un sistema coordinado de DPS [23].**

La figura 23, muestra un diagrama de flujo que facilita el entendimiento de cómo se debe proceder para la instalación de un sistema coordinado de DPS:

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.



**Figura 23. Procedimiento de instalación de un sistema coordinado de DPS's.**

**Fuente: [23].**

Los pasos que se siguen del flujo de carga de la figura 23, son los siguientes:

- 1) En la entrada de la línea a la estructura a instalar DPS 1 (en la frontera de ZPR 0 – ZPR 1, por ejemplo en los tableros principales).

- 2) Determinar la tensión soportable al impulso o nivel de inmunidad  $U_w$  del sistema interno a ser protegido.
- 3) Seleccionar el  $U_{p1}$  (nivel de protección del DPS clase I) para garantizar que el nivel efectivo de protección cumpla con  $U_{p1} \leq U_w$ .
- 4) Verificar los requisitos para  $d_{po/1}$  (distancia de protección contra oscilaciones del DPS 1) y  $d_{pi/1}$  (distancia de protección contra inducciones del DPS 1).

Si las condiciones 3 y 4 se cumplen a cabalidad, el equipo se encuentra protegido por el elemento DPS 1, de lo contrario se necesita un DPS II adicional:

- 5) Instalar DPS II más cerca al equipo (en la frontera de ZPR 2, por ejemplo en los tableros secundarios) y hacer la coordinación de energía con el elemento DPS1.
- 6) Seleccionar el  $U_{p2}$  (nivel de protección del DPS clase II) para garantizar que el nivel efectivo de protección cumpla con  $U_{p2} \leq U_w$ .
- 7) Verificar los requisitos para  $d_{po/2}$  (distancia de protección contra oscilaciones del DPS II) y  $d_{pi/2}$  (distancia de protección contra inducciones del DPS II).

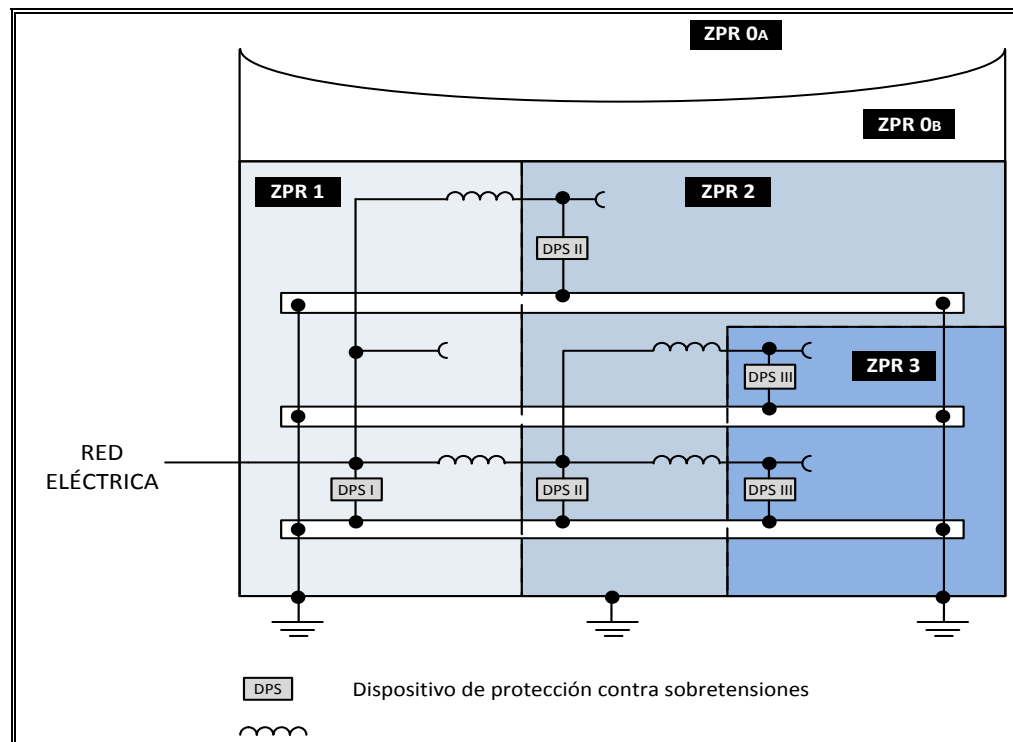
Si las condiciones 6 y 7 se cumplan a cabalidad, el equipo se encuentra protegido por la coordinación de los elementos DPS1 y DPS II. De lo contrario, es necesario instalar un tercer elemento de protección DPS cerca del equipo a ser protegido (por ejemplo en el punto de conexión del equipo) y hacer una coordinación de energía con los anteriores elementos DPS1 y DPS II.

Donde dos o más DPS sean instalados, uno después del otro en el mismo circuito, éstos deben estar coordinados de tal forma que se divida entre ellos la energía a ser manejada de acuerdo con su propia capacidad de absorción energética.

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.

Para una coordinación efectiva, se deben considerar las características de cada DPS (proporcionada por el fabricante), los posibles daños en el punto de instalación y las características de los equipos a ser protegidos.

La figura 24 muestra un ejemplo de la implementación de DPS en una instalación eléctrica de acuerdo con el concepto de zonas de protección contra rayo [24] (ver literal 3.3.6). Los DPS son instalados en secuencia y son escogidos de acuerdo con los requisitos en el punto particular de instalación.



**Figura 24. Ejemplo de aplicación de DPS en una instalación eléctrica.**

**Fuente: [23].**

También se hace necesario la coordinación energética para evitar sobreesfuerzos en los DPS de un sistema interno. Esta se logra si la porción de energía a la cual está sujeta cada DPS es menor o igual a su propia energía soportable. En sí, la

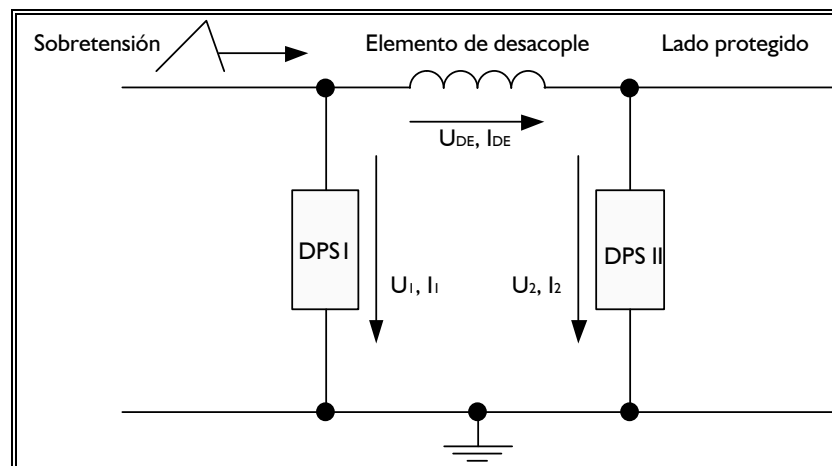
*Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en el diseño de sistemas de protección contra rayos y coordinación de protecciones en instalaciones eléctricas de uso final.*

estrategia fundamental es que la interferencia electromagnética que pueda incidir dentro de una instalación se vaya reduciendo paso a paso mediante una coordinación energética entre los DPS y los equipos a proteger [25].

Los niveles de energía soportable pueden ser obtenidos de:

- ✓ Ensayos eléctricos de acuerdo a la IEC 61643-1.
- ✓ Información técnica proporcionada en los catálogos de fabricantes.

Por otro lado, en la figura 25 se muestra un modelo básico de coordinación de energía para DPS. Este modelo es válido únicamente cuando la impedancia de la red equipotencial y de la inductancia mutua entre la red equipotencial y el lazo formado por la configuración del DPS1 y DPS II (de la figura 25) es despreciable.



**Figura 25. Modelo básico para la coordinación de energía de DPS.**

**Fuente: [25].**

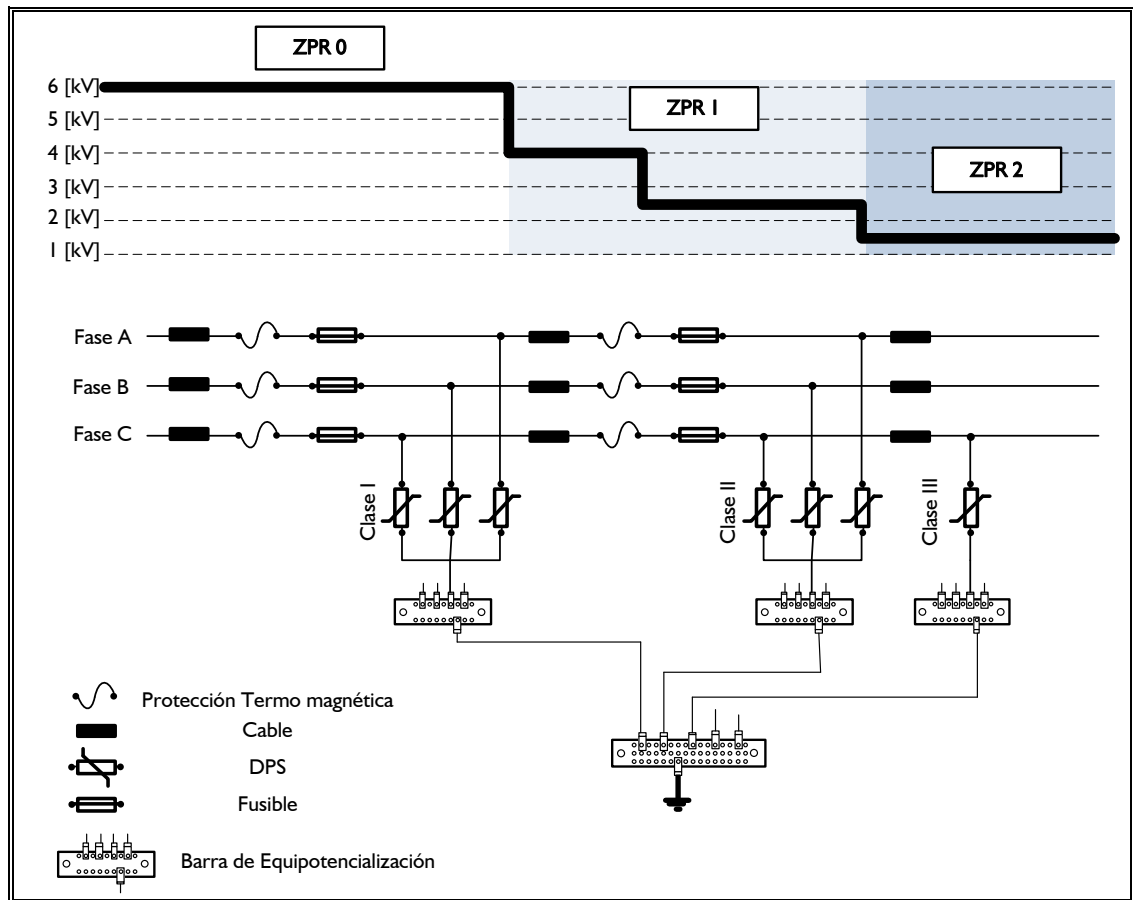
En la instalación de un DPS para la protección de una ZPR, es necesario determinar la robustez que el dispositivo debe tener frente a las perturbaciones que inciden aguas arriba de la instalación, sumado a la coordinación energética en

relación a otros DPS's en la instalación o en el equipo a proteger, para garantizar que la operación sea efectiva.

En este sentido, la coordinación energética significa dimensionar un circuito de protección previo al equipo a proteger de forma tal, que solo ante el inminente riesgo de sobrecarga del circuito de protección interno, es cuando se activa el nivel de protección previo. El "comportamiento de respuesta" del nivel de protección previo debe solaparse con la carga soportable por los equipos del circuito de protección del equipo a proteger. Sólo así se logra una relación equilibrada entre los costos que suponen un sistema de protección y los beneficios obtenidos.

La figura 26 presenta esquemáticamente el concepto de coordinación energética, de acuerdo con la norma IEC 61643-12:2002, en donde cada DPS respecto a la ZPR (ver literal 3.3.3) está sujeto a una tensión de corte, garantizando que la salida de tensión aguas debajo de los DPS's, no supera dicho límite de tensión, ya que para valores superiores de tensión, actúa el DPS desviando dicha sobretensión.

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.



**Figura 26. Esquema de coordinación energética de DPS.**

**Fuente: [23].**

NOTA: Para mayor información respecto a las pruebas asociadas a las clases de los DPS's, refierase a la norma IEC 61643-1:2005.

### 3.3.6. Zonas de protección contra rayos (ZPR).

Corresponden a las zonas en las cuales está basado el concepto de protección integral contra rayos, mitigando en cada una de éstas los parámetros asociados al impulso electromagnético del rayo (IER), permitiendo la protección de equipos eléctricos y electrónicos así como garantizando el funcionamiento y la protección de quien los utiliza.

El número de zonas requeridas está determinado por las propiedades físicas de la estructura y la susceptibilidad o inmunidad del equipo vulnerable. La norma NTC 4552-1:2008 y la IEC 62305-4:2010, propone las siguientes zonas:

### **3.3.6.1. Zonas externas.**

- ✓ ZPR 0: Zona donde la amenaza se debe a la no atenuación del IER<sup>59</sup> del rayo y donde los sistemas internos pueden estar sometidos al pico de corriente, total o parcial del rayo. Se divide en dos:
- ✓ ZPR 0<sub>A</sub>: Zona donde la amenaza es debido a impactos directos del rayo y debe soportar la corriente total del rayo<sup>60</sup>. Los campos electromagnéticos son muy intensos y no atenuados. Los sistemas internos pueden ser sometidos al pico de corriente total del rayo.
- ✓ ZPR 0<sub>B</sub>: Zona protegida contra impactos directos del rayo, pero existen IER sin atenuar y los sistemas internos pueden conducir corrientes parciales del rayo. Los campos electromagnéticos son intensos, no atenuados.

---

<sup>59</sup> Impulso Electromagnético del Rayo. LEMP-“Lightning Electromagnetic Impulse” en idioma inglés.

<sup>60</sup> “Full Lightning Surge Current” en idioma inglés.

### **3.3.6.2. Zonas internas (Protección contra impactos directos del rayo).**

- ✓ ZPR 1: Zona donde el pico de corriente está limitado por la división de corrientes y en donde las interfaces de aislamiento y/o DPS's se encuentran en las fronteras. El blindaje espacial puede atenuar el campo electromagnético del rayo.
  
- ✓ ZPR 2, ZPR 3...ZPR n: Zonas donde el pico de corriente puede ser aún más limitado por la división de corrientes, debido a instalaciones adicionales de interfaces de aislamiento y/o DPS's en las fronteras. Adicionalmente, el blindaje espacial puede ser usado para atenuar aún más el campo electromagnético del rayo.

Las ZPR's<sup>61</sup>, a su vez, se basan en el concepto de CEM y definen diferentes áreas o zonas dentro de una estructura o sus alrededores con similares ambientes electromagnéticos.

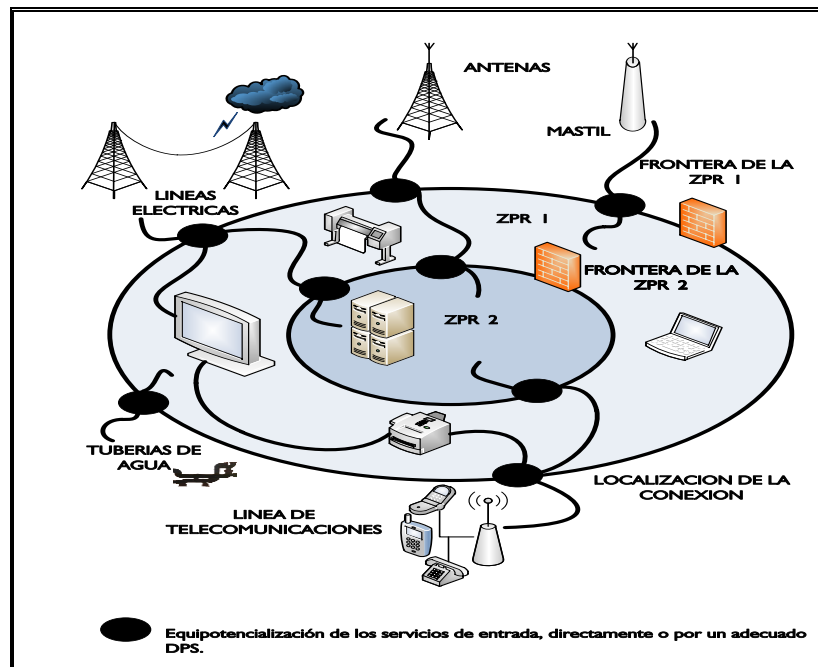
La zona que contiene los sistemas a ser protegidos se dividirá en ZPR's. La figura 27 presenta el principio general de funcionamiento para las diferentes zonas de protección contra el rayo. En ella se aprecia un ejemplo de la división por zonas en el interior de una edificación. Estas zonas son teóricamente parte de un espacio asignado (o de un sistema interno) donde la severidad del IER es compatible con el nivel de soportabilidad de los sistemas internos o equipos. Las zonas sucesivas están caracterizadas por cambios significativos en el nivel de emisión del IER. La frontera de una ZPR está definida por las medidas de protección contra el rayo (MPR) empleadas. Las MPR<sup>62</sup> se definirán con mayor detalle en el ítem 3.3.3.

---

<sup>61</sup> Zonas de protección contra rayos. "Lightning Protection Zones" en idioma inglés.

<sup>62</sup> Medidas de protección contra el IER. "Protection measures against" LEMP en idioma inglés.

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.



**Figura 27. Principio general para las diferentes ZPR's.**

**Fuente: [17].**

Todos los servicios metálicos que entran en la estructura están unidos a través de barras de equipotencialización en la frontera de la ZPR 1 (como se muestra en la figura 14). Además, los conductores de las entradas de servicios de la ZPR 2 (por ejemplo, salas de cómputo) están unidas a través de barras de equipotencialización en la frontera de la ZPR 2.

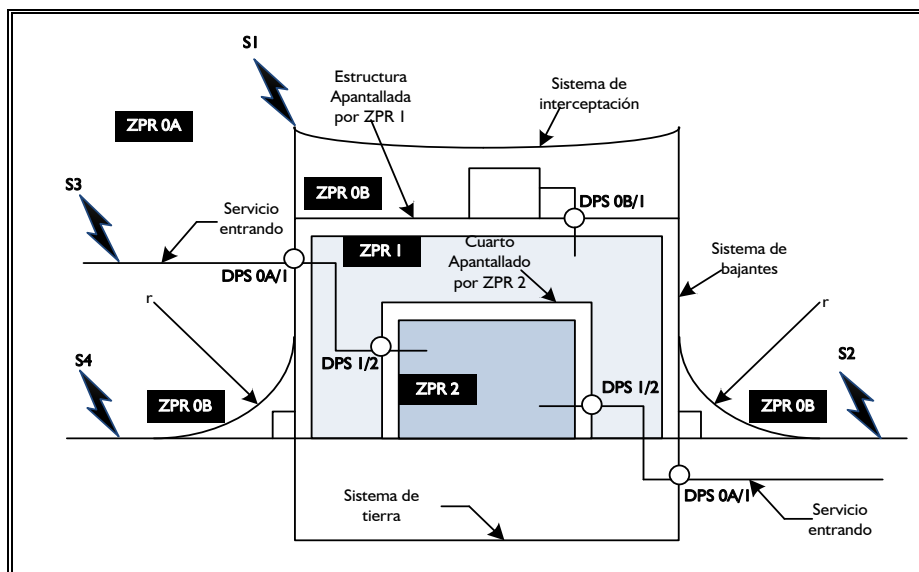
Para asegurar la protección de las distintas zonas que se muestran en la figura 28, es conveniente utilizar diferentes DPS en cada una de ellas:

- Zona de transición ZPR  $0_A$  hacia ZPR 1: Descargador de corriente del rayo.
- Zona de transición ZPR  $0_B$  hacia ZPR 1: Descargador de sobretensiones.
- Zona de transición ZPR 1 a ZPR 2 y superior: Descargador de sobretensiones.

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.

Una instalación protegida bajo el concepto de zonas de protección contra el rayo, pueden evitar fallas y averías en sistemas eléctricos y electrónicos; incluso en el supuesto de impactos de rayo directos o cercanos. La figura 28 muestra las transiciones de las diferentes zonas mediante DPS.

En resumen, el propósito de las ZPR's<sup>63</sup> es mitigar las interferencias electromagnéticas de los equipos vulnerables y la implementación de las MPR<sup>64</sup>. Además, dependiendo de la cantidad, tipo y nivel de inmunidad de los equipos a proteger, se puede definir la ZPR adecuada. Estos pueden incluir a pequeñas zonas locales (la carcasa del equipo) o grandes zonas (toda la estructura).



**Figura 28. Zonas de protección contra rayos (ZPR's) definidas para medidas de protección contra el IER.**

**Fuente: [24].**

### 3.3.7. Diseño de medidas de protección contra el IER (MPR).

<sup>63</sup> Zonas de protección contra rayos. "Lightning Protection Zones" en idioma inglés.

<sup>64</sup> Medidas de protección contra el IER. "Protection measures against" LEMP en idioma inglés.

*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.*

Las MPR<sup>65</sup> son diseñadas para la protección de equipos contra “surges”<sup>66</sup> conducidas e inducidas a través del cableado y campos electromagnéticos generados por el IER<sup>67</sup>.

Por lo tanto, para la mitigación de las fallas anteriormente mencionadas, se deben tener en cuenta las siguientes MPR:

MPR 1: El sistema completo de puesta a tierra.

- ✓ Conduce y dispersa la corriente del rayo a tierra.
- ✓ La equipotencialización minimiza las diferencias de potencial y permite reducir los campos magnéticos.
- ✓ La barra de equipotencialización evita diferencias de potencial dentro de una ZPR<sup>68</sup>. A ésta barra se deben conectar: Todos los conductores de puesta a tierra y de protección, los blindajes de los conductores de comunicación y control, los neutros de la instalación de la edificación y las fases de los circuitos eléctricos, mediante DPS.

