

PROPUESTA PARA EL DISEÑO DE INSTALACIONES
ELÉCTRICAS DE USO FINAL MEDIANTE LA INCORPORACIÓN
DE CRITERIOS LEGALES, REGLAMENTARIOS, NORMATIVOS Y
TÉCNICOS CONSIDERANDO PARÁMETROS DE
COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA

GABRIEL MALAGÓN CARVAJAL

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

2014

PROPUESTA PARA EL DISEÑO DE INSTALACIONES
ELÉCTRICAS DE USO FINAL MEDIANTE LA INCORPORACIÓN
DE CRITERIOS LEGALES, REGLAMENTARIOS, NORMATIVOS Y
TÉCNICOS CONSIDERANDO PARÁMETROS DE
COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA

PRESENTADO POR
GABRIEL MALAGÓN CARVAJAL

Trabajo de investigación para optar al título de Magister en ingeniería eléctrica

DIRECTOR DEL PROYECTO
Dr. GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA
Profesor Titular Laureado Universidad Industrial de Santander

CODIRECTOR
MPE. WILSON GIRALDO PICÓN
Profesor Cátedra Titular Universidad Industrial de Santander

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

2014

A mi Dios todo poderoso por guiarme a lo largo de este y otros caminos que he emprendido y logrado recorrer con éxito.

A mis padres, fuente de amor desinteresado, apoyo y motivación; sin ellos no hubiera sido posible este logro.

A mi familia, primos y tíos por su apoyo incondicional y buena energía.

A Laura y María Fernanda por permitirme explorar otras facetas de mi vida.

A mi Luz, desde que ha estado en mi vida, ha hecho de mí una mejor persona.

A todas aquellas personas que siempre han estado conmigo acompañándome en esta gran empresa.

Agradecimientos

Mis más sinceros agradecimientos a todo el equipo de trabajo: al Profesor Gabriel Ordóñez y al Profesor Wilson Giraldo por la oportunidad brindada, por su apoyo y orientación durante el desarrollo de este trabajo, a ellos les debo mi vocación hacia la investigación y por tanto esta nueva etapa de mi vida profesional. A los estudiantes de pregrado y hoy ingenieros: Wilson Gamboa, Diego Jaimes, Rafael Fragozo, Ricardo Rodríguez y Fabián Vera, a los cuales tuve la oportunidad de dirigir, gracias por toda su colaboración y apoyo durante el desarrollo de este trabajo, con ellos aprendí nuevas cosas que me formaron en gran medida como persona y como profesional.

También quiero expresar mis agradecimientos a la Universidad Industrial de Santander por su apoyo a la presente investigación a través del proyecto DIEF VIE-5566.

A los profesores Hermann Vargas, Gilberto Carrillo, Julio Cesar Chacón, Jaime Galindo, Daniel Sierra, Rubén Darío Cruz, Cesar Antonio Duarte y todos los demás profesores de la E3T de los cuales pude disfrutar de su orientación, ellos se han convertido en motivo de admiración, gratitud y modelo a seguir para mí vida.

A mis compañeros de viaje en este largo camino, Jairo, Cristian, Sergio, Iván; amigos con los cuales emprendí este proyecto y de los cuales he aprendido mucho durante estos últimos 4 años, gracias a Dios por permitirme disfrutar de su amistad y compañía.

Finalmente a mis amigos de siempre, Diego, Alex, Anyerson, Hernán, Iván, Mauricio y Vladimir por su apoyo en este proceso y amistad durante tantos años.

Tabla de contenido

Introducción	24
1. Criterios legales, normativos y técnicos.....	26
1.1 Perspectiva general	26
1.2 Reglamentación y normas relacionadas con compatibilidad electromagnética en Colombia.	26
1.3 Normas internacionales relacionadas con CEM.	29
1.4 Normas y reglamentos en Colombia asociados con diseño de instalaciones eléctricas.	30
1.5 Normas relacionadas con CEM a nivel internacional, con relación a SIPRA y coordinación de protecciones.	31
1.6 Normas relacionadas con CEM a nivel internacional asociadas con los SPT.....	32
1.7 Normas relacionadas con CEM en transformadores, motores y equipos asociados.....	33
2. Parámetros que intervienen en la incompatibilidad electromagnética	35
2.1 Problemas de compatibilidad electromagnética en equipos electrónicos debido al SPT.....	35
2.1.1 Múltiples conexiones del conductor de tierra.	35
2.1.2 Múltiples conexiones neutro–tierra.	36
2.1.3 Tierra aislada IG	37
2.1.4 Problemas de referencia en los equipos electrónicos.	40
2.1.5 Incremento de la impedancia de las conexiones a tierra bajo altas frecuencias [10].....	42
2.1.6 Perturbaciones electromagnéticas generadas por autoresonancia en los conductores del SPT ...	43
2.1.7 Inductancia y capacitancia parasita de los caminos compuestos por los conductores del SPT. .	44
2.1.8 Perturbaciones de modo común en las líneas de alimentación.	45
2.2 Problemas de compatibilidad electromagnética asociados al sistema de puesta a tierra del sistema de protección contra rayos.....	46
2.2.1 Diferencias de potencial	46
2.2.2 Sobretensiones o sobrecorrientes en el SIPRA (Surges).	47

Tabla de contenido

2.2.3	Interferencia electromagnética debida a campos magnéticos generados por el impulso electromagnético del rayo.....	47
2.2.4	Altas impedancias en los conductores del SPT.....	48
2.3	Problemas de compatibilidad electromagnética relacionados con conductores y conexionado.	48
2.3.1	Perturbaciones causadas por malas prácticas de cableado y conexión a tierra.	49
2.3.2	Altas impedancias de puesta a tierra.	50
2.3.3	Contenido de armónicos en la red.	51
2.4	Problemas de compatibilidad electromagnética relacionados con protecciones eléctricas	55
2.5	Problemas de compatibilidad electromagnética relacionados con transformadores.....	57
2.6	Problemas de compatibilidad electromagnética relacionados con motores.	61
3.	Buenas prácticas de ingeniería orientadas a la mitigación de los fenómenos de compatibilidad electromagnética: Impulso electromagnético del rayo (IER).....	64
3.1	Buenas prácticas para el sistema de puesta a tierra y equipotencialización en un SIPRA.	64
3.1.1	Información general.....	64
3.1.2	Implementación de la red de equipotencialización (RE).....	67
3.1.3	Configuración de la red de equipotencialización (RE)	71
3.1.4	Configuración del SPT	73
3.1.5	Instalación de barras de equipotencialización	75
3.2	Buenas prácticas mediante el uso de blindajes magnéticos y enrutamiento de líneas [17].....	77
3.2.1	Información general.....	77
3.2.2	Blindaje espacial, de líneas internas, líneas externas y enrutamiento de las líneas internas.....	78
3.3	Buenas prácticas mediante la definición de Zonas de protección y sistema coordinado de DPS [38]	83
3.3.1	Información general.....	83
3.3.2	Clasificación de zonas de protección contra el rayo (ZPR).....	83
3.3.3	Dispositivos de protección contra surges (DPS)	85
3.3.4	Equipotencialización en la frontera de una zona de protección contra el rayo (ZPR).....	86
3.3.5	Selección e instalación de un sistema coordinado de DPS.	88
3.3.6	Procedimiento para instalar un sistema coordinado de DPS	90
3.3.7	Diseño de medidas de protección contra el IER (MPR).....	94
3.3.8	Interconexión de ZPR.	98
4.	Buenas prácticas de ingeniería orientadas a la mitigación de los fenómenos de compatibilidad electromagnética: Protecciones eléctricas (armónicos).....	102

Tabla de contenido

4.1	Implementación de filtros [49], [50] y [51]	102
4.1.1	Información general.	102
4.1.2	Características fundamentales de los filtros.	103
4.1.3	Aspectos importantes para la selección y dimensionamiento de filtros.....	106
4.1.4	Instalación de filtros	112
4.1.5	Pruebas básicas en filtros	115
4.2	Implementación de dispositivos de desacoplamiento [49].....	117
4.2.1	Información general.	117
4.2.2	Aplicación del transformador de aislamiento	118
4.2.3	Conjunto Moto-Generador.....	122
4.2.4	Sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI o UPS)	124
5.	Buenas prácticas de ingeniería orientadas a la mitigación de los fenómenos de compatibilidad electromagnética: Dimensionamiento de transformadores	125
5.1	Desclasificación: Cálculos para evaluar la capacidad de carga a partir del espectro armónico [12] 125	
5.1.1	Cálculos típicos para transformadores tipo seco.....	125
5.1.2	Ejemplo	126
5.1.3	Ejemplo	128
5.1.4	Cálculos típicos para transformadores inmersos en líquido	129
5.1.5	Ejemplo	131
5.2	Desclasificación: Cálculo de la capacidad equivalente del transformador utilizando los datos de las pruebas de rutina	134
5.2.1	Cálculos típicos para transformadores de tipo seco	137
5.2.2	Ejemplo	137
5.2.3	Cálculos típicos para transformadores inmersos en líquido	139
5.2.4	Ejemplo	140
5.3	Comparación de la metodología “K-Factor” y el Factor armónico de pérdidas.....	144
5.3.1	Definición del K-factor (Underwriter Laboratories)	144
5.3.2	Relación entre el K- Factor y el Factor armónico de pérdidas	144
5.3.3	Ejemplo	146
5.4	Otras metodologías de desclasificación de transformadores [33]	147
5.4.1	Método europeo “Factor k”	147
5.4.2	El factor de pérdidas adicionales	147