MPR 2: El Blindaje magnético y enrutamiento de líneas.

- ✓ Los apantallamientos atenúan el campo magnético dentro de una ZPR, por impactos directos o cercanos del rayo a la estructura y reduce las sobretensiones transitorias internas.

---

<sup>65</sup> Medidas de protección contra el IER. SPM-“LEMP Protection Measures” en idioma inglés.

<sup>66</sup> Sobrecorrientes y sobretensiones.

<sup>67</sup> Impulso Electromagnético del Rayo. LEMP-“Lightning Electromagnetic Impulse” en idioma inglés.

<sup>68</sup> Zonas de protección contra rayos. “Lightning Protection Zones” en idioma inglés.

- ✓ El blindaje de redes internas eléctricas o de comunicación usando cables apantallados o ductos para cables, esto minimiza las sobretensiones inducidas.
- ✓ Los conductores internos deben estar adecuadamente cableados, con el fin de evitar lazos inductivos que puedan generar sobretensiones perjudiciales para los sistemas internos. Adicionalmente, se pueden utilizar cables apantallados o dispuestos dentro de conductores metálicos para reducir efectos inductivos.
- ✓ El apantallamiento de redes externas que entran a la estructura reduce las sobretensiones que son conducidas al interior de la estructura.

MPR 3: El sistema coordinado de DPS.

- ✓ Esta acción mitiga los efectos de las “surges” externas e internas. Este tema es tratado en el ítem 3.3.5.

En resumen, para la protección contra los efectos de la radiación de los campos electromagnéticos que inciden directamente sobre los equipos, las MPR<sup>69</sup> consisten de blindajes espaciales, cables apantallados, sistema coordinado de DPS's<sup>70</sup>, que en conjunto con la carcasa del equipo proporciona una protección contra los efectos de conducción e inducción de “surges”.

NOTA: Respecto a las MPR, las fallas debidas a los campos electromagnéticos que inciden directamente sobre los equipos pueden ser consideradas despreciables, siempre que el equipo cumpla con las emisiones de radio frecuencia e inmunidad pertinentes en las normas de productos CEM.

---

<sup>69</sup> Medidas de protección contra el IER. SPM-“LEMP Protection Measures” en idioma inglés.

<sup>70</sup> Dispositivo de protección contra “surges”. “Surge protective device” SPD en idioma inglés.

*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.*

NOTA: En general, el equipo está obligado a cumplir con las normas pertinentes de productos CEM. Por lo tanto aplicar una MPR que consiste en un sistema coordinado de DPS's, se considera suficiente para la protección de estos equipos contra los efectos del IER.

NOTA: Para los equipos que no cumplan con las normas pertinentes a los productos CEM, la MPR que consiste de un sistema de coordinado de DPS, se considera inadecuada para la protección de estos equipos contra los efectos del IER. En este caso, el ANEXO A de la norma IEC 62305-4 proporciona mayor información en cuanto a cómo lograr una mejor protección contra los campos electromagnéticos que inciden directamente. Por otra parte, el nivel de inmunidad de los equipos contra radiaciones de campos magnéticos, deben ser seleccionados de acuerdo con las normas: IEC 61000-4-9:2001 - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-9: Testing and measurement techniques - Pulse magnetic field immunity test y IEC 61000-4-10:2001 - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-10: Testing and measurement techniques - Damped oscillatory magnetic field immunity test.

La figura 29 y la tabla 3, que resume los niveles de inmunidad dados en los párrafos anteriores, son un ejemplo del IER<sup>71</sup> en el caso de un impacto por rayo a una estructura, mostrando las zonas de protección ZPR 0, ZPR 1 y ZPR 2. El sistema electrónico a proteger está instalado dentro de la ZPR 2.

---

<sup>71</sup> Impulso Electromagnético del Rayo. LEMP-“Lightning Electromagnetic Impulse” en idioma inglés.

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.

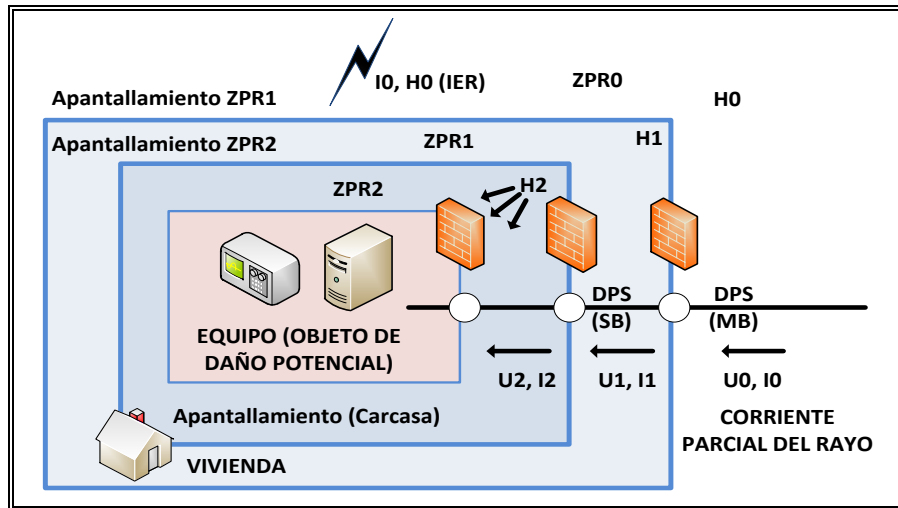


Figura 29. Ejemplo de la situación del IER debido al impacto del rayo.

Fuente: [17].

Fuente primaria de daño IER. De acuerdo con los niveles de protección NPR <sup>72</sup> I – IV.						
1	IEC 62305-1		Impulso [ $\mu$ s]	Amplitud para NPR I – II – III - IV	Pendiente para NPR I – II – III - IV	Efectos relevantes
		$I_0$	10/350	200-150-100-	20-15- 10-10	Corriente parcial.
			1/200	100	100-75-50-50	Inducción.
			0,25/10	100-75-50-50	200-150-100-100	Inducción.
$H_0$	0	50-37.5-25-25				
Derivado de la corriente $I_0$						
2	Niveles de inmunidad de instalaciones eléctricas. Definidas para la categorías de la sobretensión de la instalación de I a IV, para tensiones nominales 230/400 y 277/480					
	IEC 60664-1	$U_w$	Categoría de la sobretensión I a IV		6 [kV] - 4[kV] - 2,5[kV] - 1,5[kV]	

<sup>72</sup> Niveles de protección contra el rayo. Para mayor información consulte la NTC 4552-1:2008. LPL- “Lightning Protection Levels” en idioma inglés.

3	Niveles de inmunidad para instalaciones de telecomunicaciones		
	Normas ITU K.20, K.21 y K.45		
4	Pruebas para equipos sin normas de producto.		
	Nivel de soporte del equipo establecido para los efectos conducidos de rayo (U, I).		
	IEC 61000-4-5	$U_{OC}$	Impulso 1,2/50 [ $\mu$ s]
$I_{SC}$		Impulso 8/20 [ $\mu$ s]	2[kA] -1[kA] - 0.5 [kA] - 0,25[kA]
5	Prueba para equipos que no cumplen con los lineamientos normativos para productos CEM.		
	Nivel de soporte del equipo establecido para los efectos inducidos de rayo (H).		
	IEC 61000-4-9	$H$	Impulso 8/20 [ $\mu$ s] (Oscilación amortiguada de 25[kHz] $T_p=10$ [ $\mu$ s])
IEC 61000-4-10	$H$	Oscilación amortiguada de 1[MHz] (Impulso 0,2/0,5 [ $\mu$ s] $T_p=0,25$ [ $\mu$ s])	100[A/m]-30[A/m]-10[A/m]

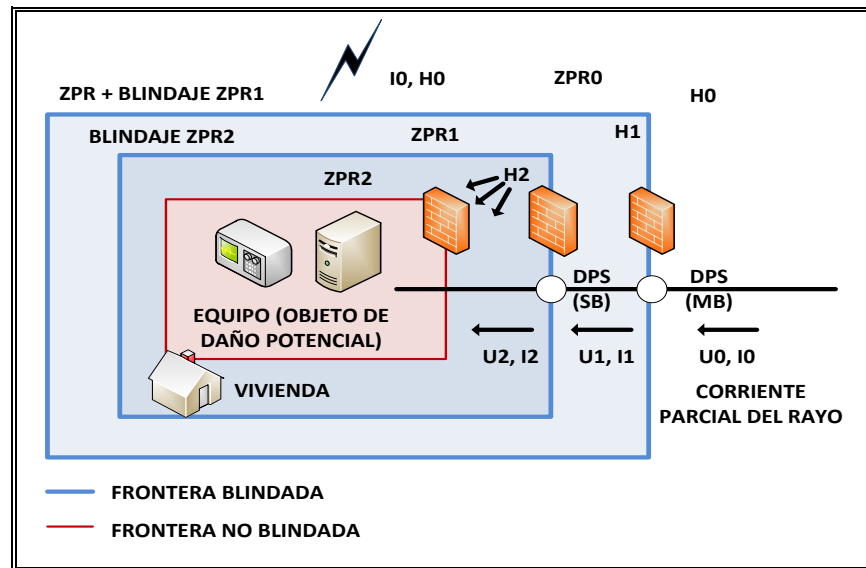
**Tabla 3. Parámetros relevantes para la fuente de daño y el equipo.**

**Fuente: [17].**

En las figuras 30, 31, 32, y 33, se presentan esquemáticamente otras 4 MPR adicionales, que surgen de la combinación de MPR<sup>73</sup>, tales como el sistema completo de puesta a tierra, blindajes magnéticos y sistemas coordinados de DPS en diversas disposiciones. En el Anexo B, se incluye como información adicional otra MPR que permite mitigar las perturbaciones causadas por los ruidos de modo común, generado principalmente por descargas atmosféricas.

<sup>73</sup> Medidas de protección contra el IER. SPM-“LEMP Protection Measures” en idioma inglés.

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.

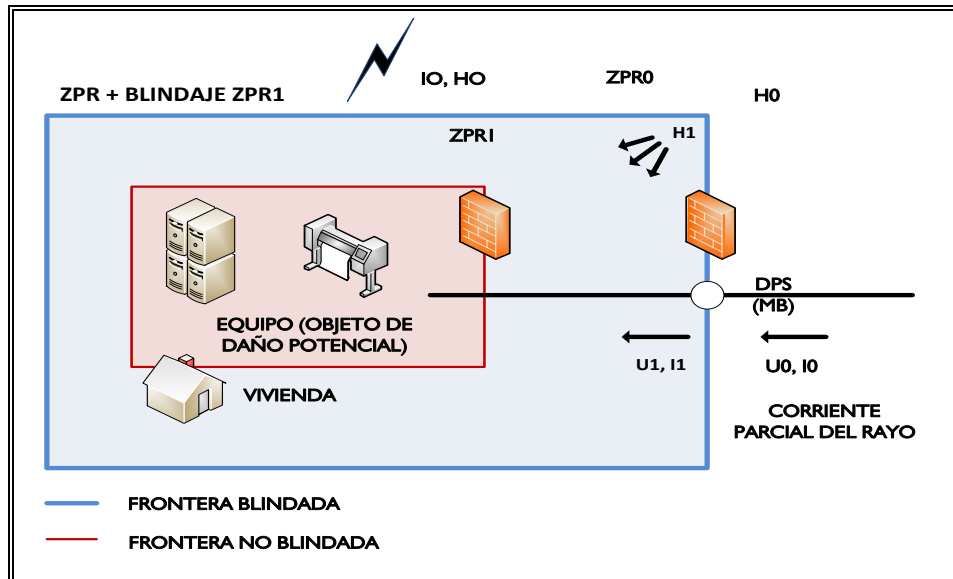


**Figura 30. MPR que utilizan blindajes espaciales y un sistema coordinado de DPS – Protegiendo los equipos contra “surges” ( $U_2 \ll U_0$  y  $I_2 \ll I_0$ ) y radiación de campos magnéticos ( $H_2 \ll H_0$ ).**

**Fuente: [17].**

La figura 30, muestra la implementación de blindajes espaciales y sistemas coordinados de DPS, que son medidas de protección contra radiaciones de campos magnéticos y contra “surges” conducidas. La utilización en cascada de estos blindajes y la coordinación de DPS, pueden reducir el campo magnético y las “surges” a un nivel de bajo de amenaza.

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.



**Figura 31. MPR que utiliza un blindaje espacial de la ZPR 1 y protección de DPS en la entrada de la ZPR 1. Protegiendo los equipos contra “surges” ( $U_1 < U_0$  y  $I_1 < I_0$ ) y radiación de campos magnéticos ( $H_1 < H_0$ ).**

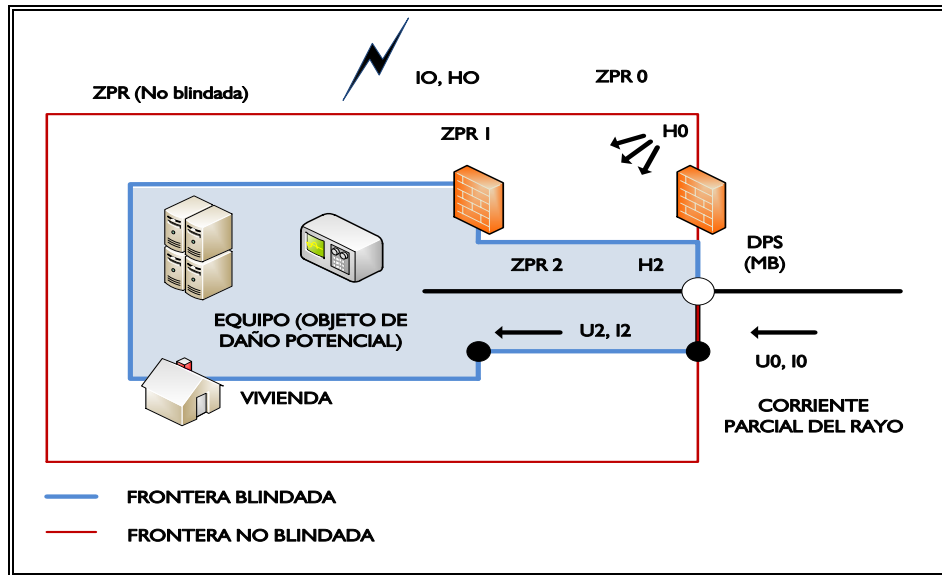
**Fuente: [17].**

La figura 31, emplea un blindaje espacial en la ZPR1 y un DPS en la entrada de dicha zona, éstas son MPR's<sup>74</sup> que protegen el equipo contra la radiación de campo magnético y contra la conducción de “surges”.

NOTA: Respecto a las figuras 30 y 31, la protección podría no ser suficiente si el campo magnético remanente sigue siendo demasiado alto (debido a la baja efectividad del blindaje en la ZPR 1) o si la magnitud remanente de la surge sigue siendo demasiado alta (debido a un alto nivel de tensión de la protección del DPS y a los efectos inductivos sobre el cableado aguas abajo del DPS).

<sup>74</sup> Medidas de protección contra el IER. SPM-“LEMP Protection Measures” en idioma inglés.

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.



**Figura 32. MPR que utiliza blindajes de líneas internas y DPS en la entrada de la ZPR 1. Protegiendo los equipos contra “surges” ( $U_2 < U_0$  y  $I_2 < I_0$ ) y radiación de campos magnéticos ( $H_2 < H_0$ ).**

**Fuente: [17].**

La figura 32, emplean cables apantallados combinados con el uso de los blindajes de las carcasas de los equipos, éstas son MPR's<sup>75</sup> que protegen contra la radiación de campos magnéticos. Así mismo, el DPS<sup>76</sup> en la entrada de la ZPR<sup>77</sup> 1 proporcionará la protección contra “surges”<sup>78</sup> conducidas. Para lograr disminuir el nivel de amenaza (desde la ZPR 0 a la ZPR 2), es necesario un DPS especial (ejemplo, la coordinación de etapas adicionales en el interior) para alcanzar una tensión lo suficientemente baja del nivel de protección.

<sup>75</sup> Medidas de protección contra el IER. SPM-“LEMP Protection Measures” en idioma inglés.

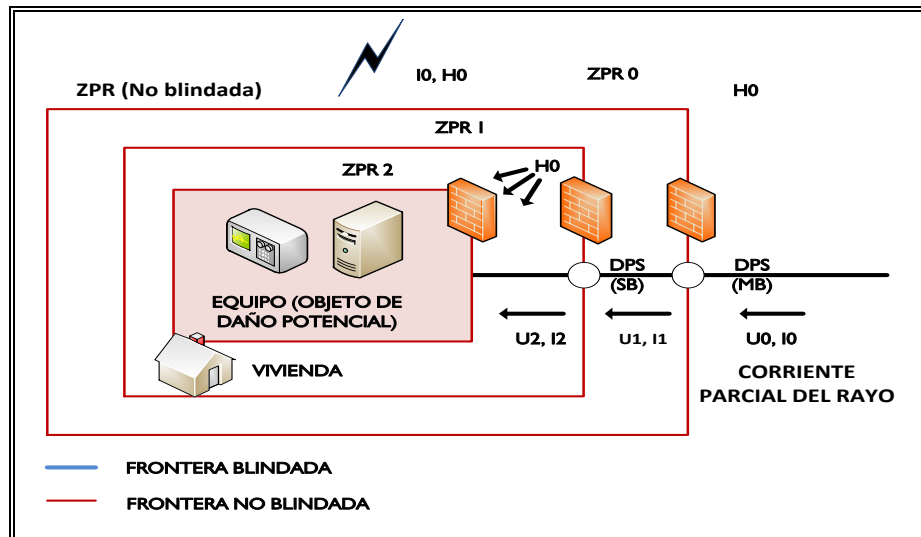
<sup>76</sup> Dispositivo de protección contra “surges”. “Surge protective device” SPD en idioma inglés.

<sup>77</sup> Zona de protección contra rayos. “Lightning Protection Zone” en idioma inglés.

<sup>78</sup> “Surge” en idioma inglés está definida como Transitorio creado por un impulso electromagnético que aparece como una sobretensión y/o sobrecorriente.

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.

NOTA: Las soluciones correspondientes a la aplicación de las MPR's expuestas en las figuras 30, 31 y 32, se recomiendan especialmente para equipos que no cumplan con las normas pertinentes de productos CEM.



**Figura 33. MPR que utiliza solo un sistema coordinado de DPS. Protegiendo los equipos contra “surges” conducidas ( $I_2 \ll I_0$  y  $U_2 \ll U_0$ ), pero no contra la radiación de campos magnéticos ( $H_0$ ).**

**Fuente: [17].**

La figura 33, utiliza solo un sistema coordinado de DPS<sup>79</sup> que corresponde una MPR<sup>80</sup> que solo es adecuada para la protección de equipos que son inmunes a la radiación de campos magnéticos, ya que los DPS solo ofrecerán protección contra “surges” conducidas. Se puede alcanzar un nivel de amenaza menor de “surges”, empleando la coordinación de DPS.

<sup>79</sup> Dispositivo de protección contra “surges”. “Surge protective device” SPD en idioma inglés.

<sup>80</sup> Medida de protección contra el IER. SPM-“LEMP Protection Measure” en idioma inglés.

*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.*

NOTA: Respecto a las figuras 30, 31, 32 y 33, los DPS's también se pueden localizar en los siguientes puntos:

- ✓ En la frontera de la ZPR1 (ej., en el tablero de distribución principal-TP).
- ✓ En la frontera de la ZPR2 (ej., en el tablero de distribución secundario-TS).
- ✓ Cerca o en los equipos (ej., en él toma corriente).

NOTA: Un SIPRA, diseñado de acuerdo con la Norma IEC 62305-3, en la que emplean solo una conexión equipotencial de DPS no proporcionará una efectiva protección contra fallas de los sistemas eléctricos y electrónicos sensibles. El SIPRA puede ser mejorado mediante la reducción de las dimensiones de la malla y una selección adecuada de DPS, con el fin de convertirlo en un componente efectivo de las MPR.

### **3.3.8. Interconexión de ZPR's.**

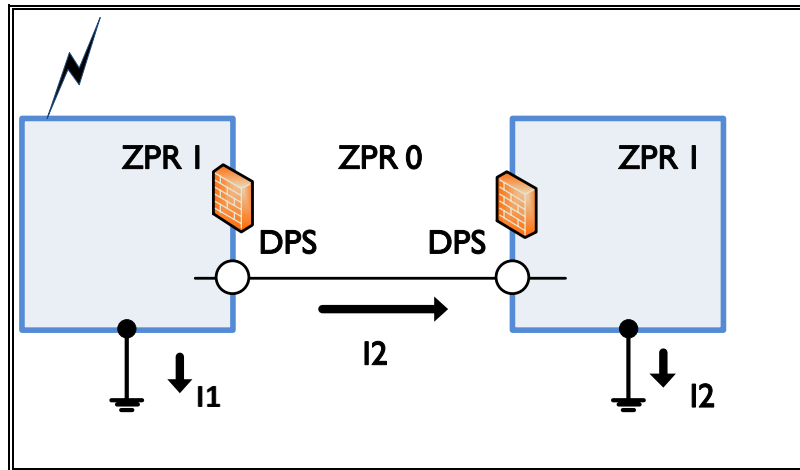
La interconexión de ZPR's<sup>81</sup> del mismo orden (zonas de igual clasificación), puede ser necesaria si dos estructuras separadas se encuentran conectadas por líneas eléctricas o de señal o si se requiere que el número de DPS's<sup>82</sup> sea reducido. Las figuras 34, 35, 36 y 37 se muestran las diferentes interconexiones de éstas estructuras.

---

<sup>81</sup> Zonas de protección contra rayos. "Lightning Protection Zones" en idioma inglés.

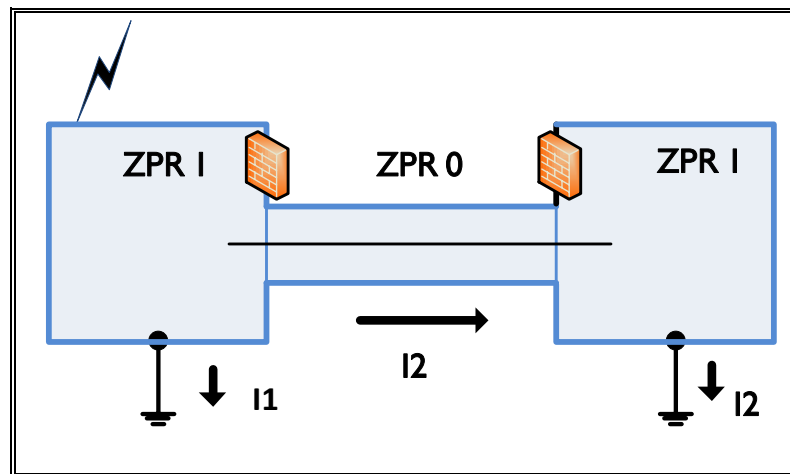
<sup>82</sup> Dispositivos de protección contra "surges". "Surge protective devices" SPD en idioma inglés.

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.



**Figura 34. Interconexión de dos ZPR 1 usando DPS's.**

**Fuente: [17].**



**Figura 35. Interconexión de dos ZPR 1 usando cables blindados o ductos portacables blindados.**

**Fuente: [17].**

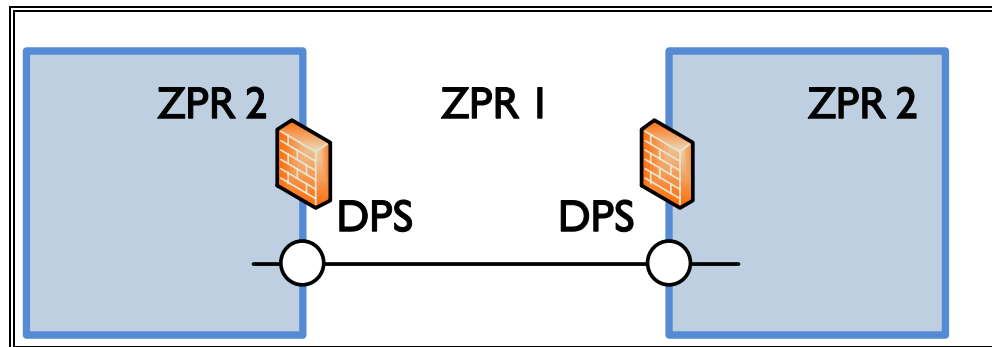
La figura 34 muestra dos ZPR<sup>83</sup> 1 interconectadas mediante redes eléctricas o de señales. Debe tomarse con un especial cuidado si ambas ZPR 1 representan estructuras separadas con terminales de puesta a tierra independientes o

<sup>83</sup> Zona de protección contra rayos. "Lightning Protection Zone" en idioma inglés.

*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.*

separadas, espaciadas decenas o cientos de metros una de la otra. En este caso, una gran parte de la corriente del rayo puede fluir a lo largo de las líneas interconectadas, que no están protegidas.

Así mismo, la figura 35 muestra que la problemática anterior puede ser solucionada utilizando cables blindados o ductos portacables blindados para la interconectar ambas ZPR 1, previendo que el blindaje sea capaz de transportar la corriente parcial del rayo. Los DPS's<sup>84</sup> pueden ser omitidos si la caída de tensión<sup>85</sup> a lo largo del blindaje no es muy alta.



**Figura 36. Interconexión de dos ZPR 2 usando DPS's.**

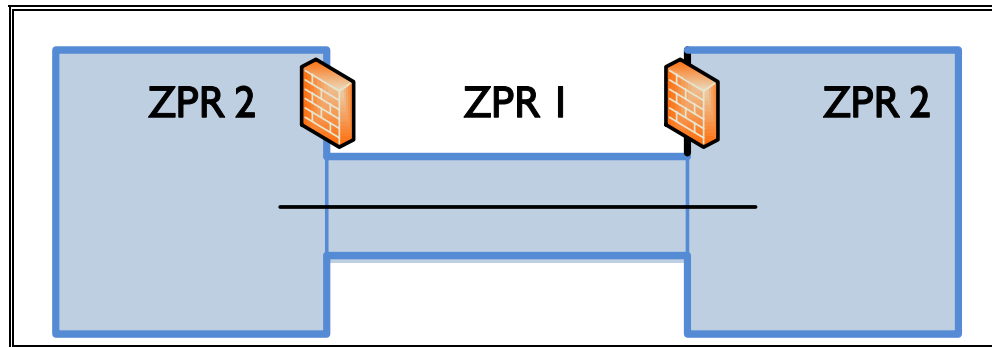
**Fuente: [17].**

---

<sup>84</sup> Dispositivos de protección contra "surges". "Surge protective devices" SPD en idioma inglés.

<sup>85</sup> "Voltage Drop" en idioma inglés.

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.



**Figura 37. Interconexión de dos ZPR 2 usando cables blindados o ductos portacables blindados.**

**Fuente: [17].**

La figura 36 muestra dos ZPR<sup>86</sup> 2 conectadas por líneas de redes eléctricas o de señales. Debido a que las líneas están expuestas al nivel de amenaza de la ZPR1, se requieren DPS's<sup>87</sup> en la entrada de cada ZPR2.

A sí mismo la figura 37 muestra que tal interferencia puede ser evitada y pueden ser omitidos los DPS, utilizando cables blindados o ductos portacables blindados para la interconexión de ambas ZPR 2.

En casos especiales, puede ser necesario extender una ZPR en el interior de otra (un transformador dentro de una estructura) como se muestra en la figura 38 y 39, o puede ser usada para reducir el número de DPS requeridos como se muestra en las figuras 40 y 41.

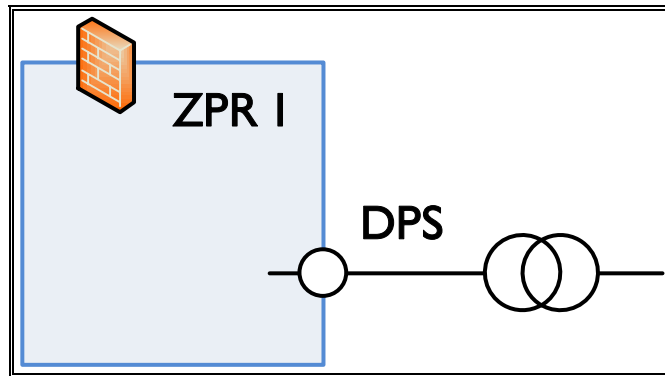
NOTA: La evaluación detallada del entorno electromagnético en una ZPR es descrita en el anexo A de la norma IEC 62305-4:2010.

---

<sup>86</sup> Zona de protección contra rayos. "Lightning Protection Zone" en idioma inglés.

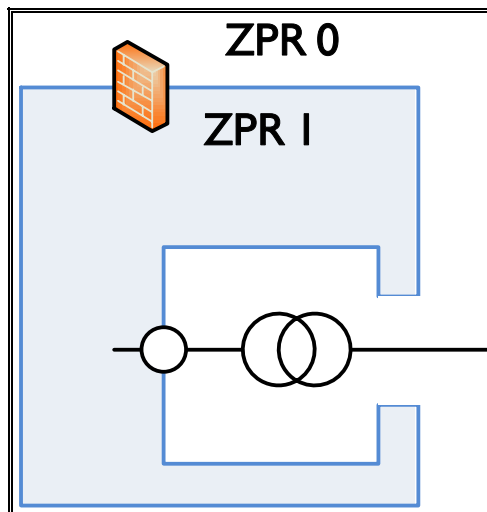
<sup>87</sup> Dispositivos de protección contra "surges". "Surge protective devices" SPD en idioma inglés.

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.



**Figura 38. Transformador fuera de la estructura.**

**Fuente: [17].**



**Figura 39. Transformador en el interior de la estructura.**

**Fuente: [17].**

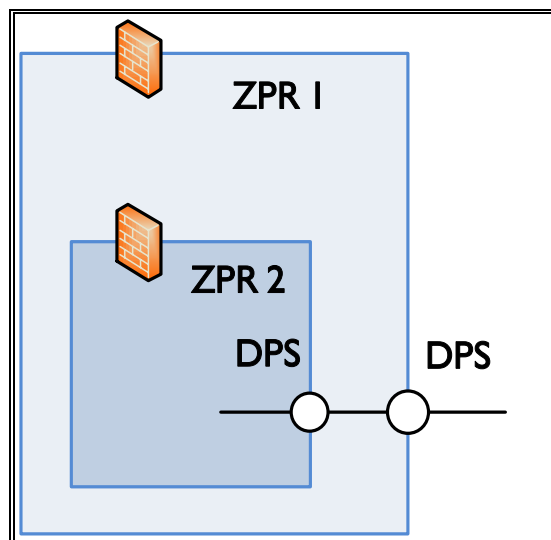
La figura 38 muestra una estructura alimentada por un transformador de potencia. Si el transformador está ubicado fuera de la estructura; se requiere utilizar un DPS<sup>88</sup> en las líneas de baja tensión que entran por ésta.

---

<sup>88</sup> Dispositivo de protección contra "surges". "Surge protective device" SPD en idioma inglés.

Si el transformador está ubicado en el interior de la estructura y no tiene un DPS instalado en el lado de alta tensión, entonces se aplica la configuración de la figura 39. La figura 39 muestra que el problema de la ubicación del DPS puede ser solucionado mediante la extensión de la ZPR<sup>89</sup> 0 en el interior de la ZPR1, que a su vez requiere DPS's para ser instalados solo en el lado de baja tensión.

NOTA: Respecto a la figura 39, si el transformador debe ser ubicado dentro de la estructura, al propietario de la estructura generalmente, por normas técnicas (IEC 62305-4:2010, capítulo 4.3), no le es permitido colocar medidas de protección en el lado de alta tensión.



**Figura 40. Coordinación de dos DPS (DPS entre las ZPR 0/1) y (DPS entre la ZPR 1/2).**

**Fuente: [17].**

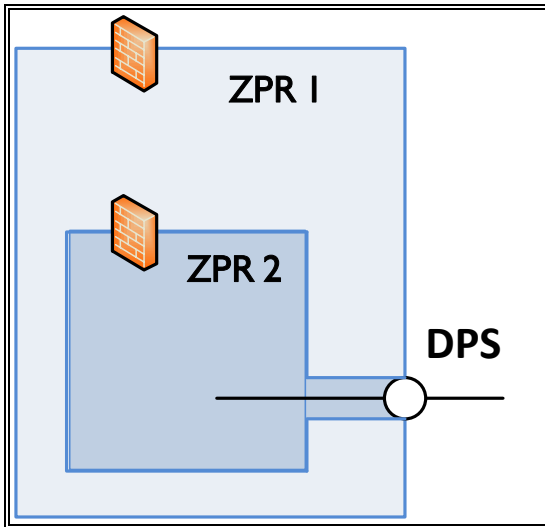
La figura 40 presenta una ZPR 2 alimentada por una línea eléctrica o de señal. Ésta línea necesita la coordinación de dos DPS, para disminuir los efectos que se

---

<sup>89</sup> Zona de protección contra rayos. "Lightning Protection Zone" en idioma inglés.

*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.*

pueden llegar a inducir sobre el tramo del conductor que se encuentra entre éstas dos zonas; uno en la frontera de las ZPR's 0/1, y el otro en la frontera de las ZPR's 1/2.



**Figura 41. Solo es necesario un DPS (DPS entre las ZPR 0/2) (La ZPR2 se extiende en el interior de la ZPR1).**

**Fuente: [17].**

Por otra parte, la figura 41 muestra que la línea eléctrica o de señal puede entrar inmediatamente en el interior de la ZPR 2, mediante el uso de un blindaje alrededor de éste, pero requiere un DPS de mayor selectividad (ya que estaría reemplazando el sistema coordinado de DPS's que se muestran en la figura 40).

### **3.4. SISTEMA ALTERNATIVO DE PROTECCION CONTRA RAYOS - PARARRAYOS DESIONIZADOR DE CARGA ELECTROSTÁTICA-PDCE [26], [27], [28].**

#### **3.4.1. Información general.**

Durante el transcurso de los años se han presentado diversos problemas en las instalaciones eléctricas de uso final, en las que se han utilizado como única forma de protección contra rayos terminales aéreos, que atraen la descarga atmosférica y la conducen a tierra en una forma aparentemente segura. En muchas de estas prácticas no se tiene en cuenta los efectos de las corrientes a través de los bajantes y los campos electromagnéticos asociados, generando de ésta manera la incompatibilidad electromagnética al interior de las instalaciones y equipos sensibles y de esta misma forma, poniendo en riesgo los usuarios finales de estas instalaciones.

Actualmente algunos fabricantes han apostado al uso de nuevos enfoques para contrarrestar dichos efectos adversos. Estas metodologías parten de la concepción de la no atracción del rayo, eliminando los problemas de CEM<sup>90</sup> que pueden llegar a generarse a partir de la magnitud de la corriente que circula por los bajantes.

El concepto en el cual se basa el funcionamiento del pararrayos desionizador de carga electrostática (PDCE), es la desionización del aire. Este proceso se resume en esperar que se forme la tormenta y aparezca el campo eléctrico, para

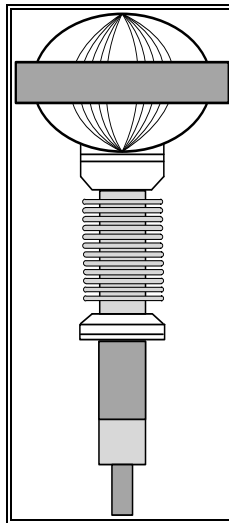
---

<sup>90</sup> Compatibilidad Electromagnética. “Electromagnetic Compatibility” – EMC, en idioma inglés.

*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.*

finalmente reducir su valor por debajo del valor de alta tensión y anular la ionización del aire.

El objetivo es la transferencia de las cargas del sistema<sup>91</sup>, evitando la creación de la excitación y la captura del rayo, contrarrestando sus parámetros eléctricos esenciales (sobrecorrientes, sobretensiones y campos electromagnéticos). De esta forma se garantiza que las personas vivan y trabajen en un ambiente sin contaminación electromagnética y que la instalación eléctrica de uso final, tenga una vida útil más duradera y no sufra averías que impidan o alteren su funcionamiento por causa del rayo. En la figura 42 se presenta un diagrama esquemático de un PDCE<sup>92</sup>.



**Figura 42. Diagrama esquemático de un PDCE.**

**Fuente: [26].**

---

<sup>91</sup> “Charge Transfer System” en idioma inglés.

<sup>92</sup> Pararrayos desionizador de carga electrostática.

### **3.4.2. Principio de funcionamiento del Pararrayos Desionizador de Carga Electrostática (PDCE) a nivel externo.**

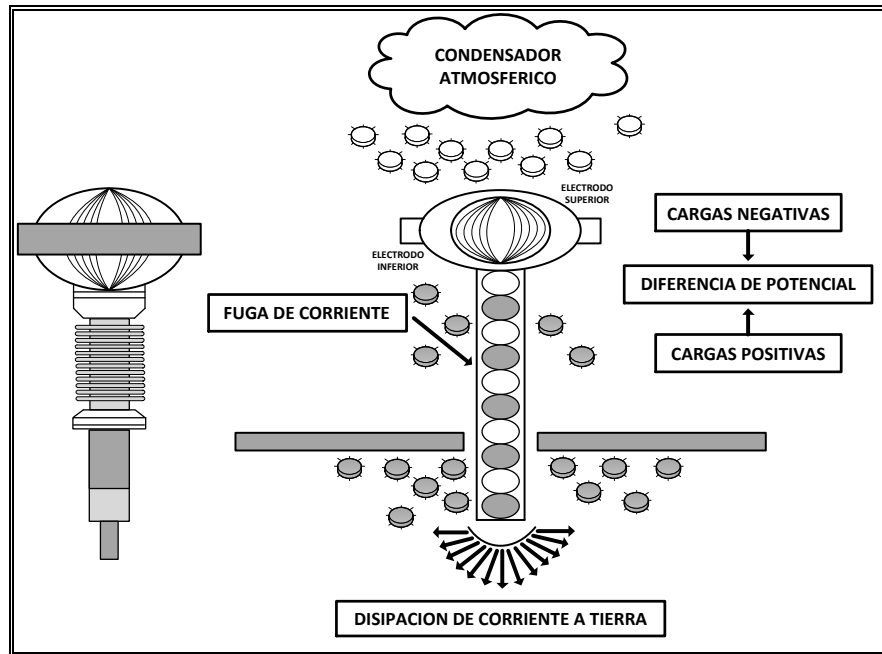
En la figura 43 se puede apreciar que el pararrayos desionizador de carga electrostática está constituido por dos electrodos, uno superior y uno inferior, los cuales se encuentran aislados eléctricamente entre sí. A medida que aumenta la diferencia de potencial, aparecen en la estructura cargas que se distribuyen en el punto más alto referenciado a tierra (Electrodo inferior del pararrayos). Según aumenta el potencial en el electrodo superior, aparece una diferencia de potencial entre el electrodo superior y el inferior el cual está aislado eléctricamente.

La inducción polarizada positiva o negativa en el electrodo superior, ejerce sobre el electrodo inferior un trabajo para equilibrar las cargas de signo contrario. El electrodo inferior capta entonces cargas del aire de signo opuesto polarizándose con el mismo signo de la nube.

La diferencia de potencial empieza a aumentar internamente en el pararrayos. Las cargas se equilibran entre los dos electrodos dando como resultado la aparición, en el interior del pararrayos, de un flujo ordenado de electrones (corriente pequeña) que se fugan a tierra por el bajante, descargando así continuamente el condensador a medida que éste intenta cargarse.

La intensidad de carga y descarga de la corriente es variable, ya que depende del tiempo de exposición a las cargas presentes, de la resistencia de la toma de tierra y de la velocidad de desplazamiento, así como de la condición de la nube.

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.



**Figura 43. Principio de funcionamiento del PDCE a nivel externo.**

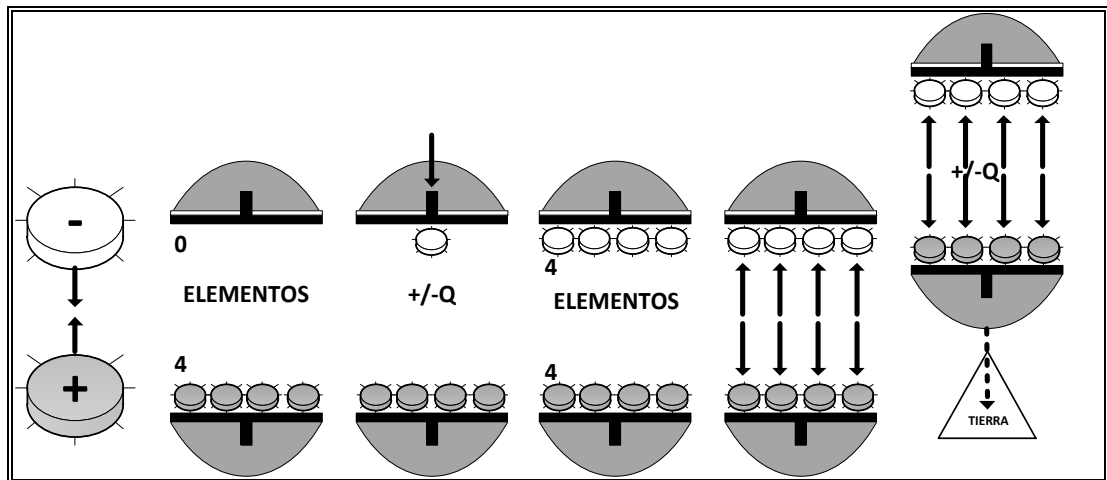
**Fuente: [26].**

### **3.4.3. El principio de funcionamiento del PDCE a nivel interno.**

El funcionamiento de este dispositivo se representa mediante la figura 44 y es descrito a continuación a través de las siguientes etapas:

1. Las cargas de signo contrario se atraen y se repelen si son del mismo signo.
2. La diferencia de potencial se genera por descompensación de cargas de los electrodos.
3. Las cargas procedentes de tierra se distribuyen por el electrodo conectado a tierra y éste, induce al electrodo flotante para cargarse con cargas signo contrario (Q).

4. La tensión eléctrica que aparece entre los dos electrodos (V) es la tendencia de la compensación de cargas de los dos electrodos, causadas por la diferencia de potencial de los mismos.
5. La corriente eléctrica que aparece por el cable de tierra (I) es el resultado del movimiento ordenado de cargas entre los dos electrodos, generada por la tensión.
6. La intensidad de la corriente que se fuga por el cable de tierra (I) es directamente proporcional a la tensión que aparece entre electrodos (V) e inversamente proporcional a la resistencia de la toma de tierra eléctrica (R).



**Figura 44. Principio de funcionamiento del PDCE a nivel interno.**

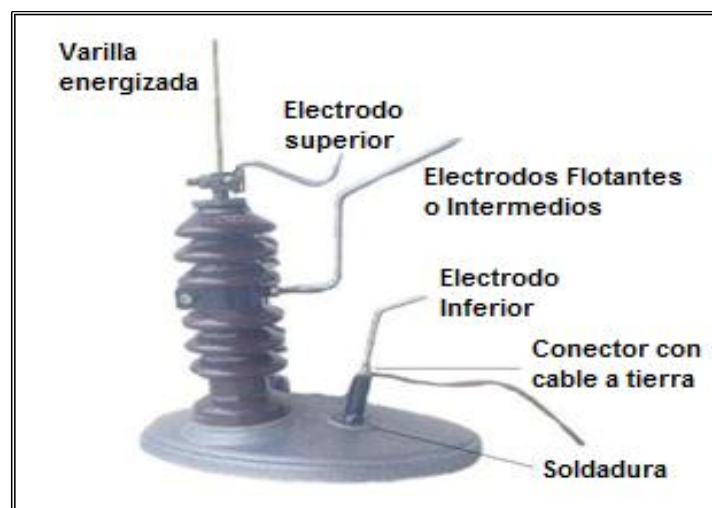
**Fuente: [26].**

### **3.5. SISTEMA ALTERNATIVO DE PROTECCION CONTRA RAYOS - PARARRAYOS DE PUNTA ENERGIZADA [29].**

#### **3.5.1. Información general.**

Este dispositivo permite prevenir las descargas atmosféricas cambiando el concepto de protección a un concepto de prevención. El pararrayos de punta energizada está constituido por una varilla energizada con tensión alterna en un rango de tensiones de 8 kV a 150 kV que polariza el aire entre la varilla y la nube, a manera de un cono inverso, independientemente de la carga a la cual se encuentra en la nube. Un filtro de onda de energía transitoria conformado por un electrodo superior conectado a la varilla energizada, un electrodo inferior conectado al SPT y uno o más electrodos flotantes o intermedios, montados sobre un aislador.