Tabla de contenido

6. Buenas prácticas de ingeniería orientadas a la mitigación de los fenómenos de compatibilidad electromagnética: Dimensionamiento de motores	149
6.1 Metodología 1 para la desclasificación de motores de inducción	149
6.1.1 Factor de desclasificación en presencia de armónicos	149
6.1.2 Ejemplo.....	150
6.1.3 Factor de ajuste aplicado en presencia de tensiones desbalanceadas.	151
6.1.4 Ejemplo.....	152
6.1.5 Ejemplo.....	152
6.2 Metodología 2 para la desclasificación de motores de inducción tipo jaula de ardilla	152
6.2.1 Ejemplo.....	153
7. Buenas prácticas de ingeniería orientadas a la mitigación de los fenómenos de compatibilidad electromagnética: Dimensionamiento de conductores	155
7.1 Factores de reducción para las corrientes armónicas en cables en sistemas trifásicos tetrafilares.	155
7.1.1 Ejemplo.....	159
7.2 Factor de efecto superficial o efecto piel	160
7.2.1 Ejemplo.....	161
7.2.2 Ejemplo.....	162
8. Buenas prácticas de ingeniería orientadas a la mitigación de los fenómenos de compatibilidad electromagnética: Dimensionamiento de canalizaciones	164
9. Buenas prácticas de ingeniería orientadas a la mitigación de los fenómenos de compatibilidad electromagnética: Sistemas de puesta a tierra.	169
9.1 Prácticas en la configuración de la conexión y estructuras de referencia para equipo sensible.	169
9.1.1 Conexión a tierra exclusiva para equipos electrónicos SPG.....	170
9.1.2 Configuración tipo ÁRBOL (TREE).....	173
9.1.3 Estructuras de referencia de señal SRS.	175
9.2 Prácticas en el diseño de SPT para equipos sensibles.	181
9.2.1 Dimensionamiento de los conductores de equipotencialización para disminuir la impedancia expuestas a altas frecuencias.	182
9.2.2 Dimensionamiento de los conductores de equipotencialización para mitigar fenómenos de autoresonancia.	182
9.2.3 Dimensionamiento de los conductores del SPT para minimizar inductancia y capacitancia parasitas.....	183
9.3 Prácticas en el diseño de SPT para sistemas de protección contra rayos	184

Tabla de contenido

9.3.1	Integración de los elementos metálicos de la estructura en una red de equipotencialización RE.	184
9.3.2	Posicionamiento de los conductores de puesta a tierra y conexión con la estructura de la edificación [20].	185
9.3.3	Dimensionamiento de componentes del SPT de los SIPRA.	187
9.4	Prácticas en el diseño del SPT y cableado en circuitos de potencia.	189
	Práctica recomendada.	190
	Buenas prácticas de conexión a tierra y cableado de circuitos de potencia.	190
9.4.1	Disminución de la impedancia de puesta a tierra y mejoramiento de la distribución de potencial en el terreno.	190
9.4.2	Consideraciones en el tratamiento del terreno para reducir la impedancia de puesta a tierra [11], [9].	195
9.4.3	Consideraciones de cableado y conexión a tierra de equipos.	197
9.4.4	Separación de circuitos para mitigar la IEM debida a los armónicos de tensión [27].	198
10.	Conclusiones	199
10.1	Proyectos de investigación y proyectos dirigidos	200
10.2	Publicaciones realizadas.	200
11.	Recomendaciones	202
	Referencias	203
	Anexos.	212