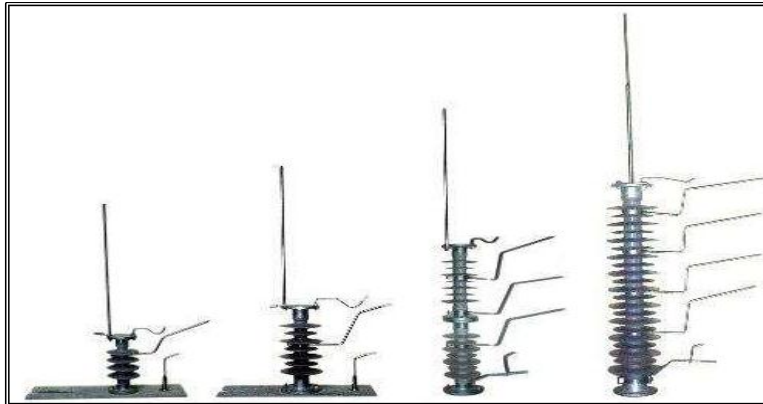
En las figuras 45 y 46 se muestran lo elementos constitutivos del pararrayos de punta energizada y esquemas para tensiones de 13.2 kV y 34.5 kV.



**Figura 45. Elementos constitutivos del Pararrayos de punta energizada.**

**Fuente: [29].**

*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.*



**Figura 46. Pararrayos de punta energizada, para niveles de tensión de 13.2kV y 34.5 kV.**

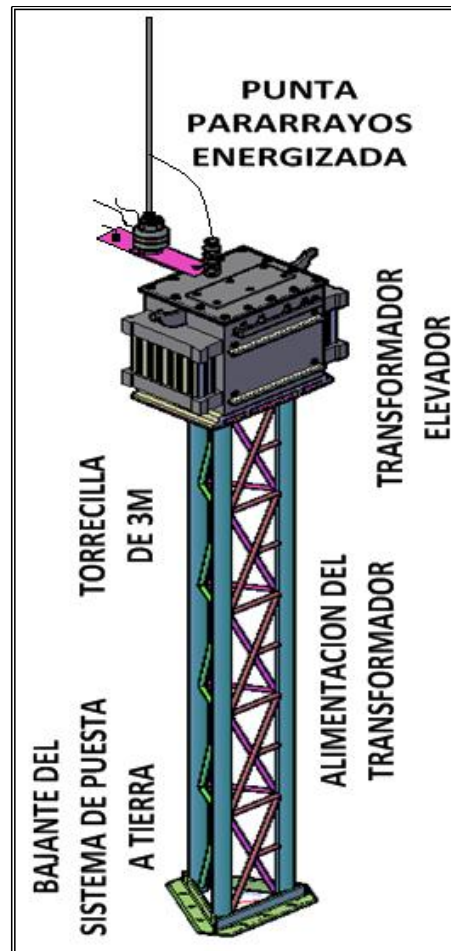
**Fuente: [29].**

### **3.5.2. Montaje con transformador elevador**

La punta pararrayos generalmente se energiza por medio de una línea de media tensión. En caso de no contar con una línea de media tensión en el sitio de la instalación se requiere adicionalmente de un transformador elevador de efecto capacitivo 120-220 / 8 kV instalado, ya sea sobre un poste de alumbrado, sobre una torre de comunicaciones o sobre una torrecilla de acero galvanizado, tal como se muestra en la figura 47.

El transformador elevador no representa ningún sobre costo considerable en la facturación de la energía, puesto que al estar conectado en vacío su consumo es de menos de 100 W.

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.



**Figura 47. Punta Pararrayos Energizada por transformador elevador montada sobre torrecilla.**

**Fuente: [29].**

## **4. BUENAS PRÁCTICAS DE INGENIERÍA ORIENTADAS AL ADECUADO FUNCIONAMIENTO DE LAS PROTECCIONES ELÉCTRICAS.**

Las buenas prácticas que se presentan a continuación, se tomaron de la norma IEC TR 61000-5-6:2002 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-6: Installation and mitigation guidelines – Mitigation of external EM influences, junto con artículos técnicos y catálogos de fabricantes de protecciones eléctricas.

### **4.1. FILTROS [6], [30]**

#### **4.1.1. Información general.**

Los filtros<sup>93</sup> son dispositivos que permiten mejorar la calidad de la onda proveniente del suministro de energía eléctrica, reduciendo parte de la incompatibilidad electromagnética de la instalación y que están relacionados con perturbaciones conducidas. Estas perturbaciones son las sobrecorrientes y las sobretensiones que pueden llegar a generar un equipo electrónico durante su funcionamiento, llevando a operaciones erráticas de las protecciones; debido a que se ven sometidas a conducciones para las cuales no han sido diseñadas, como es el caso de una onda con una alta contaminación armónica<sup>94</sup>. Por tal motivo, se hace importante dar a conocer, los tipos de filtros, las respectivas características y finalmente, dar a conocer una breve descripción de la aplicación de un filtro en la industria.

---

<sup>93</sup> “Filters” en idioma inglés.

<sup>94</sup> “Harmonic Pollution” en idioma inglés.

#### **4.1.2. Tipos de filtros**

Existen dos tipos de filtros que permiten reducir la contaminación armónica, mitigando problemas de Compatibilidad Electromagnética. Estos son: Filtros pasivos<sup>95</sup> y filtros activos<sup>96</sup>.

- ✓ Los filtros pasivos están diseñados con una combinación de componentes de circuitos pasivos (resistencias, inductores y capacitores), dispuestos en paralelo o en serie con la carga o equipo a la cual se le pretende hacer dicho tratamiento de la señal. Estos filtros limitan el paso de un armónico o un grupo de armónicos específico.
  
- ✓ Los filtros activos están diseñados por elementos tanto pasivos como activos (transistores, amplificadores operacionales, etc.). Al igual que los filtros pasivos, estos son incorporados en un equipo con el propósito de procesar la señal, pero a diferencia de estos, tienen más versatilidad en la operación pues el diseño permite limitar las componentes armónicas en un rango más amplio de componentes armónicas que pueda tener la señal de alimentación.

Ahora, para saber cuál es la mejor elección respecto a la utilización de un determinado tipo de filtro es necesario conocer la distorsión armónica total en tensión y corriente presente en el sistema. Dichos parámetros permiten identificar la calidad de la señal de suministro en una instalación eléctrica de acuerdo al contenido de armónicos. Esta información es obtenida a través de un analizador

---

<sup>95</sup> "Passive Filters" en idioma inglés.

<sup>96</sup> "Active Filters" en idioma inglés.

de redes y de esta manera llevar a cabo la selección adecuada del filtro, para la mitigación de la corriente armónica.

#### **4.1.3. Aplicación de un filtro activo en la industria. [31]**

##### **4.1.3.1. Información general.**

Los problemas de compatibilidad electromagnética en la industria colombiana es un tema que día a día toma más relevancia, debido principalmente a los problemas producidos por los armónicos, en el correcto funcionamiento de cada parte de la instalación, en especial respecto al tema de las protecciones eléctricas.

Como ya se ha mencionado, los filtros proporcionan una solución a la problemática que representa la contaminación armónica; permitiendo el adecuado funcionamiento de las protecciones eléctricas y mitigando parte de la incompatibilidad electromagnética de la instalación.

En esta parte del documento se dará a conocer un ejemplo real tomado de un fabricante de protecciones eléctricas reconocido a nivel internacional, respecto a un producto específico [31]. La solución fue aplicada en una empresa del área metropolitana de la ciudad de Bucaramanga dedicada a la extrusión de plástico para la fabricación de tubería de gas y agua de alta presión.

##### **4.1.3.2. Descripción de la problemática y perspectiva de la solución.**

En el proceso industrial desarrollado por esta empresa se utilizan equipos que generan en la instalación un alto contenido de armónicos. Debido a que la fuente de incompatibilidad electromagnética presente en la instalación tiene un origen interno, la mejor solución es la aplicación de un filtro y no la aplicación de prácticas

basadas en los dispositivos de desacoplamiento (ver literal 4.4), las cuales están dirigidas a mitigar interferencias externas.

El primer paso para la implementación de un filtro, es la recopilación y análisis de datos obtenidos a través de un analizador de redes, del cual es posible identificar la contaminación armónica por medio de la distorsión armónica total (THD), que permitirá calcular un valor de la corriente armónica presente en el sistema, la identificación de las componentes armónicas de mayor incidencia y el valor de mayor THD presentado en la instalación.

De acuerdo con la variación que se presenta en las magnitudes de las componentes armónicas y su influencia en el sistema, es posible concluir sobre la utilización de un filtro pasivo o filtro activo en la solución de dicha problemática.

#### **4.1.3.3. Recolección de datos.**

A continuación se presenta la tabla 4 y los datos referentes del estudio obtenido tras la aplicación de un analizador de redes durante un periodo de 30 días:

Tensión del sistema.	440 VAC
Corriente promedio.	480 A
THD en corriente.	30%
Energía reactiva consumida	150kVAR

***Tabla 4. Datos generales del sistema analizado.***

***Fuente: [31].***

En relación con los armónicos de mayor incidencia, no se logró identificar una tendencia clara, pues las magnitudes en las componentes armónicas varían en

forma significativa dependiendo de los equipos que operen en un instante determinado del proceso productivo.

#### **4.1.3.4. Análisis de datos y selección del tipo de filtro.**

Con la variación de las magnitudes de las componentes armónicas presentes en la instalación en diferentes instantes de tiempo, la mitigación a través de filtros pasivos no es viable porque habría que ubicar adicionalmente filtros que mitiguen las diferentes componentes armónicas presentadas en los diferentes instantes de tiempo.

Con base en lo anterior, es claro que la mejor solución de mitigación es la utilización de filtros activos, pues ellos pueden ajustarse automáticamente según las componentes armónicas presentes en la THD de la instalación.

Teniendo clara la utilización, se procede determinando el principal parámetro para la selección de un filtro activo, el cual es la corriente armónica de la instalación  $I_H$ , que se obtiene de la siguiente manera, con los datos tomados del analizador de redes:

$$I_H = \frac{I_{RMS}}{\sqrt{\frac{1}{THD_i^2} + 1}}$$

Dónde:

- $I_{RMS}$ : Corriente total de carga.
- $THD_i$ : Distorsión armónica total en corriente.
- $I_H$ : Corriente armónica.

Como se puede concluir, la elección del filtro activo se realiza por medio del dimensionamiento de la capacidad de inyección de corriente del filtro, que se realiza básicamente a partir de la corriente efectiva armónica. Adicionalmente la aplicación del filtro mencionado permite la compensación de la carga reactiva y con esto la corrección del factor de potencia.

## **4.2. NÚCLEOS DE FERRITA [30], [32].**

### **4.2.1. Información general.**

Los núcleos de ferrita<sup>97</sup>, son una clase de filtro que evita que las señales de las corrientes alternas de alta frecuencia circulen por los cables de uso informático y se expandan hacia el exterior como señales ruidosas de radiofrecuencia o ruidos parásitos. Estos se ensamblan en cables en forma de tubito en uno de los extremos (y a veces en los dos extremos cuando el caso lo requiere). De esa forma el tubito de ferrita se convierte en un “filtro inductor de alta reactancia o alta resistencia”, cuya función principal es ofrecer gran oposición al paso y propagación externa de determinadas altas frecuencias de corrientes alternas que se circulan por los cables.

Además de la forma tubular con la que cuenta el núcleo de ferrita ya explicado, existen otras formas de núcleos de ferrita como barras redondas, barras cuadradas y como anillos.

---

<sup>97</sup> “Ferrite Cores” en idioma inglés.

#### **4.2.2. Principio de funcionamiento.**

El principio de funcionamiento de este tipo de filtro con alta reactancia radica en que cuando las corrientes alternas de alta frecuencia tratan de atravesar la parte del cable donde se encuentra ubicado el núcleo de ferrita, la autoinductancia que produce el flujo magnético de la corriente que trata de atravesarlo genera una fuerza contraelectromotriz que se opone al paso de su componente alterna.

Sin embargo, este filtro no impide que la corriente directa (C.D.) o continua (C.C.), así como la corriente alterna de baja frecuencia lo atraviesen y puedan continuar fluyendo libremente por todo el cable y el resto del circuito electrónico.

Durante el proceso de filtrado de la corriente alterna de alta frecuencia, la energía contenida en la componente alterna que no puede atravesar el filtro, la absorbe el núcleo de ferrita en forma de calor. No obstante, la temperatura que alcanza la ferrita por ese motivo es muy poca y prácticamente no se hace notar [32].

En electrónica, los filtros de ferrita constituyen uno de los elementos pasivos más eficaces, sencillos y baratos de producir. Sin su empleo en los cables de uso informático, la propagación de las interferencias afectaría incluso, el funcionamiento de los computadores, introduciendo indeseables errores en el procesamiento de datos.

### **4.3. CONEXIONADO: REGÍMENES DE NEUTRO [33], [34]**

#### **4.3.1. Información general.**

El régimen de neutro<sup>98</sup> indica básicamente la forma en que el neutro del transformador (o de la fuente en el lado de baja tensión) será conectado a las masas de los diferentes equipos o cargas, teniendo como finalidad controlar los efectos de una falla de aislamiento en lo que a la protección de personas, bienes y disponibilidad del servicio eléctrico respecta.

La importancia de establecer el régimen de neutro o esquema de conexión a tierra del sistema eléctrico en cualquier instalación eléctrica de uso final, permitirá establecer sus ventajas y desventajas al momento de enfrentar problemas de Compatibilidad Electromagnética.

Según el conexionado, el sistema se indicará con dos o tres letras:

- ✓ **Primera letra:** Indica la forma en que está conectado el neutro del transformador o fuente con respecto a la tierra. Las letras representativas son:
  - T: Aterrizado directamente.
  - I: Aislado de la tierra o conectado a tierra a través de una alta impedancia.

---

<sup>98</sup> “Earthing Arrangements” en idioma inglés.

- ✓ **Segunda letra:** Indica la forma en que las masas metálicas de los equipos o cargas eléctricas están conectadas al sistema eléctrico. Las letras representativas son:
  - T: Masas conectadas directamente a tierra.
  - N: Masas conectadas directamente al neutro.
  
- ✓ **Tercera letra:** Se aplica sólo para sistemas TN, es decir, sistemas descritos por la combinación de la primera y segunda letra en la conexión del neutro, y refleja la forma en que está conectado el neutro (N) con el conductor de protección eléctrica (PE). Las letras representativas son:
  - S: N y PE son conductores separados (Single).
  - C: N y PE corresponden a un mismo conductor (Common).

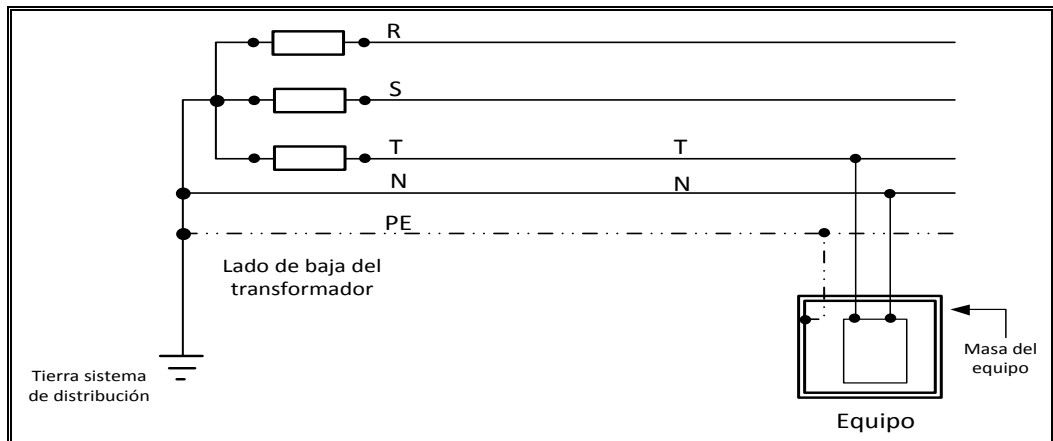
A continuación se hace una breve descripción de los diferentes regímenes del neutro, de acuerdo con la información anteriormente presentada. Igualmente, se suministrará información acerca de las ventajas y desventajas que representa la utilización de una u otra conexión.

#### **4.3.2. Conexión-Sistema TN.**

Este sistema es aquel en el que cuyo neutro del transformador en baja tensión está conectado directamente a tierra y las carcasas metálicas de las cargas están conectadas al neutro. Este sistema tiene tres variantes:

- ✓ **Sistema TN-S:** Sistema en el cual, el conductor del neutro (N) y el conductor de protección eléctrica (PE) son conductores separados. (Ver figura 48).

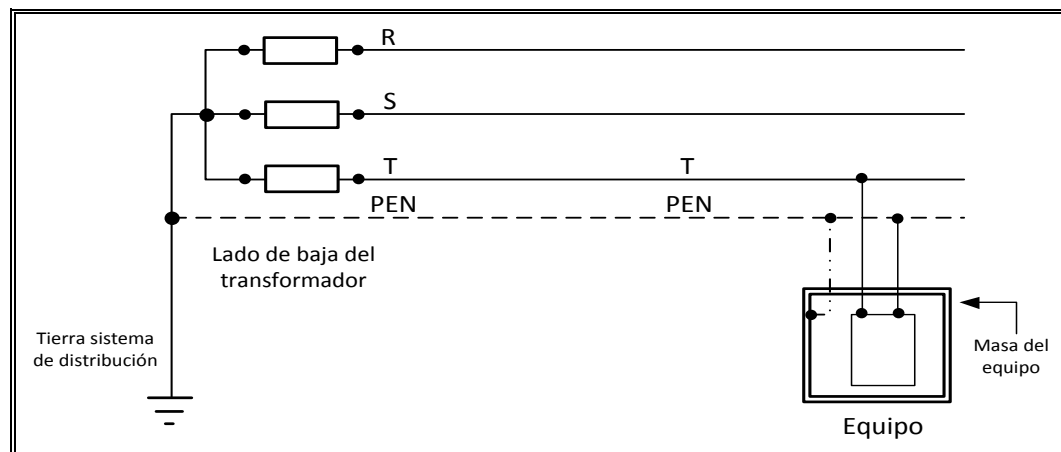
Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en el diseño de sistemas de protección contra rayos y coordinación de protecciones en instalaciones eléctricas de uso final.



**Figura 48. Conexionado-Sistema TN-S.**

**Fuente: [33], [34].**

- ✓ **Sistema TN-C:** Sistema en el cual, el conductor del neutro (N) y el conductor de protección eléctrica (PE) corresponden a un mismo conductor (PEN) (Ver figura 49).

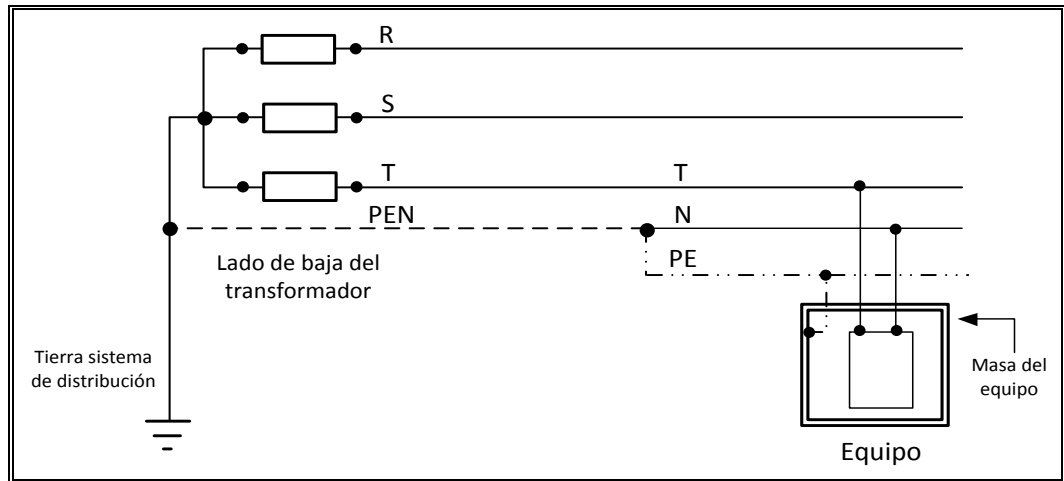


**Figura 49. Conexionado-Sistema TN-C.**

**Fuente: [33], [34].**

- ✓ **Sistema TN-C-S:** Sistema en el cual, el conductor del neutro (N) y el conductor de protección eléctrica (PE) arrancan del transformador en un solo conductor

(PEN) y luego se dividen en dos conductores (N y PE). Lo contrario no es válido (que aguas abajo de la instalación se vuelvan a unir dichos conductores formando uno solo) (Ver figura 50).



**Figura 50. Conexión Sistema TN-C-S.**

**Fuente: [33], [34].**

Ventajas del sistema TN.

- ✓ Los sistemas TN generalmente son los más económicos y requieren casi siempre de breakers convencionales.

Desventajas del sistema TN.

- ✓ Al primer defecto de aislamiento se dispara la protección.
- ✓ Los esquemas TN-C y TN-C-S son los menos recomendables frente a presencia de armónicos o frente a riesgo de incendios, ya que podrían presentarse caídas de tensión a lo largo del PEN<sup>99</sup> (tensión existente entre

---

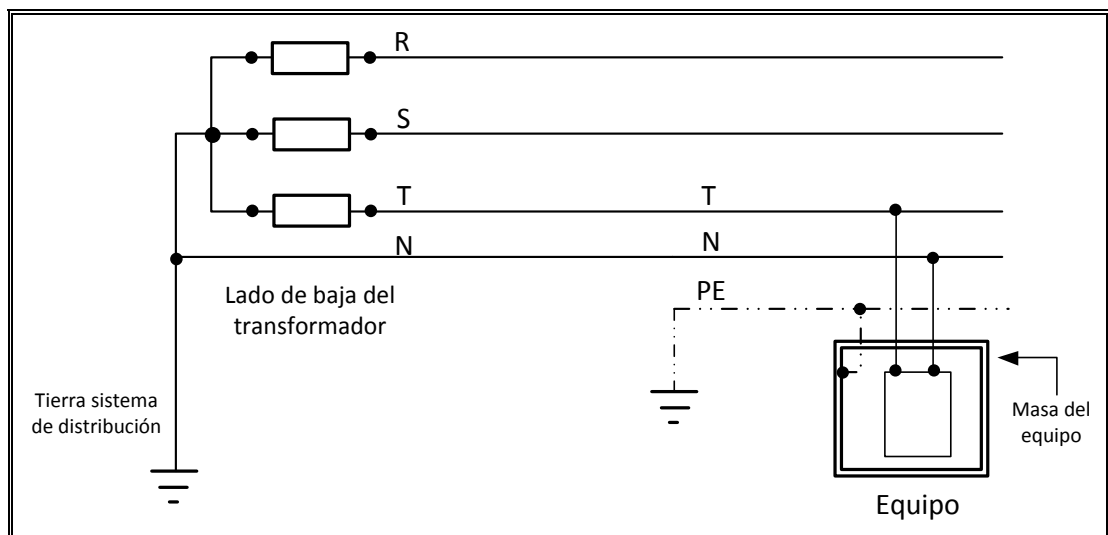
<sup>99</sup> Unico conductor en el que se combina el conductor del neutro y de protección eléctrica.

el neutro del transformador y la tierra) y presencia de corrientes parásitas en masas y blindajes.

- ✓ La falta de protección frente a defectos de aislamiento de baja corriente conocido también como fallo impedante, que podrían producir electrocución de seres humanos, incluyendo fibrilación ventricular (50mA) o incendios (500mA) sin que actúen las protecciones convencionales.
- ✓ Las elevadas corrientes de cortocircuito, por lo que es necesario establecer los cálculos de corrientes de cortocircuito y la capacidad de interrupción de los breakers.
- ✓ La utilización de protecciones diferenciales en sistemas TN-C sería obsoleta, debido a que el conductor PE y el N sería el mismo.

#### **4.3.3. Conexión sistema TT.**

Este sistema es aquel cuyo neutro del transformador en baja tensión y las carcasas metálicas de las cargas están conectados directamente a tierra de forma independiente. El seccionamiento del neutro es obligatorio (ver figura 51).



### **Figura 51. Conexión Sistema TT.**

**Fuente: [33], [34].**

Ventajas del sistema TT.

- ✓ Mejor equipotencialidad para aparatos de comunicación.
- ✓ Bajo valor de las corrientes de falla, incrementando la vida útil de los conductores y barras debido a la ausencia de mayores esfuerzos térmicos y electrodinámicos durante un cortocircuito, lo cual hace de este sistema uno de los mejores cuando existen cargas sensibles a elevadas corrientes de fallo (motores).

Desventajas del sistema TT.

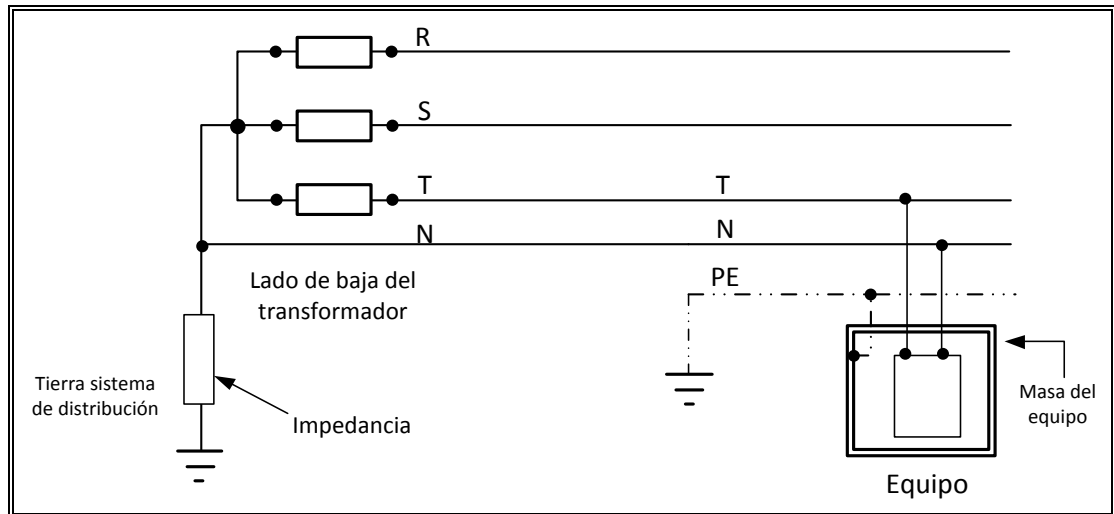
- ✓ La actuación de las protecciones frente al primer fallo de aislamiento. Este sistema requiere dispositivos de protección diferencial.

#### **4.3.4. Conexión sistema IT.**

Este sistema es donde no existe conexión directa entre el neutro del transformador y tierra, y las carcasas metálicas de las cargas están conectadas directamente a tierra.

Este tipo de sistemas son utilizados por las embarcaciones marítimas o aéreas y son obligatorios los limitadores de sobretensión (DPS) (Ver figura 52).

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.



**Figura 52. Conexión-Sistema IT.**

**Fuente: [33], [34].**

Ventajas del sistema IT.

- ✓ La confiabilidad en continuidad de servicio frente al primer defecto de aislamiento. Al estar el sistema activo del transformador “flotando”, la tierra aparece como un potencial ajeno al sistema eléctrico del transformador.
- ✓ Al primer contacto de una fase con tierra, esta fase adquiere el potencial de la tierra sin que las protecciones actúen manteniendo operativo el servicio eléctrico. Bajo esta circunstancia si una fase diferente hace contacto con la tierra deberá actuar la protección.

Desventajas del sistema IT.

- ✓ Se necesitan instalar supervisores de aislamiento que adviertan del primer fallo y lo localicen.

*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.*

A continuación en la tabla 5 se muestra en forma comparativa, las ventajas y desventajas que tiene un conexionado respecto a otro, en función de diversos parámetros relacionados con la calidad de la energía.

	<b>TT</b>	<b>TN-C</b>	<b>TN-S</b>	<b>IT</b>
Seguridad de las Personas	BUENA Es obligatorio un breaker en el circuito de fuga a tierra.	BUENA Actuar con precaución y comprobar la continuidad del conductor de PE cuando se realiza una ampliación de la instalación.		
Seguridad de la Propiedad	BUENA	MALA Corrientes extremadamente altas en el conductor PEN que pueden exceder los kA. Prohibida en ares peligrosas.	MALA Protección diferencial de 500 [mA].	BUENA Recomendada o por su inherente seguridad debido a la ausencia de formación de arcos.
Disponibilidad de la Energía	BUENA	BUENA	BUENA	MUY BUENA

Desempeño CEM	<p><b>BUENA</b></p> <p>El conductor PE no es muy largo, solo hay un único potencial de referencia para la instalación.</p> <p>Generalmente proporciona protección frente a rayos (líneas de transmisión). Necesidad de gestionar los equipos con altas corrientes de fuga aguas abajo de dispositivos de protección diferencial</p>	<p><b>MALA</b></p> <p>Flujo de corrientes de interferencia en las partes conductoras expuestas.</p> <p>Radiaciones de CEM que interfieren por el conductor PE.</p> <p>No recomendado si la instalación contiene aparatos que generan armónicos.</p>	<p><b>MUY BUENA</b></p> <p>Necesarias para equipos con altas corrientes de fuga locales, aguas abajo de los dispositivos de protección diferencial.</p> <p>Las altas corrientes de falla en el conductor PE (Interferencias inducidas).</p> <p>Tierra única.</p>	<p><b>MALA</b></p> <p>No compatible con el uso de filtros de modo común. Puede ser necesaria para dividir la instalación con el fin de reducir la longitud de los cables y mitigar las corrientes de fuga.</p> <p>El sistema TN para la segunda falla.</p>
------------------	---	---	--	--

**Tabla 5. Desempeño de los regímenes de neutro en relación a parámetros de calidad de la energía.**

**Fuente: [30].**

#### **4.4. DISPOSITIVOS DE DESACOPLAMIENTO [6], [35], [36].**

##### **4.4.1. Información general.**

Los dispositivos de desacoplamiento<sup>100</sup> actúan como una interfaz de aislamiento<sup>101</sup> entre la red de distribución y las cargas, evitando que las corrientes armónicas provenientes del exterior lleguen finalmente a los equipos en el interior de dicha instalación. Esto disminuye la posibilidad de un mal funcionamiento de las protecciones eléctricas y en general, aumentan la compatibilidad electromagnética de la instalación. Esta práctica muestra buenos resultados cuando la contaminación armónica presente en el funcionamiento de los equipos, es debida a corrientes armónicas externas de la instalación. Si por el contrario la contaminación armónica presente en el funcionamiento de los equipos es debida al mismo funcionamiento de éstos, es necesario aplicar otras prácticas que complementen la mitigación; como la aplicación de filtros en los equipos que producen dicha problemática.

La aplicación de los dispositivos de desacoplamiento se enfocará en dos clasificaciones:

- ✓ Dispositivos estáticos
- ✓ Dispositivos dinámicos

---

<sup>100</sup> "Decoupling Devices" en idioma inglés.

<sup>101</sup> "Isolating interfaces" en idioma inglés.

Los dispositivos estáticos son fabricados a partir de elementos de electrónica de potencia y bancos de batería, por ejemplo las UPS<sup>102</sup>; y los sistemas dinámicos son equipos constituidos principalmente por aparatos mecánicos, tales como volantes de inercia, motores y un generador eléctrico, como en el caso de una planta de emergencia.

Entre los principales dispositivos de desacoplamiento, tenemos:

- ✓ Conjunto motor-generador<sup>103</sup>.
- ✓ Moto-generador<sup>104</sup>.
- ✓ Sistema de alimentación ininterrumpida (UPS).

#### **4.4.2. Conjunto Motor-Generador.**

El dispositivo de desacoplamiento motor-generador es un dispositivo dinámico que aísla completamente la carga de la red de suministro por medio de un tipo de arreglo de unión mecánica, que impulsa el generador, que a su vez alimenta la carga y por lo tanto no hay conexión eléctrica entre el suministro y la carga.

Para garantizar el desacoplamiento eléctrico entre el conjunto motor-generador, es necesario proporcionar un eje no conductor para la unión mecánica de las máquinas.

Usualmente el conjunto motor-generador solo puede soportar las cargas durante un tiempo relativamente corto, tras la suspensión de la energía de la red. Esto se

---

<sup>102</sup> Sistema de alimentación ininterrumpida. “Uninterruptible power supplies” en idioma inglés.

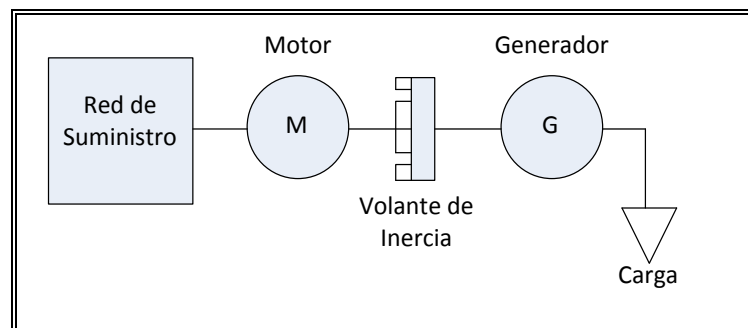
<sup>103</sup> “Motor-Generator Sets” en idioma inglés.

<sup>104</sup> “Engine Generators” en idioma inglés.

debe a que en caso de presentarse un microcorte o hueco de tensión instantáneo en el suministro eléctrico del motor, la única fuente de energía para el dispositivo es la energía de inercia de los componentes de rotación y la utilización de un volante de inercia, logrando cubrir éstas perturbaciones (microcorte o hueco de tensión instantáneo) de la señal, y de ésta manera evitar que los equipos eléctricos y electrónicos dentro de la instalación, no presenten fallas o pérdida de información debido a éstos fenómenos de corta duración.

La configuración más simple está dada a partir de un motor de corriente alterna conectada a la red de suministro, el cuál proporciona la energía mecánica al generador y aun volante de inercia. El generador es quien alimenta la carga y el volante de inercia es el encargado de la velocidad del conjunto motor-generador. En la figura 53 se muestra un esquema referente a dicha configuración.

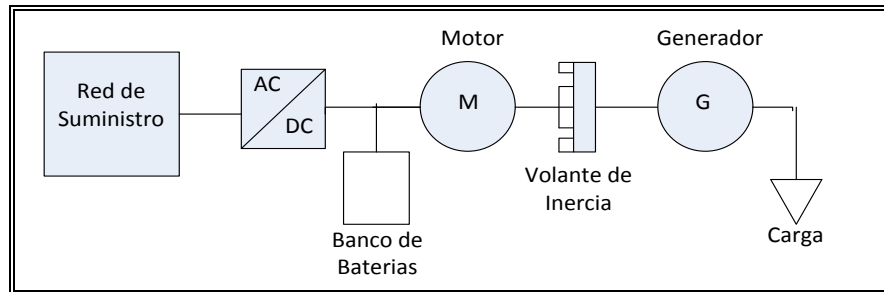
Otra configuración de éste mismo dispositivo, se presenta cuando la energía proveniente de la red de suministro pasa a través de un rectificador, transformando la onda de corriente alterna a continua, para luego alimentar un motor de corriente continua, que al igual que el caso anterior, alimenta el generador conectado a la carga. En la figura 54 se muestra un esquema referente a dicha configuración.



**Figura 53. Dispositivo de desacoplamiento dinámico - Configuración básica.**

**Fuente: [36].**

*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.*



**Figura 54. Dispositivo de desacoplamiento dinámico. Configuración con banco de baterías.**

**Fuente: [36].**

#### **4.4.3. Moto-Generador.**

El dispositivo de desacoplamiento moto-generador es un dispositivo dinámico que no depende en absoluto del servicio público local. Este equipo está formado por un motor y un generador. El motor acciona un generador que suministra energía eléctrica a las cargas. La energía para el motor principal es generada por medio de una forma de combustible fósil, por ejemplo diesel.

Con frecuencia, los moto-generadores se utilizan como un respaldo de emergencia para asegurar la continuidad del servicio público. Una consideración económica, importante en estos casos, es saber si es necesaria una transición sin interrupciones del servicio público al servicio del generador de motor. Si tal transición es deseable, entonces deben tomarse disposiciones para detectar cuando el servicio no es suministrado, para que el generador motor pueda ponerse en marcha y las cargas cambien o conmuten de suministro. Cabe señalar que los moto-generadores requieren de ventilación para su funcionamiento.

#### **4.4.4. Sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS<sup>105</sup>)**

La UPS, es un dispositivo estático, que usan baterías como fuente de energía de emergencia, si la tensión del suministro cae por debajo de ciertas magnitudes preestablecidas. El periodo de tiempo que los dispositivos UPS pueden soportar la carga dependen de la demanda y del tamaño del banco de baterías asociado. Hay dos enfoques genéricos de diseño para configuraciones de UPS, usualmente se refiere a UPS off-line y UPS on-line.

- ✓ Las UPS off-line, permiten el suministro de energía de la red eléctrica cuando el suministro no presenta ninguna anomalía. Cuando se detectan anomalías en el suministro de energía, la UPS asume la alimentación de la carga.
- ✓ Las UPS on-line, en condiciones normales la alimentación de la carga se da a través de la UPS y solo se conectará al suministro de energía eléctrica cuando la UPS presente algún tipo de falla o daño.

---

<sup>105</sup> Sistemas de alimentación ininterrumpida. En la norma IEC 62305-4:2008 se define como Uninterruptible Power Supply

## 5. GLOSARIO.

Para propósitos de este documento, se aplicarán los siguientes términos, y el equivalente en el idioma inglés, junto con una corta definición, los cuales fueron tomados de las normas NTC 4553-3:2008, IEC 62305-4:2010 y la IEC TR 61000-3-2:2009.

### **Aparato (Apparatus).**

Combinación de dispositivos terminales (o equipos) con una función intrínseca definida por el usuario final y destinadas a ser colocadas en el mercado como una unidad comercial única.

### **Barra de equipotencialización (Bonding bar).**

Barra metálica en la cual las instalaciones metálicas, partes conductoras externas, líneas eléctricas y de telecomunicaciones y otros cables pueden ser equipotencializados.

### **Blindaje (Shield).**

Dispositivo destinado a reducir la penetración de un campo eléctrico magnético o electromagnético en una región determinada, o para separar los circuitos eléctricos. Un blindaje es usado cuando está destinada una barrera mecánica.

### **Blindaje efectivo contra CEM (Shielding effectiveness, EMC).**

Para una determinada fuente externa, la relación de intensidad eléctrica o magnética en un punto antes o después de la colocación del blindaje en cuestión.

### **Blindar (Shielding).**

Acto de reducción de la magnitud del campo eléctrico o magnético proporcionado por un buen conductor eléctrico.

### **Blindaje espacial en forma de cuadrícula (Spatial Shielding grid-Like).**

Blindaje magnético caracterizado por aberturas de tipo cuadrado.

NOTA: Para un edificio o una habitación es preferible construirla por interconexión de los componentes metálicos naturales de la estructura (ej., varillas de refuerzo en el concreto, marcos metálicos y soportes metálicos).

### **Compatibilidad Electromagnética – CEM (Electromagnetic compatibility – EMC).**

Es la armonía que se presenta en un ambiente electromagnético, en el cual operan satisfactoriamente equipos eléctricos y electrónicos.

**Componente natural de un SIPRA (Natural components LPS).**

Componente conductivo instalado, no específicamente, para protección contra rayo, el cual puede ser usado junto con el SIPRA o en algunos casos puede proveer la función de uno o más partes de un SIPRA.

**Conductor de protección eléctrica – PE (Protective earth conductor).**

Conductor que sirve para unir eléctricamente las masas de una instalación, con el fin de asegurar la protección contra contactos indirectos.

**Dispositivo (Device).**

Combinación de componentes que tienen una función determinada, formando parte de la pieza de un equipo, aparato o sistema.

NOTA: Por ejemplo, termostatos, relés, pulsadores, interruptores o contactores.

**Dispositivo de protección contra “surges” – DPS (Surge protective device – SPD).**

Dispositivo destinado a limitar sobretensiones transitorias y desviar picos de corriente; contiene por lo menos un componente no lineal. La palabra “surge” es definida en la página 20 del Glosario.

**Equipo (Equipment).**

Termino general para aparato, dispositivo, sistema, etc.

**Filtro (Filter).**

Dos puertos de red que transmiten las señales de baja atenuación en todas las frecuencias dentro de una o más bandas de frecuencia y con una alta atenuación en todas las otras frecuencias.

**HEMP (High altitude electromagnetic pulse).**

Elevado impulso electromagnético.

**Impulso electromagnético tipo rayo – IER (Lightning electromagnetic impulse – LEMP).**

Corresponde a todos los efectos electromagnéticos de la corriente del rayo a través del acoplamiento resistivo, inductivo y capacitivo que crean “surges” y campos electromagnéticos.

**Instalación – estructura (Facility).**

Entidad (como hospitales, fábricas, etc.) que es edificado, construido, instalado o establecido para realizar alguna función particular, servicio o facilitar un fin particular.

**Instalación eléctrica (Electrical installation).**

Varios elementos combinados de aparatos o sistemas, puestos juntos en un lugar para alcanzar un objetivo específico, pero no destinados a ser puestos en servicio como una unidad funcional.

**Interferencia electromagnética – IE (Electromagnetic interference – EMI).**

Degradación del funcionamiento de un equipo, canal de transmisión, o sistema causado por una perturbación electromagnética.

**Interfaces de aislamiento (Isolating interfaces).**

Dispositivos que son capaces de reducir las “surges” conducidas sobre las líneas que entran a una ZPR.

NOTA: Esto incluye transformadores de aislamiento con pantalla puesta a tierra entre los devanados, metales-libres, cables de fibra óptica y opto-aisladores.

NOTA: Las características de aislamiento que soportan estos dispositivos son adecuadas para ésta aplicación intrínsecamente o por medio de DPS.

**Medidas de protección contra IER – MPR (Protection measures against LEMP).**

Medidas tomadas para proteger sistemas internos contra los efectos de IER.

NOTA: Esto corresponde a otra parte de la protección contra rayos en general.

**Nivel de protección contra el rayo – NPR (Lightning protection level – LPL).**

Medida de protección que relaciona una serie de parámetros relevantes de la corriente del rayo, asociada a la probabilidad de que el máximo y mínimo valor de diseño no sean excedidos por un rayo en condiciones naturales.

NOTA: El nivel de protección contra el rayo es usado para diseñar medidas de protección de acuerdo con el conjunto de parámetros relevantes de la corriente del rayo.

**Perturbación electromagnética (Electromagnetic disturbance).**

Cualquier fenómeno electromagnético que puede degradar el funcionamiento de un dispositivo, equipo o sistema, o afectar negativamente a la materia viva o inerte.

NOTA: Una perturbación electromagnética puede ser un ruido electromagnético, una señal no deseada o un cambio en su medio de propagación.

**Protección contra rayos – PR (Lightning protection – LP).**

Sistema completo para la protección de estructuras y/o sistemas eléctricos o electrónicos en éstas estructuras contra los efectos del rayo, que consiste de un SIPRA y MPR.