Lista de Figuras

Figura 1. Errores típicos de cableado en circuitos ramales.	37
Figura 2. Configuración tierra aislada.	38
Figura 3. Diferencias de potencial entre la construcción y los equipos electrónicos.	38
Figura 4. Diferencias de potencial en equipos remotos.	39
Figura 5. Problemas en la operación de protecciones con configuraciones aisladas del SPT.	40
Figura 6. Computador y las interfaces de periféricos con el cableado y las rutas de circuito de referencia de puesta a tierra.	41
Figura 7. Daño en un equipo de TI, debido al impacto de una sobretensión transitoria.....	41
Figura 8. Impedancia vs frecuencia de un electrodo de puesta a tierra para dos configuraciones A y B.	43
Figura 9. Resonancia característica de los conductores.	44
Figura 10. Instalación incorrecta de una tierra "aislada o dedicada" para una máquina CNC.	50
Figura 11. Espectro armónico de fuentes de alimentación conmutada.....	51
Figura 12 Espectro armónico de un variador de velocidad trifásico.....	52
Figura 13. Protección contra-sobrecorriente del generador	56
Figura 14. Campo electromagnético producido por la corriente de carga	58
Figura 15. Campo electromagnético en los devanados, producido por la corriente de carga.	60
Figura 16. Red de equipotencialización y terminal de puesta a tierra.	66
Figura 17. Terminal del sistema de puesta a tierra en forma de malla	68
Figuras 18. a) y 18. b) Utilización de acero de refuerzo para la unión equipotencial.....	70
Figura 19. Conductores bajantes internos en estructuras industriales	70
Figura 20. Unión equipotencial en una estructura con refuerzos de acero.	71
Figura 21. Integración de partes conductoras de los sistemas internos a la red de equipotencialización.	71
Figura 22. Combinaciones de los métodos de integración de las partes conductoras de los sistemas internos en la red de equipotencialización.	72
Figura 23. Esquema general de la configuración tipo A.....	73
Figura 24. Esquema de anillo perimetral de tierra tipo B.	74
Figura 25. Esquema general de la configuración tipo B.....	75
Figura 26. Arreglo de red de equipotencialización	76
Figura 27. Topología del concepto de blindajes con interfaces en puntos de penetración.	77
Figura 28. Lazo de inducción entre generador de sobretensiones y receptor.	79
Figura 29. Circuito interconectado mediante cable coaxial sin conexiones a masa.	79
Figura 30. Circuito interconectado mediante cable blindado con conexión a masa.....	80
Figura 31. Blindaje efectivo frente a campos magnéticos sin conexión a masa.	80
Figura 32. Blindaje efectivo frente a campos magnéticos con conexión a masa.	81
Figura 33. Formas de conexión de un cable blindado.....	82
Figura 34. Principio general para las diferentes ZPR.	84

Figura 35. Zonas de protección contra rayos para medidas de protección contra el IER.	85
Figura 36. Equipotencialización en anillo de los electrodos de puesta a tierra.	87
Figura 37. Procedimiento de instalación de un sistema coordinado de DPS.	92
Figura 38. Ejemplo de aplicación de DPS en una instalación eléctrica.	92
Figura 39. Modelo básico para la coordinación de energía de DPS.	93
Figura 40. Esquema de coordinación energética de DPS.	94
Figura 41. Ejemplo de la situación del IER debido al impacto del rayo.	95
Figura 42. MPR que utilizan blindajes espaciales y un sistema coordinado de DPS, –contra surges ($\mathbf{U2} \ll \mathbf{U0}$ y $\mathbf{I2} \ll \mathbf{I0}$)) y radiación de campos magnéticos ($\mathbf{H2} \ll \mathbf{H0}$).	96
Figura 43. MPR que utiliza un blindaje espacial de la ZPR 1 y DPS en la entrada de la ZPR 1, contra surges ($\mathbf{U1} \ll \mathbf{U0}$ y $\mathbf{I1} \ll \mathbf{I0}$) y radiación de campos magnéticos ($\mathbf{H1} \ll \mathbf{H0}$).	96
Figura 44. MPR que utiliza blindajes de líneas internas y DPS en la entrada de la ZPR 1. Contra surges ($\mathbf{U2} \ll \mathbf{U0}$ y $\mathbf{I2} \ll \mathbf{I0}$) y radiación de campos magnéticos ($\mathbf{H2} \ll \mathbf{H0}$).	97
Figura 45. MPR que utiliza solo un sistema coordinado de DPS. Contra surges conducidas ($\mathbf{I2} \ll \mathbf{I0}$ y $\mathbf{U2} \ll \mathbf{U0}$), pero no contra la radiación de campos magnéticos ($\mathbf{H0}$).	97
Figura 46. Interconexión de dos ZPR 1 usando DPS.	98
Figura 47. Interconexión de dos ZPR 1 usando cables o ductos portacables blindados.	99
Figura 48. Interconexión de dos ZPR 2 usando DPS.	99
Figura 49. Interconexión de dos ZPR 2 usando cables o ductos portacables blindados.	99
Figura 50. Transformador fuera de la estructura.	100
Figura 51. Transformador en el interior de la estructura.	100
Figura 52. Coordinación de dos DPS (Entre las ZPR 0/1 y Entre la ZPR 1/2).	101
Figura 53. Reducción en el número de DPS	101
Figura 54. Parámetros de atenuación y pérdidas de inserción antes de la implementación	104
Figura 55. Parámetros de atenuación y pérdidas de inserción después de implementado.	104
Figura 56. Prevención de la interferencia sobre los equipos instalados.	106
Figura 57. Reducción de las perturbaciones en la red de distribución y el medio.	106
Figura 58. Procedimiento básico para la selección de filtros.	107
Figura 59. Ejemplos de pérdidas de inserción característicos en filtros de potencia a.c/d.c	110
Figura 60. Montaje de filtros	113
Figura 61. Conexión de cables blindados	114
Figura 62. Ejemplo de integración de filtros sobre equipos en gabinetes.	114
Figura 63. Ejemplo de filtro montado en una unidad dedicada.	115
Figura 64. Propagación de una onda de anillo de 0,5 μ S a 100 kHz, aplicada en modo diferencial, a través de un transformador de aislamiento ordinario	118
Figura 65. Propagación de una onda de anillo 0,5 μ S a 100 kHz operando en modo diferencial sobre un transformador de aislamiento de línea.	119
Figura 66. Interdevanado de acoplamiento en un transformador de aislamiento.	119
Figura 67. Filtrado de corrientes de tierra inducidas, el ruido de los variadores y armónicos triple n a través de transformadores de aislamiento.	121
Figura 68. Requerimientos de puesta a tierra de un transformador de aislamiento.	122
Figura 69. Dispositivo de desacoplamiento dinámico - Configuración básica.	123
Figura 70. Dispositivo de desacoplamiento dinámico. Configuración con banco de baterías.	123
Figura 71. Curva de ajuste de potencia (HVF).	150
Figura 72. Curva de reducción de potencia.	151
Figura 73. Valores típicos de reducción de potencia de motores diseño N	153

Lista de Figuras

Figura 74. Diferentes tipos de canalizaciones sometidas a un campo EM uniforme de 30 V/m	165
Figura 75. Distancia de separación recomendada entre bandejas portacables.....	166
Figura 76. Puestas a tierra en bandejas portacables.....	167
Figura 77. Conductividad eléctrica en bandejas portacables	167
Figura 78. Cruce de distintos tipos de cable en diferentes bandejas portacables	168
Figura 79. Conexión a tierra exclusiva para equipos electrónicos en un sistema de control alojado en un gabinete	171
Figura 80. Conexión a tierra exclusiva para equipos electrónicos en un sistema de control alojado en múltiples gabinetes.....	171
Figura 81. Conductor de puesta a tierra aislada para toma de equipos sensibles.....	172
Figura 82. Toma convencional y toma de tierra aislado IGR.	172
Figura 83. Esquema configuración tipo árbol “TREE”.....	174
Figura 84. Impedancia de los conductores de puesta a tierra en la configuración SPG.	174
Figura 85. Unidades de electrónicas conectadas usando las configuraciones SPG y SRS.....	175
Figura 86. Impedancia de los conductores de puesta a tierra para un centro de cómputo	177
Figura 87. Modelo del flujo de corriente a través de un SRP considerando el modelo de impedancia por metro cuadrado.	177
Figura 88. Construcción de una SRP utilizando hojas en acero galvanizado Steel Deck.	178
Figura 89. Pedestal para subestructura de piso elevado y conductores que componen la SRG.....	180
Figura 90. Esquema de conexiones de una SRG utilizando una estructura con piso elevado.	180
Figura 91. Uso de varillas de acero estructural como alternativa para una SRG.....	181
Figura 92. Modelo de la estructura de refuerzo y los conductores de puesta a tierra.....	185
Figura 93. Máxima sobretensión presentada entre el conductor de puesta a tierra y la estructura vs distancia entre ellos.....	186
Figura 94. Distancia entre el conductor del SPT y la columna central de la construcción.	186
Figura 95. Bucle en un conductor bajante.....	188
Figura 96. Espaciamiento no uniforme de los conductores de la malla de puesta a tierra.	191
Figura 97. Resistencia de puesta a tierra para diferentes configuraciones de rejillas y diferentes profundidades en un área específica.	191
Figura 98. Tensión de contacto para diferentes arreglos de rejillas y profundidad de enterramiento en un área dada.	192
Figura 99. Tensión de paso para diferentes arreglos de rejillas y profundidad de enterramiento en un área dada.	192
Figura 100. Curva de respuesta de electrodos de puesta a tierra conectados en paralelo.....	194
Figura 101. Puesta a tierra de una subestación aérea.....	194
Figura 102. Desarrollo de la resistencia de un electrodo.	195
Figura 103. Separación de las cargas lineales de las no lineales.	198
Figura 104. Conductor continuamente transpuesto.	216
Figura 105. Potencias de entrada, pérdidas y potencia de salida en un motor de inducción.....	228
Figura 106. Aumento de la temperatura adicional contra la función del factor armónico.....	235
Figura 107. Pérdida de vida útil del motor de 100 hp	236
Figura 108. Pérdida útil de varios motores	236
Figura 109. Clasificación de las fuentes de ruido en motores eléctricos	237
Figura 110. Factor de potencia en función de la distorsión armónica de tensión	238
Figura 111. Eficiencia en función de la distorsión armónica	239
Figura 112. Componentes simétricas: Secuencias.....	240