**Recinto blindado (Shielded enclosure - Screened room).**

Malla o hoja metálica diseñada expresamente para proporcionar una separación electromagnéticamente de entornos interiores y exteriores.

**Red de equipotencialización – RE (Bonding network).**

Conexión de la red mediante la unión de todas las partes conductoras de la estructura y de los sistemas internos (excluyendo los conductores vivos) a el terminal del sistema de puesta a tierra.

**Sistema coordinado de DPS (Coordinated SPD system).**

Corresponden al sistema donde los DPS son correctamente seleccionados, instalados y coordinados para formar un sistema que pretende reducir las fallas de los sistemas eléctricos y electrónicos.

**Sistema de protección contra rayos – SIPRA (Lightning protection system – LPS).**

Sistema usado para reducir el daño físico debido a descargas atmosféricas sobre la estructura.

NOTA: Este sistema está compuesto de ambos sistemas de protección contra el rayo, interno y externo.

**Sistema completo de puesta a tierra. (Complete earthing system - CES).**

Sistema completo que combina el electrodo del sistema de puesta a tierra y la red de equipotencialización.

**Sistema eléctrico (Electric system).**

Sistema que incorpora componentes de alimentación de baja tensión para este caso.

**Sistema electrónico (Electronic system).**

Sistemas que incorporan componentes electrónicos sensibles, tales como equipos de telecomunicación, computadores, sistemas de control de instrumentos, sistemas de radio, instalaciones de electrónica de potencia.

**Sistemas internos (Internal systems).**

Sistemas eléctricos y electrónicos dentro de una estructura.

**Surge.**

Transitorio creado por un impulso electromagnético que aparece como una sobretensión y/o sobrecorriente.

**Terminal del Sistema de puesta a tierra (Earth-termination system).**

Parte de un sistema externo de SIPRA que tiene por objeto conducir y dispersar la corriente del rayo en la tierra.

*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.*

**Unión equipotencial del rayo – UER (Lightning equipotential bonding - LEB).**

Unión que permite equipotencializar partes conductoras que se encuentran en los alrededores y al interior de la estructura para evitar diferencias de potenciales peligrosos.

**Zonas de protección contra el rayo – ZPR (Lightning protection zone – LPZ).**

Zona donde es definido el entorno electromagnético del rayo.

NOTA: Las fronteras entre las zonas de una ZPR no son necesariamente límites físicos (ej., paredes, pisos y techos)

## **6. CONCLUSIONES.**

- La compatibilidad electromagnética (CEM) es un tema que actualmente presenta gran importancia en el adecuado funcionamiento de una instalación eléctrica y del cual se espera una mayor incidencia a futuro, debido a la proliferación de cargas no lineales y equipos sensibles en muchas de las actividades humanas, donde se encuentran desde las simples aplicaciones domésticas, hasta los complejos sistemas de control presentes en la industria. Por lo tanto, la contemplación de parámetros que inciden en la CEM es una necesidad latente, especialmente en instalaciones con equipamiento electrónico sensible, de alto costo o de funcionamiento trascendental, como los presentados en equipos hospitalarios y procesos en los que fallas en el funcionamiento de un aparato genera grandes pérdidas económicas.
- Las consideraciones de los efectos provocados por el IER, deben ser tenido en cuenta desde el momento en que se realice el diseño civil y eléctrico de la edificación, pues esto permitirá reducir los costos representados en la pérdida de equipos, la salida de funcionamiento de los sistemas eléctricos y electrónicos y los rediseños necesarios para mitigar dichas perturbaciones en instalaciones ya construidas, además si se desea la utilización del acero estructural como blindaje de una ZPR, los cimientos de la estructura como electrodo de puesta a tierra y aplicar un adecuado enrutamiento de los conductores de la instalación, solo será viable tanto económica como técnicamente la contemplación de dichas medidas desde el diseño y durante la construcción, pero no como mediadas a ser tenidas en cuenta para un rediseño de una edificación ya construida.

- El Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), que es el documento reglamentario más importante en Colombia respecto al diseño de una instalación eléctrica de uso final, contempla para la CEM lo consignado en el artículo 6º, limitándose a definir sus elementos básicos y abordando el tema desde una perspectiva muy general. Ahora bien, al revisar los temas del sistema de protección contra rayos y la coordinación de protecciones a través de las recomendaciones normativas del RETIE como son: la NTC 4552 y la NTC 2050, tampoco se logra identificar información que pueda ser útil para el diseñador durante la ejecución de su trabajo.
- Las normas desarrolladas a nivel internacional, proporcionan una gran cantidad de información en cuanto a la definición del problema, los parámetros que intervienen en la CEM y sobre todo las formas en que dichas perturbaciones pueden llegar a ser mitigadas, como es el caso de la IEC 62305-4, norma que se utilizó para desarrollar el tema de los sistemas de protección contra rayos y la IEC 61000-5-6 utilizada para el caso de la coordinación de protecciones, que son la base normativa del desarrollo de este documento, y en las cuales es posible identificar buenas prácticas de ingeniería, que al ser aplicadas en una instalación eléctrica permitirán una disminución de los parámetros generadores de incompatibilidad electromagnética presentes en la instalación.
- La elaboración de un diseño de conformidad con el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas y más específicamente con el diseño de sistemas de protección contra rayos, correspondientes a la serie NTC 4552, no garantiza el buen funcionamiento de los sistemas eléctricos y electrónicos,

pues no se tiene en cuenta los efectos provocados por el Impulso electromagnético del rayo (IER) sobre una instalación y la inminente incompatibilidad electromagnética que esto representa debido a las “surges” (sobretensiones y sobrecorrientes) y al campo electromagnético que incide sobre la instalación.

- La influencia de la CEM, respecto a la coordinación de las protecciones eléctricas, radica principalmente en el funcionamiento de las protecciones, debido a distorsión armónica de la señal de corriente proveniente tanto del exterior de la instalación como del interior de la misma, generando funcionamientos erráticos en estos dispositivos. Por tal razón, al disminuir la distorsión armónica es posible garantizar el buen funcionamiento de las protecciones, ya que estas, van a estar sujetas a las condiciones de una señal libre de armónicos, criterio bajo el cual están diseñados dichos dispositivos.
- La coordinación de DPS's, los blindajes, la equipotencialización y el enrutamiento de los conductores propios de la instalación, constituyen las principales medidas de protección contra el impulso electromagnético del rayo (IER) y por ende las principales prácticas que permiten alcanzar la CEM de la instalación en relación a la protección contra rayos. Las medidas de protección están basadas en la aplicación de zonas de protección (ZPR), las cuales son diseñadas en función del nivel de protección contra rayo (NPR), en donde el diseñador debe garantizar un nivel de compatibilidad electromagnética aceptable para cada zona de la instalación, respecto a la sensibilidad de los aparatos y equipos incluidos en su interior.

- Los sistemas alternativos en relación con la protección contra rayos, muestran un panorama muy prometedor porque eliminan muchos de los fenómenos relacionados con el IER, debido al cambio en la concepción de la problemática, respecto a la forma de contrarrestar las descargas atmosféricas, pasando de un concepto de protección a un concepto de prevención, en donde se busca drenar en pequeñas cantidades la energía almacenada en una nube de tormenta, evitando de esta manera la formación del rayo y el hecho de tener que mitigar las perturbaciones conducidas e inducidas por dicho fenómeno sobre la instalación.
- Los dispositivos de desacoplamiento, permiten la creación de una interfaz de aislamiento entre el sistema de suministro de energía y la instalación eléctrica, eliminando las posibles perturbaciones que provienen del sistema de distribución. Entre los principales dispositivos de desacoplamiento se destaca la utilización de UPSs y el conjunto motor generador, los cuales reciben la alimentación de la red de suministro de energía, pero que a través de un arreglo electrónico y mecánico respectivamente, crean una señal libre de la contaminación armónica y cualquier otra perturbación conducida por la red que pueda llegar a tener una incidencia negativa sobre el funcionamiento de las protecciones.
- Cuando la perturbación armónica presente en la instalación no solamente es de origen externo, sino que además se genera internamente debido a la presencia de cargas no lineales en la instalación, la mitigación de dicha problemática debe estar basada en la utilización de filtros en la instalación, los cuales pueden estar diseñados para eliminar ciertas frecuencias armónicas, como es el caso de los filtros pasivos o pueden presentar un diseño, en el que su funcionamiento está establecido para un rango más

*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.*

amplio de frecuencias como en el caso de los filtros activos, los cuales se ajustan según la variación en la contaminación armónica presente en la instalación.

## **7. RECOMENDACIONES.**

- La importancia de la compatibilidad electromagnética en el correcto funcionamiento de los sistemas eléctricos y electrónicos, junto con el crecimiento de su influencia; motiva a que se desarrollen trabajos investigativos como éstos, en los que se estudie sus fenómenos relacionados, la forma como afectan los equipos y las prácticas que podrían aplicarse para lograr su mitigación. Así mismo, implementar estrategias de divulgación masiva que permitan la aplicación de estos conocimientos en el sector eléctrico colombiano, permitiendo que dicha información no quede confinada a un estricto desarrollo académico.
- Desarrollar trabajos investigativos en relación a las tecnologías emergentes respecto a la protección contra rayos, representadas en los pararrayos desionizadores de carga electrostática PDCE y los pararrayos de punta energizada, permitirá tener una mejor comprensión de su funcionamiento y determinar la viabilidad de reemplazar los sistemas convencionales de captación.
- La utilización de un motogenerador es una solución al problemas de armónicos que inciden desde la red de distribución, ya que elimina completamente la dependencia de la instalación de dicho sistema de suministro de energía; la desventaja de ésta práctica, es el costo del combustible necesario para impulsar el motor, que le proporciona el torque mecánico al generador, que pasa a suministrar la energía eléctrica a la instalación.

- En relación a costos, la aplicación de filtros pasivos representan una inversión mucho menor en comparación con los filtros activos, por tanto si en la instalación eléctrica se tienen identificados los armónicos de mayor impacto, se puede decir que la mejor solución para dicha problemática es la utilización de filtros pasivos, pero si por el contrario la contaminación armónica presente en la instalación es muy variable en su estructura armónica, la mejor solución para ésta problemática, es la proporcionada por la utilización de filtros activos, en los que ya existe la posibilidad de un control del factor de potencia de la instalación.

## **8. REFERENCIAS.**

[1].Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE). Ministerio de Minas y Energía. Resolución No. 18 1294 Agosto 06 de 2008.

[2].“Compatibilidad Electromagnética”. Tomado de Torres, H., Barreto, L “Las perturbaciones electromagnéticas” Revista Innovación y Ciencia, Volumen V, No. 2, 1996, pp. 30-37, Bogotá.

Disponible en:  
[www.paas.unal.edu.co/investigacion/documentos/CEM%20para%20pagina%20web.doc](http://www.paas.unal.edu.co/investigacion/documentos/CEM%20para%20pagina%20web.doc)

[3].López A., Marcuello J., Plaza I., Medrano C., “Compatibilidad Electromagnética-Conceptos básicos” Universidad de Zaragoza, 2007, España.

Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/65756673/cem>

[4].Izquierdo G. E., Patier C. C., “La responsabilidad social corporativa y la compatibilidad electromagnética”. Revista de administração mackenzie . Volumen 8, n. 2, 2007, p. 85-103. Universidad Presbiteriana Mackenzie. Madrid-España.

Disponible en:  
[www3.mackenzie.br/editora/index.php/RAM/article/download/124/124](http://www3.mackenzie.br/editora/index.php/RAM/article/download/124/124)

[5].Cidrás J., Carrillo C., “El fenómeno del parpadeo”. Dpto. Ingeniería Eléctrica Universidad de Vigo.

Disponible en:  
[http://webs.uvigo.es/carrillo/publicaciones/Apuntes\\_Flicker\\_prot.pdf](http://webs.uvigo.es/carrillo/publicaciones/Apuntes_Flicker_prot.pdf)

[6]. Norma IEC TR 61000-5-6:2002, Ed 1, “Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-6: Installation and mitigation guidelines – Mitigation of external EM influences”.

[7]. W. Langguth., “Basic Principles of Physics for Electromagnetic Compatibility (EMC) and their Application to Electrical Installations in Buildings”, 2004, University of Applied Sciences.

Disponible

en:

[http://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.htw-saarland.de%2Fforschung%2Ffakten%2Fberichte%2Fingwi%2Farchiv-forschungsberichte-der-ingenieurwissenschaft%2Fipqi\\_langguth\\_2004.pdf%2Fdownload&ei=G1-ZT4Xblork9ASM9ZCMBg&usg=AFQjCNHqLyPwu63BerR4Plg1qa3MX-HccA&sig2=inMKqahY2bmdKB-WvvCARw](http://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.htw-saarland.de%2Fforschung%2Ffakten%2Fberichte%2Fingwi%2Farchiv-forschungsberichte-der-ingenieurwissenschaft%2Fipqi_langguth_2004.pdf%2Fdownload&ei=G1-ZT4Xblork9ASM9ZCMBg&usg=AFQjCNHqLyPwu63BerR4Plg1qa3MX-HccA&sig2=inMKqahY2bmdKB-WvvCARw)

[8]. “Puesta a tierra y compatibilidad electromagnética de los sistemas de automatización - Fundamentos y medidas - Manual de usuario”. Schneider Electric. 2004.

Disponible

en:

<http://isa.uniovi.es/~alonsog/Logica%20cableada/Puesta%20a%20tierra%20y%20compatibilidad%20electromagn%20tica%20de%20los%20sistemas%20de%20automatizaci%20n.pdf>

[9]. “Problemas asociados a la energía eléctrica”. ENERGEX. Bogotá-Colombia. Disponible en: <http://www.energex.com.co/pdf/problemasenergia.pdf>

- [10].Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG)-Resolución No. 024:2005.
- [11].Norma NTC 5000:2002, “Calidad de la potencia eléctrica (CPE) – Definiciones y términos fundamentales”.
- [12].Prof. Dr. rer nat Wolfgang Langguth, “Guía de Calidad de la Energía Eléctrica - Puesta a tierra y Compatibilidad Electromagnética - Fundamentos de la Compatibilidad Electromagnética (EMC)”. 2006.  
Disponible en: [http://www.leonardo-energy.org/espanol/lee-guia\\_calidad/Guia%20Calidad%206-5-1%20Puesta%20a%20Tierra%20-%20Construccion.pdf](http://www.leonardo-energy.org/espanol/lee-guia_calidad/Guia%20Calidad%206-5-1%20Puesta%20a%20Tierra%20-%20Construccion.pdf)
- [13].Lejarraga A. B., Tesis de máster – “Minimización de los efectos de las perturbaciones eléctricas en los procesos industriales”, 2008, Universidad Pontificia Comillas, Madrid – España.  
Disponible en: <http://www.iit.upcomillas.es/docs/TM-06-006.pdf>
- [14].Chapman D., “Guía de Calidad de la Energía Eléctrica - Costes – El coste de una mala calidad de la energía”. 2001.  
Disponible en: [http://www.leonardo-energy.org/espanol/lee-guia\\_calidad/Guia%20Calidad%202-1%20Costes.pdf](http://www.leonardo-energy.org/espanol/lee-guia_calidad/Guia%20Calidad%202-1%20Costes.pdf)
- [15].“Descargadores pararrayos y de sobretensiones”, SIEMENS.  
Disponible en:  
<http://www.velayoselectricidad.com.ar/files/Descargadores%20de%20sobretension.pdf>

- [16].Chapman D., “Guía de Calidad de la Energía Eléctrica - Armónicos – Causas y efectos”. 2001.  
Disponibile 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)
- [17].Norma IEC 62305-4:2010, Ed. 2.0, “Protection against lightning – Part 4: Electrical and electronic systems within structures”.
- [18].Norma IEC TR 61000-5-2:1997, Ed 1, “Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-2: Installation and mitigation guidelines – Earthing and cabling”.
- [19].Norma NTC 4552-3:2008, “Protección contra descargas eléctricas atmosféricas (RAYOS) – Part 3: Daños físicos a estructuras y amenazas a la vida”.
- [20]. “Protección eléctrica de instalaciones”, ERICO International Corporation.  
Disponibile en: <http://www.ericom.com/public/library/fep/LT1051.pdf>
- [21].Casas F., “Tierras: Soporte de la seguridad eléctrica” Ed.3., 2005. Editorial ICONTEC, Bogotá – Colombia.
- [22].Balcells J., “Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos”, 1992. Marcombo ed. Barcelona.

[23]. Norma IEC 61643-1:2005, “Low voltage surge protective devices – Part 1: Surge protective devices connected to low voltage power distribution systems – Requirements and tests”.

[24]. Norma IEC 62305-1:2010, Ed. 2.0, “Protection against lightning – Part 1: General principles”.

[25]. Norma IEC 61643-12:2002, “Low voltage surge protective devices – Part 12: Surge protective devices connected to low voltage power distribution systems – Selection and application principles”.

[26]. “Nueva tecnología en pararrayos – Pararrayos Desionizador de Carga Electrostatica” Atech sas. Francia.

Disponible en: <http://www.amawebs.com/storage/docs/h44br36ajtb.pdf>

[27]. “Pararrayos Desionizadores, un nuevo concepto de protección del rayo.”, INT.

Disponible en: [www.pararrayos.info](http://www.pararrayos.info)

[28]. “Ficha Técnica producto: PARARRAYOS PDCE” INT.

Disponible en: <http://www.int-sl.ad/imatges/documents/DOCTECNIC2308ESV3-3-.pdf>

[29]. “Drenador de sobretensiones por dispersión”, Hidrocol & Cia Ltda. C.I. Bogotá – Colombia.

Disponible en: <http://www.calameo.com/books/0002198342237038abdcb>

[30]. “Electromagnetic Compatibility (EMC) – Practical Installation guidelines”,  
Groupe Schneider.

Disponible en: [http://www.global-download.schneider-electric.com/mainRepository/EDMS\\_CTRY1.nsf/69f5d72c7a0cf811c12573d800389503/08a983a61b17c5e98525769300691e0d/\\$FILE/Electromagnetic%20compatibility%20EMC%20\(deg999gb\).pdf](http://www.global-download.schneider-electric.com/mainRepository/EDMS_CTRY1.nsf/69f5d72c7a0cf811c12573d800389503/08a983a61b17c5e98525769300691e0d/$FILE/Electromagnetic%20compatibility%20EMC%20(deg999gb).pdf)

[31]. “AccuSine – Filtro activo de armónicos”, Schneider Electric de Colombia S.A.

Disponible en: <http://www.schneider-electric.com.co/documents/local/Accusine.pdf>

[32]. García Álvarez J., “Qué son esos cilindros visibles en algunos cables del ordenador”, AF, Madrid – España.

Disponible en: [http://www.asifunciona.com/respuestas/respuesta\\_8/respuesta\\_8b.htm](http://www.asifunciona.com/respuestas/respuesta_8/respuesta_8b.htm)

[33]. “Regímenes de neutro”, SOPORTE TECNICO SIEMENS.

Disponible en: <http://jngdelecuador.com/Sitec%2013%20final.pdf>

[34]. Ing. Cediél Gómez P., “Coordinación de protecciones BT”, Schneider Electric de Colombia S.A.

Disponible en: <http://www.schneider-electric.com.co/documents/press-release/coordinacin-de-protecciones-bt.pdf>

[35]. Arias Pérez M., Tesis doctoral, “Mejoras tecnológicas para sistemas de alimentación ininterrumpida: disminución de los tiempos de transferencia y

desarrollo de un nuevo sistema de paralelizado de bajo coste”, 2010, Universidad de Oviedo, Gijón – España.

Disponible en:  
[http://pels.edv.uniovi.es/pels/pels/Pdf/Tesis/Tesis\\_Manuel\\_Arias.pdf](http://pels.edv.uniovi.es/pels/pels/Pdf/Tesis/Tesis_Manuel_Arias.pdf)

[36]. Robles R., “Propuesta metodológica para la evaluación e instalación de Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAIs) de gran potencia”, 2004, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona – España.

Disponible en:  
<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/2690/1/36100-1.pdf>

[37]. “Biblioteca protección integral”.

Disponible en:  
<http://protegerintegral.tech.officelive.com/Documents/Biblioteca%20Proteccion%20Integral.pdf>

[38]. Blitzplaner, “Manual de Protección contra rayos”, 2007.

Disponible en: [http://www.dehn.es/es/servicio/dl\\_blitzplaner.shtml](http://www.dehn.es/es/servicio/dl_blitzplaner.shtml)

[39]. Avendaño Carlos A., Ibañez Henry F., “Selección de DPS’s en sistemas eléctricos de baja tensión altamente expuestos a descarga eléctricas atmosféricas”, Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”, Bogotá-Colombia.

Disponible en:  
[http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/gipud/produccion\\_archivos/dps.pdf](http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/gipud/produccion_archivos/dps.pdf)

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

ARIAS PÉREZ M., Tesis doctoral, “Mejoras tecnológicas para sistemas de alimentación ininterrumpida: disminución de los tiempos de transferencia y desarrollo de un nuevo sistema de paralelizado de bajo coste”, 2010, Universidad de Oviedo, Gijón – España.

ATECH SAS. “Nueva tecnología en pararrayos – Pararrayos Desionizador de Carga Electrostática” Francia.

AVENDAÑO CARLOS A., IBAÑEZ HENRY F., “Selección de DPS’s en sistemas eléctricos de baja tensión altamente expuestos a descarga eléctricas atmosféricas”, Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”, Bogotá-Colombia.

BALCELLS J., “Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos”, 1992. Marcombo ed. Barcelona.

BLITZPLANER, “Manual de Protección contra rayos”, 2007.

CASAS F., “Tierras: Soporte de la seguridad eléctrica” Ed.3., 2005. Editorial ICONTEC, Bogotá – Colombia.

CHAPMAN D., “Guía de Calidad de la Energía Eléctrica - Armónicos – Causas y efectos”. 2001.

CHAPMAN D., “Guía de Calidad de la Energía Eléctrica - Costes – El coste de una mala calidad de la energía”. 2001.