Lista de Figuras

Figura 113. Componentes de la compatibilidad electromagnética	246
Figura 114. Origen de las perturbaciones electromagnéticas	247
Figura 115. Puertos de entrada de las perturbaciones electromagnéticas conducidas.....	250
Figura 116. Circuito en modo diferencial	250
Figura 117. Circuito en modo común.....	251
Figura 118. Curva CBEMA, tolerancia de los equipos a variaciones de tensión del sistema de alimentación	253
Figura 119. Métodos de puesta a tierra del neutro y sus diagramas equivalentes	256
Figura 120. Sistema no puesto a tierra: (A) Configuración del circuito, (B) Diagrama vectorial.	257
Figura 121. Limitación de la corriente de falla en el método de puesta a tierra mediante resistencia ..	259
Figura 122. Falla monofásica a tierra en un sistema puesto a tierra mediante una reactancia. A) Configuración del circuito, B) Diagrama fasorial	260
Figura 123 Falla monofásica a tierra en un sistema de puesta a tierra resonante. A) Configuración del circuito B) Diagrama vectorial.	261

Lista de Tablas

Tabla 1. Rango de tensiones estáticas producidas por diferentes procesos.....	55
. 2 Convertidor armónico de seis pulsos.	62
Tabla 3. Clases de DPS.....	86
Tabla 4. Materiales y dimensiones para los componentes de equipotencialización	89
Tabla 5. Espectro armónico para la corriente de carga máxima para el Ejemplo en 5.1.2.	126
Tabla 6. Cálculos del factor armónico de pérdidas para el Ejemplo en 5.1.2.	127
Tabla 7. Distribución armónica para la corriente de carga máxima Ejemplo en 5.1.3.	128
Tabla 8. Cálculos del factor armónico de pérdidas para el Ejemplo en 5.1.3.	129
Tabla 9. Pérdidas medidas en condiciones nominales.....	131
Tabla. 10 Elevaciones de temperatura respecto a la temperatura ambiente.....	131
Tabla 11. Distribución armónica de corriente de carga máxima para el Ejemplo en 5.1.5.....	131
Tabla 12. Cálculos del factor armónico de pérdidas para el Ejemplo en 5.1.5.	132
Tabla 13 Pérdidas por dispersión	133
Tabla 14. Corrección de las pérdidas.....	133
Tabla 15. Distribución armónica para la corriente de carga máxima para el Ejemplo 5.2.2.	137
Tabla 16. Cálculos del factor armónico de pérdidas para el Ejemplo 5.2.2.	139
Tabla 17. Pérdidas medidas Ejemplo 5.2.4.....	141
Tabla 18. Elevaciones de temperatura para el Ejemplo 5.2.4	141
Tabla 19. Pérdidas por corrientes de eddy y por dispersión para el Ejemplo 5.2.4.....	141
Tabla 20. Distribución armónica para corriente de carga máxima para el Ejemplo 5.2.4.	141
Tabla 21. Cálculos del factor armónico de pérdidas para el Ejemplo en 5.2.4.	142
Tabla 22. Corrección de las pérdidas.....	143
Tabla 23. Ejemplo de cálculo del K- Factor	146
Tabla 24. Comparación del K- Factor y el factor armónico de carga para diferentes cargas	147
Tabla 25. Factores de reducción para corrientes armónicas en cables con cuatro o cinco conductores .	158
Tabla 26. Factor de Efecto Piel para cualquier tipo de conductor	161
Tabla 27. Problemas de compatibilidad de electromagnética y buenas prácticas en la configuración de la conexión y estructuras de referencia para equipo sensible	170
Tabla 28. Problemas de compatibilidad de electromagnética y buenas prácticas en el diseño de los SPT de equipos sensibles.....	181
Tabla 29. Problemas de compatibilidad de electromagnética y buenas prácticas en el diseño de los SPT de SIPRA para su mitigación.....	184
Tabla 30. Valores típicos de distancia entre conductores bajantes.	187
Tabla 31. Aislamiento entre elementos del SIPRA externo – Valores de coeficientes ki.....	188
Tabla 32. Aislamiento entre elementos del SIPRA externo – Valores de coeficientes kc	188
Tabla 33. Aislamiento entre elementos del SIPRA externo – Valores de coeficientes km	189

Lista de Tablas

Tabla 34. Problemas de compatibilidad de electromagnética y buenas prácticas en el diseño de los SPT de potencia para su mitigación.	190
Tabla 35. Impedancias de puesta a tierra.	193
Tabla 36. Porcentaje aproximado del desarrollo de la resistencia de puesta a tierra de un electrodo de 3m de longitud y 15.88 mm de diámetro.	196
Tabla 37. Ejemplo de distribución armónica normalizada al valor eficaz de la corriente de carga.	220
Tabla 38. Cálculos para la distribución armónica de la Tabla 37	220
Tabla 39. Ejemplo de una distribución armónica normalizada al valor eficaz de la corriente fundamental.	221
Tabla 40. Cálculos para la distribución armónica de la Tabla 39	222
Tabla 41. Cálculo del Factor armónico para las pérdidas por dispersión	223
Tabla 42. Límites de distorsión armónica de tensión en % de la tensión nominal	232
Tabla 43. Límites de distorsión armónica de corriente en % de la corriente nominal	233
Tabla 44. Medida y cálculo de pérdidas armónicas	234
Tabla 45. Factor de potencia en función de la distorsión armónica de tensión	238
Tabla 46. Eficiencia en función de la distorsión armónica.....	239
Tabla 47. Clasificación de las perturbaciones electromagnéticas	248
Tabla 48. Ejemplos de fuentes de perturbaciones conducidas y su espectro de frecuencia	249
Tabla 49. Tipos y características de las perturbaciones radiadas	251
Tabla 50. Fuentes de perturbación electromagnética por radiación y espectros de frecuencia.....	252
Tabla 51. Características de los métodos de conexión a tierra	263

Lista de Ecuaciones

Ecuación 2-1	45
Ecuación 2-2	59
Ecuación 2-3	59
Ecuación 3-1	88
Ecuación 3-2	90
Ecuación 4-1	103
Ecuación 5-1	125
Ecuación 5-2	126
Ecuación 5-3	126
Ecuación 5-4	127
Ecuación 5-5	127
Ecuación 5-6	128
Ecuación 5-7	129
Ecuación 5-8	129
Ecuación 5-9	130
Ecuación 5-10.....	130
Ecuación 5-11.....	130
Ecuación 5-12.....	132
Ecuación 5-13.....	132
Ecuación 5-14.....	133
Ecuación 5-15.....	133
Ecuación 5-16.....	134
Ecuación 5-17.....	135
Ecuación 5-18.....	136
Ecuación 5-19.....	136
Ecuación 5-20.....	136
Ecuación 5-21.....	136
Ecuación 5-22.....	136
Ecuación 5-23.....	136
Ecuación 5-24.....	137
Ecuación 5-25.....	139
Ecuación 5-26.....	144
Ecuación 5-27.....	144
Ecuación 5-28.....	145
Ecuación 5-29.....	145
Ecuación 5-30.....	145

Lista de Ecuaciones

Ecuación 5-31	145
Ecuación 5-32	147
Ecuación 5-33	148
Ecuación 5-34	148
Ecuación 6-1	150
Ecuación 6-2	152
Ecuación 6-3	153
Ecuación 7-1	160
Ecuación 7-2	160
Ecuación 7-3	160
Ecuación 7-4	161
Ecuación 7-5	162
Ecuación 7-6	162
Ecuación 7-7	162
Ecuación 7-8	163
Ecuación 9-1	183
Ecuación 9-2	188
Ecuación 0-1	213
Ecuación 0-2	213
Ecuación 0-3	214
Ecuación 0-4	214
Ecuación 0-5	215
Ecuación 0-6	217
Ecuación 0-7	217
Ecuación 0-8	217
Ecuación 0-9	218
Ecuación 0-10	218
Ecuación 0-11	218
Ecuación 0-12	219
Ecuación 0-13	219
Ecuación 0-14	219
Ecuación 0-15	220
Ecuación 0-16	222
Ecuación 0-17	223
Ecuación 0-18	223
Ecuación 0-19	225
Ecuación 0-1	227
Ecuación 0-2	227
Ecuación 0-3	228
Ecuación 0-4	229
Ecuación 0-5	230
Ecuación 0-6	230
Ecuación 0-7	230
Ecuación 0-8	231
Ecuación 0-9	232
Ecuación 0-10	233

Lista de Ecuaciones

Ecuación 0-11.....	233
Ecuación 0-12.....	233
Ecuación 0-13.....	235
Ecuación 0-14.....	242
Ecuación 0-15.....	243
Ecuación 0-16.....	243
Ecuación 0-17.....	243
Ecuación 0-18.....	244
Ecuación 0-19.....	244
Ecuación 0-20.....	244

Lista de Anexos

Anexo A: Consideraciones generales para el cálculo de la capacidad equivalente del transformador

Anexo B: Consideraciones generales para el cálculo de la reducción de potencia de los motores de inducción

Anexo C: Aspectos generales de la compatibilidad electromagnética.

Anexo D: Curva CBEMA.