*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.*

CIDRÁS J., CARRILLO C., “El fenómeno del parpadeo”. Dpto. Ingeniería Eléctrica  
Universidad de Vigo.

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS (CREG)-Resolución No.  
024:2005.

DR. RER NAT WOLFGANG LANGGUTH, “Guía de Calidad de la Energía Eléctrica  
- Puesta a tierra y Compatibilidad Electromagnética - Fundamentos de la  
Compatibilidad Electromagnética (EMC)”. 2006.

ERICO. “Protección eléctrica de instalaciones”, International Corporation.

GARCÍA ÁLVAREZ J., “Qué son esos cilindros visibles en algunos cables del  
ordenador”, AF, Madrid – España.

HIDROCOL & CIA LTDA. C.I. “Drenador de sobretensiones por dispersión”,  
Bogotá – Colombia.

IEC TR 61000-5-2:1997, Ed 1, “Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-2:  
Installation and mitigation guidelines – Earthing and cabling”.

IEC TR 61000-5-6:2002, Ed 1, “Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-6:  
Installation and mitigation guidelines – Mitigation of external EM influences”.

IEC 61643-1:2005, “Low voltage surge protective devices – Part 1: Surge  
protective devices connected to low voltage power distribution systems –  
Requirements and tests”.

*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.*

IEC 61643-12:2002, “Low voltage surge protective devices – Part 12: Surge protective devices connected to low voltage power distribution systems – Selection and application principles”.

IEC 62305-1:2010, Ed. 2.0, “Protection against lightning – Part 1: General principles”.

IEC 62305-4:2010, Ed. 2.0, “Protection against lightning – Part 4: Electrical and electronic systems within structures”.

ING. CEDIEL GÓMEZ P., “Coordinación de protecciones BT”, Schneider Electric de Colombia S.A.

INT. “Pararrayos Desionizadores, un nuevo concepto de protección del rayo”.

INT. Ficha Técnica producto: PARARRAYOS PDCE”.

IZQUIERDO G. E., PATIER C. C., “La responsabilidad social corporativa y la compatibilidad electromagnética”. Revista de administração mackenzie . Volumen 8, n. 2, 2007, p. 85-103. Universidad Presbiteriana Mackenzie. Madrid-España.

LEJARRAGA A. B., Tesis de máster – “Minimización de los efectos de las perturbaciones eléctricas en los procesos industriales”, 2008, Universidad Pontificia Comillas, Madrid – España.

LÓPEZ A., MARCUELLO J., PLAZA I., MEDRANO C., “Compatibilidad Electromagnética-Conceptos básicos” Universidad de Zaragoza, 2007, España.

*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.*

NTC 4552-3:2008, “Protección contra descargas eléctricas atmosféricas (RAYOS) – Part 3: Daños físicos a estructuras y amenazas a la vida”.

NTC 5000:2002, “Calidad de la potencia eléctrica (CPE) – Definiciones y términos fundamentales”.

REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS (RETIE).  
Ministerio de Minas y Energía. Resolución No. 18 1294 Agosto 06 de 2008.

ROBLES R., “Propuesta metodológica para la evaluación e instalación de Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAIs) de gran potencia”, 2004, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona – España.

SCHNEIDER ELECTRIC. “AccuSine – Filtro activo de armónicos”.

SCHNEIDER ELECTRIC. “Electromagnetic Compatibility (EMC) – Practical Installation guidelines”.

SCHNEIDER ELECTRIC. “Puesta a tierra y compatibilidad electromagnética de los sistemas de automatización - Fundamentos y medidas - Manual de usuario”.2004.

ENERGEX. “Problemas asociados a la energía eléctrica”. Bogotá-Colombia.

SIEMENS. “Descargadores pararrayos y de sobretensiones”

SIEMENS. “Regímenes de neutro”.

*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.*

TORRES, H., BARRETO, “Las perturbaciones electromagnéticas” Revista Innovación y Ciencia, Volumen V, No. 2, 1996, pp. 30-37, Bogotá.

W. LANGGUTH., “Basic Principles of Physics for Electromagnetic Compatibility (EMC) and their Application to Electrical Installations in Buildings”, 2004, University of Applied Sciences.

## **ANEXO A**

(Información adicional)

### **Principales normas internacionales de SIPRA [37].**

La tabla A.1 presenta un resumen con las principales normas internacionales en la que es tratado el SIPRA.

<b>Título de la norma</b>	<b>Resumen</b>
IEC 62305-1	Protección contra rayos: Principios generales.
IEC 62305-2	Protección contra rayos: Cálculos del riesgo.
IEC 62305-3	Protección contra rayos: Daños a estructuras, amenazas a la vida (ubicación de pararrayos).
IEC 62305-4	Protección contra rayos: Sistemas eléctricos y electrónicos al interior de una estructura (ubicación de supresores de picos transitorios, aterramiento).
NFPA-780	La norma que regula pararrayos de Norteamérica y varios países de América Latina.
NFPA-70	También conocida como la NEC-National Electric Code: Norma de instalaciones eléctricas. La versión 2011 va a ser promulgada en varios países. La NEC es usada en los EEUU, México, Venezuela, Costa Rica, Puerto Rico, Perú.

*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.*

UL-96A	Norma para la colocación de pararrayos, corresponde a la práctica de NFPA-780. Especifica la ubicación de pararrayos y el material necesario para elaborar un blindaje.
Motorola R-56: STANDARDS AND GUIDELINES FOR COMMUNICATION SITES	R-56: Estándares y Directrices para sitios de telecomunicaciones. Un compendio de estándares, normas y prácticas para instalaciones de telecomunicaciones. Pararrayos, aterramiento y prácticas de construcción.
FAA-Std-019E	Lightning and surge protection, grounding, bonding and shielding requirements for facilities and electronic equipment. Norma para protección de aeropuertos de los EEUU también regula muchos aeropuertos del mundo.
España UNE 21 185 1995	Basado en los mismos principios de IEC 62305.
NBR 5419-Brasil para-raios	Brasil: basado en IEC 62305.
Facilities Management, NWSM 30-41	NOAA (Servicio de meteorología de EEUU) Lightning protection, grounding, bonding, shielding, and surge protection requirements. Protección de las instalaciones (radar) de servicio de meteorología.
NUREG/CR-6866	Lightning protection in nuclear power plants Protección contra rayos para plantas eléctrica nucleares.
IEEE Std 602-2007	IEEE Electrical Systems in Health Care

*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.*

	<p>Facilities</p> <p>Norma IEEE para instalaciones en Complejos de Cuidado de Salud (Clínicas, Hospitales)</p>
IEEE Std 998-1996	<p>IEEE Guide for direct lightning stroke shielding of substations.</p> <p>Norma IEEE para protección de subestaciones de alta potencial</p>
UL White Book	<p>Cada año el UL actualiza un tomo sobre todos los productos con el registro de UL que tiene que ver con instalaciones.</p> <p>Imprescindible para hacer una correlación con cada artículo de la NEC.</p>
ELECTRICAL INSTALLATION REQUIREMENTS A Global Perspective	<p>Una comparación de la NEC con las normas de IEC. Importante para entender las diferencia y las similitudes entre las dos familias de normas de América y Europa.</p>

**Tabla A.1. Principales normas internacionales de SIPRA.**

**Fuente: [37].**

## **ANEXO B**

(Información adicional)

### **MPR: El transformador de aislamiento [6], [9], [30].**

#### **B.1. Información general.**

Los transformadores de aislamiento<sup>106</sup> son máquinas eléctricas que constan de dos bobinas o devanados, llamados primario y secundario, estos devanados están acoplados en forma electromagnética, sin que exista unión física entre ambos. Esta construcción tiene inherente el aislamiento entre el primario y el secundario, por lo tanto básicamente todo transformador es aislado, pero realmente lo importante es su aislamiento a los ruidos de modo común.

##### **B.1.1. Ruido de modo común.**

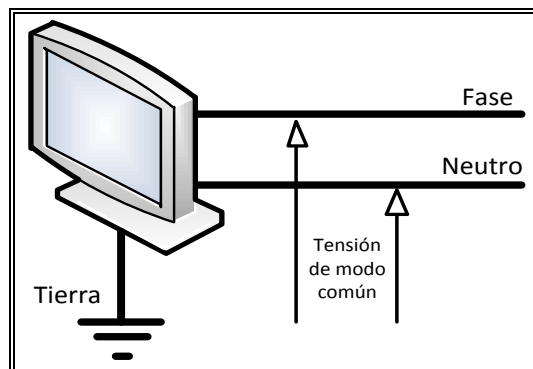
El ruido de modo común<sup>107</sup> corresponde a una alteración de la señal que se puede medir entre el conector de tierra y el conector de neutro y al mismo tiempo se puede medir entre la tierra y la fase. Por ser común a ambas líneas con respecto a la tierra se denomina de modo común. Por lo general es causado por fenómenos eléctricos como las descargas atmosféricas, apertura y cierre de protecciones, malas técnicas de aterrizado, tierras deficientes, radio transmisores, entre otros. Su representación esquemática se muestra en la figura B.1.

---

<sup>106</sup> "Isolation Transformers" en idioma inglés.

<sup>107</sup> "Common Mode Noise" en idioma inglés.

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.

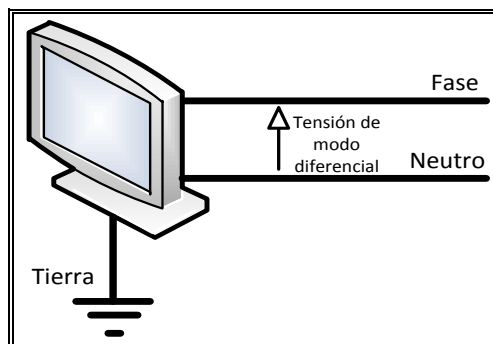


**Figura B.1. Esquema de ruido de modo común.**

**Fuente: [9].**

### B.1.2. Ruido de modo diferencial.

El ruido de modo diferencial<sup>108</sup> es el que puede ser detectado entre la línea de fase y la línea de neutro. Usualmente son ocasionados por encendidos y apagados de grandes cargas, o por bancos de condensadores utilizados para la corrección del factor de potencia. Su representación gráfica se muestra en la figura B.2.



**Figura B.2. Esquema de ruido de modo diferencial.**

**Fuente: [9].**

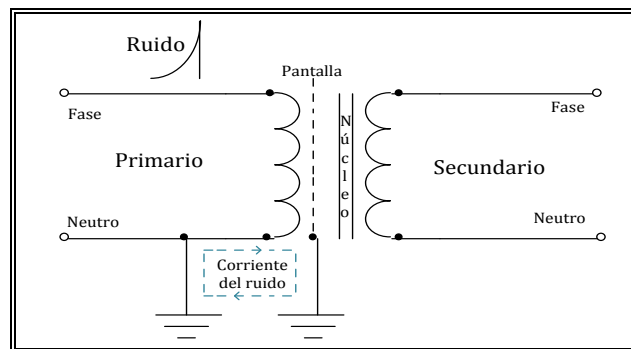
---

<sup>108</sup> "Differential Mode Noise" en idioma inglés.

## B.2. Mitigación de los ruidos de modo común y modo diferencial con el transformador de aislamiento.

### B.2.1. Mitigación del ruido de modo común.

La mitigación de las perturbaciones de ruido de modo común, pueden ser mitigadas a través de transformadores de aislamiento, siempre que haya conexión entre la pantalla electrostática<sup>109</sup> y tierra, como se observa la figura B.3.



**Figura B.3. Representación eléctrica de una pantalla electrostática.**

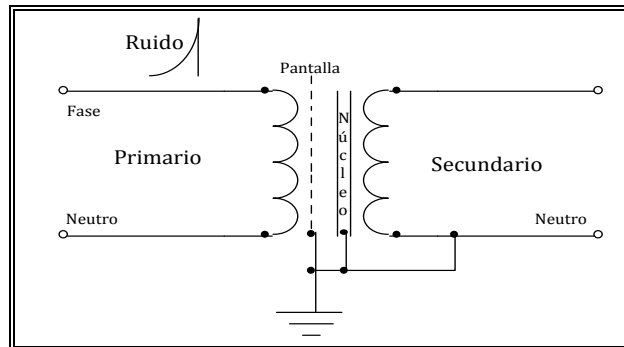
**Fuente: [6].**

Existe otra característica adicional de los transformadores de aislamiento que podrían llevarlos a eliminar completamente el ruido de modo común. Esta característica se puede observar en la figura B.4, aquí el terminal del secundario, la pantalla y el núcleo se encuentran unidos a tierra, proporcionando un solo punto de unión, es de esta manera que cualquier ruido de modo común que aparezca en el secundario, su corriente se encuentre cortocircuitada a tierra a través de la unión entre el neutro y la tierra del transformador.

---

<sup>109</sup> "Electrostatic Shield" en idioma inglés.

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.



**Figura B.4. Aterrizaje del terminal neutro en el secundario.**

**Fuente: [6].**

### **B.2.2. Mitigación del ruido de modo diferencial.**

Existen otras perturbaciones que no son mitigadas de forma eficiente al utilizar solo un transformador de aislamiento como dispositivo de desacoplamiento, entre éstas se tiene el ruido de modo diferencial en el secundario, ocasionado por los ruidos en modo común del primario. Esta característica es común en los transformadores de aislamiento y se le llama conversión.

Así pues en los transformadores de aislamiento reales, las tensiones de modo común en el primario tienden a producir tensiones de modo diferencial en el secundario.

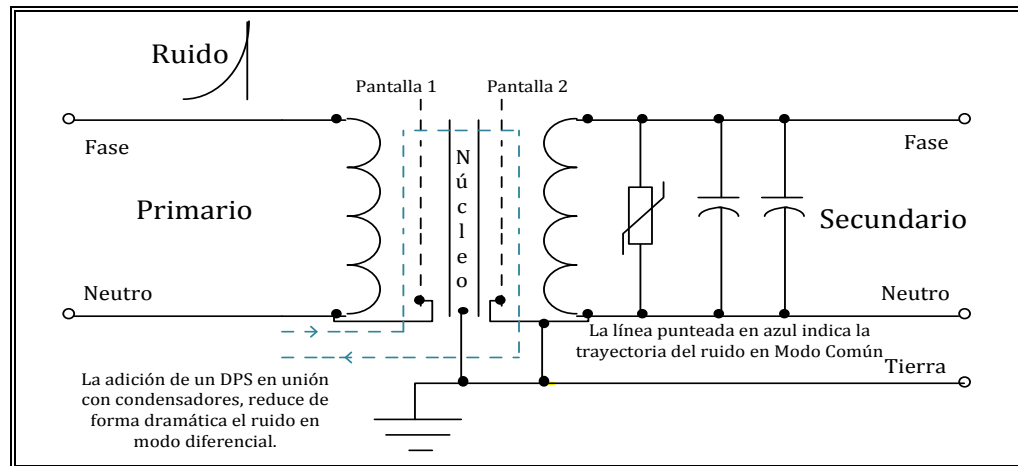
A continuación se presentan alternativas que permiten disminuir el ruido en modo diferencial presente en el secundario:

- ✓ Colocar condensadores entre la línea de fase y el neutro en el lado del secundario, para proporcionar una trayectoria de baja impedancia, para que el ruido de modo diferencial no se propague a través de la carga conectada a este devanado.

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.

- ✓ Utilizar DPS entre la línea de fase y neutro en el secundario, controlando los impulsos de alta energía que pasan a través del transformador.
- ✓ Implementar una segunda pantalla introducida específicamente para eliminar el fenómeno de conversión.

La figura B.5 muestra la implementación de las alternativas de solución anteriormente nombradas.



**Figura B.5 Conexión eléctrica típica para la reducción del ruido en modo diferencial presente en el secundario.**

**Fuente: [6].**

## ANEXO C

(Información adicional)

### Parámetros fundamentales para la selección de un DPS [23].

La tabla C.1 resume los parámetros fundamentales de un DPS con la definición y explicación que se debe conocer para la especificación de una protección interna.

Sigla	Nombre (En inglés)	Definición y explicación
	Nombre del fabricante o marca registrada o número del modelo. Categoría de localización. Número de puertos. Método de montaje.	Parámetros informativos.
$U_n$	Tensión nominal ( <i>Nominal voltaje</i> )	Tensión nominal del sistema a ser protegido. El valor de la tensión nominal, sirve con frecuencia en los aparatos de protección para instalaciones informáticas, como identificación del tipo. Para tensiones AC se indica como valor rms.
$U_c$	Tensión Máxima de operación continua y frecuencia nominal. ( <i>Maximum Continuous Operating Voltage MCOV</i> )	Es el valor máximo de tensión rms o tensión DC que puede ser aplicado continuamente entre los terminales de un DPS durante operación. Es la máxima tensión sobre un DPS en el estado no conductivo, lo cual asegura que este estado es recuperado después de ser activado. El valor de $U_c$ se escogerá de acuerdo con la tensión nominal del sistema a ser protegido y los requerimientos de la instalación. $U_c$ es igual a la tensión nominal del DPS

$U_p$	Nivel de protección de tensión ( <i>Voltaje Protection Level</i> )	<p>Este parámetro caracteriza el funcionamiento del DPS limitando la tensión a través de sus terminales, el cual es seleccionado de la lista de valores preferidos según la norma IEC 61643-12 2002 Part 12 Surge protective devices connected to low-voltage power distribution system-selection and application principles.</p> <table border="1" data-bbox="748 667 1443 926"> <tr> <td>Voltios</td> <td>80</td> <td>90</td> <td>100</td> <td>120</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td></td> <td>220</td> <td>330</td> <td>400</td> <td>500</td> <td>600</td> </tr> <tr> <td></td> <td>700</td> <td>800</td> <td>900</td> <td>1000</td> <td>1200</td> </tr> <tr> <td></td> <td>1200</td> <td>1500</td> <td>1800</td> <td>2000</td> <td>2500</td> </tr> <tr> <td></td> <td>3000</td> <td>4000</td> <td>5000</td> <td>6000</td> <td>8000</td> </tr> <tr> <td></td> <td>10000</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table> <p>Este valor debe ser mayor que el más alto valor de la tensión limitante medida en la instalación a proteger. Es el máximo valor instantáneo de la tensión de un dispositivo o equipo conectado después de un DPS, determinado por las pruebas normales estandarizadas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Tensión al impulso tipo rayo.</li> <li>Tensión de respuesta a la pendiente de 1 [kV/<math>\mu</math>s].</li> <li>Tensión residual (<math>U_{res}</math>) a al corriente de descarga nominal.</li> </ul> <p>El nivel de protección es un factor que caracteriza la capacidad de un DPS para limitar sobretensiones a un nivel residual. El nivel de protección determina el lugar de instalación del aparato de protección en redes de energía. El los DPS's destinados a instalaciones en redes de datos el nivel de protección debe adaptarse a la resistencia frente a perturbaciones de los aparatos y equipos que se pretenden proteger.</p>	Voltios	80	90	100	120	150		220	330	400	500	600		700	800	900	1000	1200		1200	1500	1800	2000	2500		3000	4000	5000	6000	8000		10000				
		Voltios	80	90	100	120	150																															
	220	330	400	500	600																																	
	700	800	900	1000	1200																																	
	1200	1500	1800	2000	2500																																	
	3000	4000	5000	6000	8000																																	
	10000																																					

$U_w$	Nivel de inmunidad (Tensión nominal soportable al impulso)	Es la capacidad de aislamiento de un dispositivo o equipo ante un impulso de tensión, la cual está definida por el fabricante al equipo o partes de el en unidades de tensión, caracterizando la capacidad soportable de un aislamiento contra sobretensiones. En términos de CEM este es el nivel de inmunidad de un dispositivo o equipo.
$U_{res}$	Tensión residual	Es el valor pico de tensión que aparece entre los terminales del DPS debido al paso de una corriente de descarga.
$U_T$	Sobretensión temporal. (Temporary overvoltage)	Máximo valor de sobre tensión rms o DC que el DPS puede soportar y que excede la $U_c$ para un tiempo de duración específico.
$U_{oc}$	Tensión de circuito abierto ( <i>Open circuit voltage</i> )	Tensión de circuito abierto
	Pruebas de clasificación y parámetros de descarga por cada modo de operación declarado por el fabricante. Clase I: Prueba $I_{imp}$ . Clase II: Prueba $I_{max}$ . Clase III: Prueba $U_{oc}$ .	Es la información requerida para las pruebas de la clase I, clase II y clase III. La prueba clase I se lleva a cabo con la corriente nominal de descarga $I_n$ , la tensión de impulso 1,2/50 [µs] y la máxima corriente de impulso del rayo $I_{imp}$ . Prueba clase II se lleva a cabo con la corriente nominal de descarga $I_n$ , la tensión del impulso 1,2/50 [µs] y La máxima corriente de descarga $I_{max}$ . a prueba clase III se lleva a cabo con la combinación de ondas 1,2/50 [µs] y 8/20 [µs]
$I_{imp}$	Corriente de impulso de rayo ( <i>lighting impulse current</i> )	Debido a un valor de corriente pico $I_{peak}$ y carga $Q$ . Este parámetro es usado para la clasificación de un DPS clase I. Sus parámetros (valor pico, carga y potencia específica) reproducen los esfuerzos propios de las corrientes

		<p>naturales del rayo. La corriente del rayo y la combinación corriente del rayo y descargadores de sobre tensión tienen que ser capaces de descargar tales corrientes de impulso de rayo, varias veces sin resultar destruidos. <math>I_{imp}</math> es seleccionada de una lista de valores definida en la norma IEC.</p> <table border="1"> <tr> <td><math>I_{peak} [kA]</math></td> <td>1</td> <td>2</td> <td>5</td> <td>10</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td><math>Q [A*s]</math></td> <td>0.5</td> <td>1</td> <td>2.5</td> <td>5</td> <td>10</td> </tr> </table> <p>Los DPS se prueban con cualquier onda que cumpla con las condiciones de corriente y carga, una de estas ondas es la 10/350 [<math>\mu s</math>]. La norma IEEE C62.41.2 en su apartado 7.4.1 considera que la prueba al DPS clase I puede ser aplicada para evaluar el manejo de la capacidad de energía.</p>	$I_{peak} [kA]$	1	2	5	10	20	$Q [A*s]$	0.5	1	2.5	5	10		
$I_{peak} [kA]$	1	2	5	10	20											
$Q [A*s]$	0.5	1	2.5	5	10											
$I_{max}$	Máxima corriente de descarga ( <i>Maximal Discharge Current</i> )	Es el valor pico de la corriente que el DPS puede descargar en forma segura, es decir sin daño, con una forma de onda de impulso 8/20 [ $\mu s$ ]. Este parámetro es usado para la clasificación de un DPS clase II. $I_{max}$ es mayor que $I_n$ .														
$I_n$	Corriente nominal de descarga ( <i>Nominal Discharge Current</i> )	Es el valor pico de la corriente que fluye a través de los bornes de conexión señalados en el DPS, con una forma de onda 8/20 [ $\mu s$ ]. Este parámetro es usado para la clasificación de un DPS clase II y también para pre-condicionar las pruebas para los DPS clase I y Clase II. $I_n$ es seleccionada de una lista de valores definida en la norma IEC.														
		<table border="1"> <tr> <td>kA</td> <td>0.05</td> <td>0.1</td> <td>0.25</td> <td>0.5</td> <td>1</td> <td>1.5</td> </tr> <tr> <td></td> <td>2</td> <td>2.5</td> <td>3</td> <td>5</td> <td>10</td> <td>20</td> </tr> </table>	kA	0.05	0.1	0.25	0.5	1	1.5		2	2.5	3	5	10	20
kA	0.05	0.1	0.25	0.5	1	1.5										
	2	2.5	3	5	10	20										

$I_L$	Corriente nominal de carga ( <i>Rated load current</i> )	Es la máxima corriente nominal rms o DC que puede ser entregada a la carga conectada a la salida protegida de un DPS.
$I_{FI}$	Corriente subsiguiente de interrupción ( <i>Follow current interrupting rating</i> )	Es la corriente de cortocircuito potencial que un DPS es capaz de interrumpir por sí mismo. Es la corriente de la fuente de potencial que fluye a través de un DPS durante y después del paso de corriente de la descarga. O la corriente entregada por el sistema de potencia eléctrica y que fluye a través del DPS después de un impulso de descarga de corriente y significativamente diferente de la corriente de operación continua. Estas últimas definidas en la IEEE fueron desarrolladas inicialmente para descargadores que usaban gaps en serie y varistores SiC en los cuales es significativa la corriente que fluye después de la sobrecorriente. Los DPS modernos basados en MOVs la corriente subsiguiente es despreciable. La definición propuesta por la IEC (que aplica solo a las corrientes después de la descarga) parece ser más apropiada para DPS basados en MOVs.
$I_{PE}$	Corriente Residual ( <i>Residual Current</i> )	Corriente que fluye a través del terminal PE cuando el DPS es energizado a la máxima tensión continua de operación $U_C$ cuando se conecta de acuerdo con las instrucciones del fabricante.
$I_{sn}$	Corriente nominal de descarga ( <i>Nominal Discharge Current</i> )	Es el valor pico de una descarga de corriente con onda 8/20 [ $\mu$ s] y 10/350 [ $\mu$ s] para el cual esta dimensionado el DPS de acuerdo con su programa de pruebas previamente fijado.
$I_C$	Corriente de operación continua ( <i>Continuous operating</i> )	Corriente que fluye a través de cada modo de protección del DPS cuando es energizado a la tensión máxima de operación continua $U_C$ para cada modo.

	<i>current</i> )	
	Grado de protección código IP (si IP>20) ( <i>Degrees of protection provided by enclosure</i> )	Es el rango de protección suministrado por una valla o cerca contra ingreso de objetos extraños sólidos y contra ingreso de agua.
	Resistencia de cortocircuito ( <i>short-circuit withstand</i> )	Máxima corriente de corto circuito que puede soportar el DPS.
W/R	Energía específica para clase I ( <i>Specific Energy</i> )	Es la energía disipada por la corriente de impulso $I_{imp}$ en una resistencia de 1 [ $\Omega$ ] es igual a la integral del tiempo de cuadrado de la corriente
$\Omega$	Rango de temperatura ( <i>Temperatura Range</i> )	Expresa el margen de temperatura en el que puede funcionar el DPS.
$t_a$	Tiempo de respuesta ( <i>Response time</i> )	Es el tiempo que pasa hasta la desconexión automática de la fuente de alimentación en una falla del circuito eléctrico o del equipo a ser protegido. Es un valor de la aplicación específica que resulta de la intensidad de la corriente de falla que fluye y las características de los dispositivos de protección.
$f_G$	Ancho de banda ( <i>Bandwidth</i> )	Define el comportamiento de un DPS en función de la frecuencia. Son frecuencias que causa una atenuación de inserción ( $a_E$ ) de 3 db bajo ciertas condiciones de prueba. A una determinada frecuencia, la atenuación de inserción de un DPS viene dada por la relación existente entre los valores de tensión en el lugar antes y después de intercalar el DPS. Si no se indica otra cosa, los datos se refieren siempre a un sistema de 50[ $\Omega$ ]

*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.*

	<p>Tensión de sujeción o supresión ( <i>Clamping or suppression voltaje</i> )</p>	<p>Tensión pico a través del varistor, medida bajo condiciones de impulso de corriente pico y forma de onda específicas. La tensión pico y la corriente pico no son necesariamente coincidentes en el tiempo. De acuerdo con la norma IEEE C62.41.1 2002 este término debe ser remplazada por la definición de la norma IEC “Measured limiting voltaje”.</p>
	<p>Capacidad de desviación</p>	<p>Este parámetro tiene una importancia definitiva cuando el DPS debe ser seleccionado según los peligros expuestos: descarga directa del rayo, descarga lejana y sobretensiones inducidas. Este valor es el más característico para determinar la capacidad de un DPS indicando que corriente del rayo de verificación, corrientes de choque, corrientes de choque combinadas que puede derivar sin que su funcionamiento se vea limitado o impedido sustancialmente.</p>

**Tabla C.1. Parámetros fundamentales en la selección de un DPS.**

**Fuente: [23].**

## **ANEXO D**

(Información adicional)

### **Aplicación de un sistema coordinado de DPS's [38], [39].**

#### **D.1. Información general.**

El sistema coordinado de DPS's, es la principal practica en la que se basa la aplicación de zonas de protección contra rayos (ZPR's), permitiendo la protección de los sistemas eléctricos y electrónicos, en el interior de una estructura; mitigando los fenómenos asociados al IER, logrando de ésta manera la compatibilidad electromagnética presente en la instalación, en relación al SIPRA. Este anexo está dirigido a mostrar un cálculo básico en relación a la selección de los DPS's en una instalación eléctrica de uso final.

#### **D.2. Parámetros relevantes en el diseño.**

Se supondrá una instalación eléctrica de baja tensión, con un nivel alto a impactos directos de rayo (nivel de protección I). Compuesta por:

- Una Acometida eléctrica aérea en baja tensión 120/208 V Tetrafilar (3F+1N).
- Impedancia de puesta a tierra equivalente de las acometidas externas 10 [ $\Omega$ ].
- Impedancia del sistema de puesta a tierra 10 [ $\Omega$ ].
- Esquema de conexión a tierra TN-C-S.
- Sistema de protección externo contra rayos para un nivel de protección I.
- Circuitos de distribución no apantallados.

*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.*

Los parámetros a tener en cuenta, según el nivel de protección descrito para la instalación, son tomados de la tabla 3 de la sección 3.3.7:

Parámetro	Corriente del rayo [kA]	Carga [C]	Energía específica [MJ/ $\Omega$ ]	Pendiente $\frac{di}{dt}$ [kA/ $\mu$ s]
NIVEL 1	200	100	10	200

**Tabla D.1. Parámetros para el diseño del sistema coordinado de DPS's.**

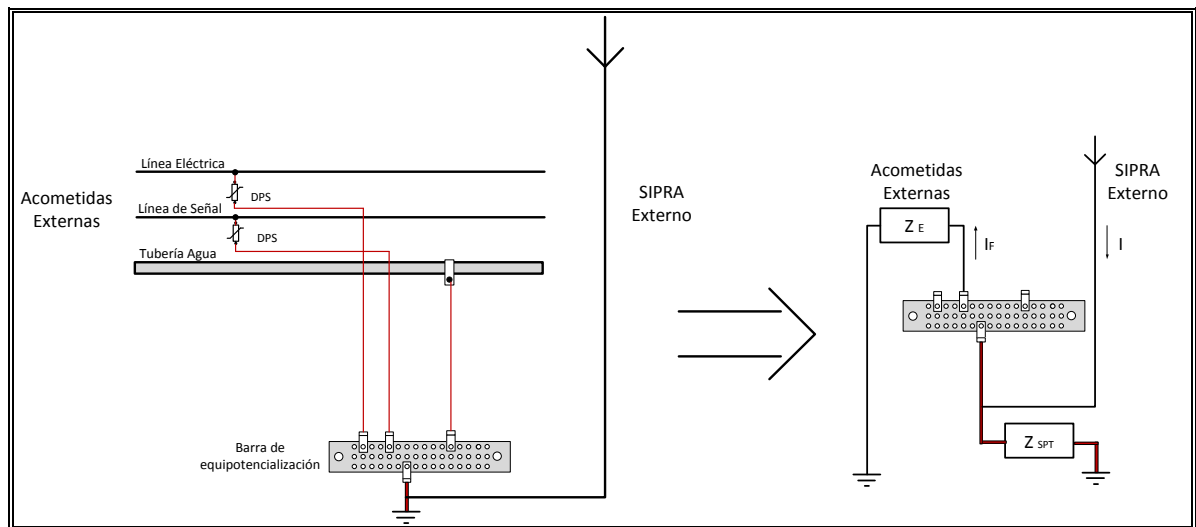
**Fuente: [17].**

### **D.3. Cálculo de los parámetros del DPS ubicado en la frontera de la ZPR 0 Y ZPR 1.**

#### **D.3.1. Cálculo de la corriente parcial del rayo.**

Este cálculo se basa principalmente en la circulación de la corriente parcial del rayo en los conductores de la instalación eléctrica, ante la caída directa del rayo en el sistema de captación de la instalación. A continuación en la figura D.1 se muestra el circuito equivalente de la distribución de las corrientes del rayo.

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.



**Figura D.1. Circuito equivalente de distribución de corrientes parciales de rayo en acometidas de servicio.**

**Fuente: [39].**

Para el cálculo de la corriente parcial del rayo en las acometidas de servicio, se tiene la ecuación (1):

$$I_F = \frac{I * Z_{SPT}}{Z_{SPT} + Z_E} \quad (1)$$

Dónde:

$I_F$ : La corriente parcial del rayo.

$I$ : La corriente total del rayo.

$Z_E$ : Impedancia de puesta a tierra equivalente de las acometidas externas.

$Z_{SPT}$ : Impedancia del sistema de puesta a tierra.

Los datos a reemplazar en la ecuación (1) son:

*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.*

$$I = 200 \text{ [kA]} \text{ (10/350 } [\mu\text{s})$$

$$Z_E = 10 \text{ } [\Omega]$$

$$Z_{SPT} = 10 \text{ } [\Omega]$$

Obteniendo como resultado:

$$I_F = 100 \text{ [kA]}$$

### **D.3.2. Cálculo de las corrientes parciales de rayo en los conductores de la acometida eléctrica.**

Para éste cálculo, se tomó la situación más desfavorable, que corresponde a la circulación de la corriente parcial del rayo, solo por la acometida eléctrica. De ésta forma, las corrientes parciales del rayo en los conductores de la acometida, se calcula con la ecuación (2):

$$I_n = \frac{I_F}{n} \quad (2)$$

Dónde:

$I_n$ : Es la corriente parcial por cada conductor.

$n$ : Es el número de conductores de la acometida eléctrica.

$I_F$ : La corriente parcial del rayo.

Los datos a reemplazar en la ecuación (2) son:

$$I_F = 100 \text{ [kA]}$$

*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.*

$$n = 4$$

Obteniendo como resultado:

$$I_n = 25 \text{ [kA]}$$

Éste resultado es tomado para cada uno de los cuatro conductores de la acometida.

### **D.3.3. Cálculo de la carga parcial del rayo.**

Para el cálculo de la carga parcial del rayo en las acometidas de servicio, se tiene la ecuación (3):

$$Q_F = \frac{Q * Z_{SPT}}{Z_{SPT} + Z_E} \quad (3)$$

Dónde:

$Q_F$ : Es la carga parcial del rayo.

$Q$ : Es la carga total del rayo.

$Z_E$ : Es la impedancia de puesta a tierra equivalente de las acometidas externas.

$Z_{SPT}$ : Impedancia del sistema de puesta a tierra.

Los datos a reemplazar en la ecuación (3) son:

$$Q = 100 \text{ [C]}$$

*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.*

$$Z_E = 10 [\Omega].$$

$$Z_{SPT} = 10 [\Omega].$$

Obteniendo como resultado:

$$Q_F = 50 [C].$$

#### **D.3.4. Cálculo de las cargas parciales del rayo, a través de los conductores de la acometida eléctrica.**

Para éste cálculo, de igual manera se tomó la situación más desfavorable, que corresponde a la carga parcial del rayo, solo por la acometida eléctrica. De ésta forma, las cargas parciales del rayo en los conductores de la acometida, se calcula con la ecuación (4):

$$Q_n = \frac{Q_F}{n} \quad (4)$$

Dónde:

$Q_n$ : Es la corriente parcial por cada conductor.

$n$ : Es el número de conductores de la acometida eléctrica.

$Q_F$ : La corriente parcial del rayo.

Los datos a reemplazar en la ecuación (4) son:

$$Q_F = 50 [C]$$

$$n = 4$$

Obteniendo como resultado:

$$Q_n = 12,5 \text{ [C]}$$

Éste resultado es tomado para cada uno de los cuatro conductores de la acometida.

Finalmente los DPS's a utilizar en ésta frontera deben cumplir con los siguientes requerimientos:

- ✓  $I_n \geq 25 \text{ [kA]} (10/350 \text{ [}\mu\text{s]})$ .
- ✓  $Q_n \geq 12,5 \text{ [C]}$
- ✓ Nivel de inmunidad (Tensión nominal soportable al impulso)  $< 6 \text{ [Kv]}$  (según la tabla 3 de la sección 3.3.7).
- ✓ Máxima tensión continua de funcionamiento:  $150 \text{ V}$  (según la tabla C.1 del anexo C).

NOTA: Los DPS's caracterizados entre la frontera ZPR 0 y ZPR 1, son los que se implementaran en el tablero de distribución principal (DPS Clase I).

#### **D.4. Calculo del DPS que se ubica en las fronteras de la ZPR 1 y zonas subsiguientes.**

El procedimiento para el cálculo de los siguientes DPS's, se realiza teniendo en cuenta los efectos inducidos provocados por el campo electromagnético del rayo, por lo cual el procedimiento desarrollado para los parámetros de selección, varía respecto a la forma en cómo se calcula el DPS en la frontera de la ZPR 0 y la ZPR 1.

En primer lugar se desarrollará un análisis, basado en teoría electromagnética en el cuál se muestra la influencia que tiene el campo magnético del rayo, sobre un bucle de inducción provocado por el enrutamiento de los conductores en una instalación eléctrica de uso final. Luego de esto, se calcularán los parámetros bajo los cuales se escogerán los DPS's para las fronteras de las zonas subsiguientes.

#### **D.4.1. Análisis electromagnético de la tensión inducida, debido al campo magnético del rayo.**

Las sobretensiones presentadas en los conductores de la instalación eléctrica, aguas abajo del DPS Clase 1, son debidas a fenómenos inducidos producidos por la corriente del rayo que impacta sobre el sistema de captación y que es dirigida a través de los bajantes al sistema de puesta a tierra. Dichas sobretensiones dependen de la velocidad de incremento de la corriente (variación de la intensidad por unidad de tiempo,  $di/dt$ ) y de la inductancia mutua que presentan los bucles de los conductores en la instalación.

De ésta forma, la sobretensión inducida en los conductores de la acometida, se calcula con la ecuación (5):

$$U = M * \frac{di}{dt} \quad (5)$$

Dónde:

$U$ : Es la sobretensión inducida.

$M$ : Es la inductancia mutua del bucle.

$di/dt$ : Es la variación de la intensidad por unidad de tiempo.

La inductancia mutua se calcula de la siguiente manera:

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.

$$B = \frac{\mu_0 * I}{2\pi * x}; \quad M = \frac{\varphi}{I}$$

$$\varphi = \int_S B * dS; \quad dS = b * dx$$

$$\varphi = \frac{\mu_0 * I * b}{2\pi} \int_a^c \frac{dx}{x}; \quad \varphi = \frac{\mu_0 * I * b}{2\pi} * \ln(x) \Big|_a^c$$

$$\varphi = \frac{\mu_0 * I * b}{2\pi} \int_a^c \frac{dx}{x}; \quad \varphi = \frac{\mu_0 * I * b}{2\pi} * [\ln(c) - \ln(a)]$$

$$\varphi = \frac{\mu_0 * I * b}{2\pi} * \ln\left(\frac{c}{a}\right)$$

Quedando finalmente la inductancia mutua como:

$$M = \frac{\mu_0 * b}{2\pi} * \ln\left(\frac{c}{a}\right) \quad (6)$$

Dónde:

$M$ : Es la inductancia mutua.

$\mu_0$ : Es la permeabilidad absoluta.

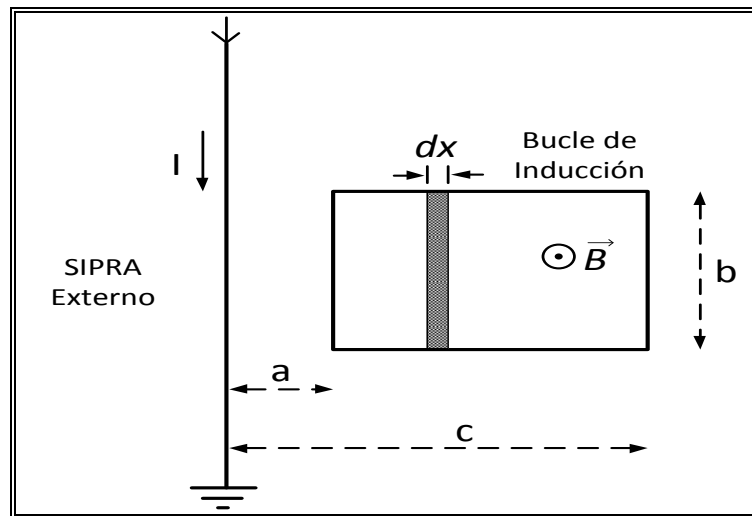
$a$ : Es la distancia desde el bajante hasta el inicio del bucle.

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.

*b*: Es la altura del bucle.

*c*: Es la distancia desde el bajante hasta el final del bucle.

La figura D.2 muestra esquemáticamente, el bucle de inducción que se puede llegar a presentar en el cableado, aguas abajo del DPS.



**Figura D.2. Esquema equivalente del bucle inductivo debido al enrutamiento de conductores ante una descarga atmosférica.**

**Fuente: [38].**

#### **D.4.2. Cálculo de los parámetros de selección para los DPS's en la frontera ZPR 1 y ZPR 2.**

Teniendo en cuenta la figura D.2; procedemos a calcular la inductancia mutua existente, el cuál se realiza al evaluar la ecuación (6) con los siguientes datos:

$$\mu_0: 4\pi * 10^{-7} [H/m]$$

$$a: 3 m$$

$$b: 2,5 m$$

*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.*

$c: 13 \text{ m}$

Obteniendo como resultado una inductancia mutua de:

$$M = 0,73 \mu H$$

Ahora procedemos hallar la sobretensión inducida para los bucles formados por los conductores, reemplazando los siguientes datos en la ecuación (7):

$$M = 0,73 \mu H$$

$$di/dt = 200 [kA/\mu s] \text{ (ver tabla D.1).}$$

Obteniendo como resultado:

$$U = 146 \text{ kV}$$

Finalmente los DPS's a utilizar en ésta frontera deben cumplir con los siguientes requerimientos:

- ✓  $I_n \geq 10 [kA] (8/20 [\mu s])$ .
- ✓ Nivel de inmunidad (Tensión nominal soportable al impulso)  $< 4 [Kv]$  (según la tabla 3 de la sección 3.3.7).
- ✓ Máxima tensión continua de funcionamiento: 150 V (según la tabla C.1 del anexo C)

NOTA: Los DPS's caracterizados entre la frontera ZPR 1 y ZPR 2, son los que se implementarían en el tablero de distribución secundario (DPS Clase II).

### **D.4.3. Cálculo de los parámetros de selección para los DPS's en la frontera ZPR 2 y ZPR 3.**

Teniendo en cuenta la figura D.2; procedemos a calcular la inductancia mutua existente, el cuál se realiza al evaluar la ecuación (6) con los siguientes datos:

$$\mu_0: 4\pi * 10^{-7} [H/m]$$

$$a: 10 m$$

$$b: 2,5 m$$

$$c: 14 m$$

Obteniendo como resultado una inductancia mutua de:

$$M = 0,16 \mu H$$

Ahora procedemos hallar la sobretensión inducida para los bucles formados por los conductores, reemplazando los siguientes datos en la ecuación (7):

$$M = 0,16 \mu H$$

$$di/dt = 200 [kA/\mu s] \text{ (ver tabla D.1).}$$

Obteniendo como resultado:

$$U = 33,6 kV$$

Finalmente los DPS's a utilizar en ésta frontera deben cumplir con los siguientes requerimientos:

*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.*

- ✓  $I_n \geq 5$  [kA] (8/20 [ $\mu$ s]).
- ✓ Nivel de inmunidad (Tensión nominal soportable al impulso) < 1,5 [Kv] (según la tabla 3 de la sección 3.3.7).
- ✓ Máxima tensión continua de funcionamiento: 150 V (según la tabla C.1 del anexo C)

NOTA: Los DPS's caracterizados entre la frontera ZPR 2 y ZPR 3, son los que se implementan en la toma de energía de un equipo sensible (DPS Clase III).