Anexo E: Recomendaciones para la construcción de las mallas de referencia de señal SRG

RESUMEN

TITULO: PROPUESTA PARA EL DISEÑO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE USO FINAL MEDIANTE LA INCORPORACIÓN DE CRITERIOS LEGALES, REGLAMENTARIOS, NORMATIVOS Y TÉCNICOS CONSIDERANDO PARÁMETROS DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA¹

AUTOR: Gabriel Alexis Malagón Carvajal²

PALABRAS CLAVE: Diseño de instalaciones eléctricas de uso final, compatibilidad electromagnética, calidad de la energía, sistemas de puesta a tierra, sistemas de protección contra rayos, protecciones eléctricas, dimensionamiento de transformadores y motores, dimensionamiento de conductores y canalizaciones.

CONTENIDO: El aumento de cargas electrónicas en instalaciones eléctricas industriales, comerciales y residenciales y su susceptibilidad a las interferencias electromagnéticas, ha incrementado en gran medida el interés en la naturaleza de estas cargas y las perturbaciones eléctricas en la instalación, con el fin de establecer prácticas de diseño que puedan configurar una instalación eléctrica segura y eficiente.

Este documento presenta en el capítulo uno los criterios legales, normativos y técnicos relacionados con compatibilidad electromagnética y el diseño de instalaciones eléctricas, a nivel nacional e internacional. En el capítulo dos, se estudian los parámetros y problemas relacionados con la compatibilidad electromagnética de equipos e instalaciones de uso final.

Por otra parte, en el capítulo tres se presentan una serie de buenas prácticas orientadas a la mitigación de los fenómenos producidos por el impulso electromagnético del rayo dentro del sistema de protección contrarayos. Así mismo, el capítulo cuatro, se orienta a la mitigación de los fenómenos de principal afectación sobre las protecciones eléctricas, en este caso particular, los fenómenos relacionados con armónicos en instalaciones de uso final.

De igual forma, el capítulo cinco se ha orientado a establecer una serie de buenas prácticas para el dimensionamiento de transformadores. Del mismo modo, en el capítulo seis, se aborda la temática relacionada con motores, en un ambiente con problemas de compatibilidad electromagnética. Por otro lado, en el capítulo siete se presentan algunas prácticas para el dimensionamiento de conductores en instalaciones con alto contenido armónico y las estrategias para la mitigación de los fenómenos asociados. De igual forma, en capítulo ocho presenta el tema de dimensionamiento de canalizaciones en ambientes electromagnéticos no favorables. En el capítulo nueve se aborda la problemática y las estrategias de solución desde el diseño de sistemas de puesta a tierra. Finalmente en los capítulos diez y once se da paso a las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo de investigación.

¹ Trabajo de Investigación.

² Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica –GISEL-Director: Dr. Gabriel Ordóñez Plata, Codirector: M.P.E Wilson Giraldo Picón.

ABSTRACT

TITLE: PROPOSAL FOR DESIGN OF ELECTRICAL FACILITIES OF END USE, THROUGH THE INCORPORATION OF LEGAL, REGULATORY AND TECHNICAL CRITERIAS, CONSIDERING ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY PARAMETERS³.

AUTHOR: Gabriel Alexis Malagón Carvajal⁴

KEYWORDS: Design of electrical installations, electromagnetic compatibility, power quality, earthing system, lighting protection system, transformers and motor sizing, conductors and electrical conduits sizing.

CONTENT: The proliferation of electronic loads into industrial, commercial and residential electrical installations, and their susceptibility to electromagnetic interference, has greatly increased the interest in considering the nature of these loads in addition to the electrical disturbances at the facility, with the purpose of establish design practices that configure a safe and efficient electrical installation.

This document presents in chapter one, the legal, regulatory and technical nationally and internationally criteria related to electromagnetic compatibility and design of electrical facilities. In chapter two, parameters and problems related to electromagnetic compatibility of equipment and end use facilities are studied.

Moreover, in chapter three a number of good practices aimed at mitigating the phenomena produced by the lightning electromagnetic pulse within contrarayos protection system are presented. Likewise, chapter four, is aimed at mitigating the principal phenomena of electrical protection involvement in this particular case the phenomena related to harmonics in end use facilities.

Similarly, the fifth chapter has focused on a set of best practices for sizing transformers. Similarly, in chapter six subjects related engines addressed in an environment with EMC problems. Furthermore, in chapter seven some practices for sizing conductors in systems with high harmonic content and strategies for mitigating the associated phenomena are presented. In the same way, in chapter eight presents the subject sizing pipelines under undesirable electromagnetic environments. In chapter nine the problems and solution strategies for the design of grounding systems is addressed. Finally in ten eleven chapters gives way to the conclusions and recommendations of this research.

³ Master Thesis topic.

⁴ Faculty of Physical-Mechanics Engineering. School of Electric, Electronic and Telecommunication Engineering. Research Group GISEL. Director: Dr. Gabriel Ordóñez Plata, Co-director: M.P.E Wilson Giraldo Picón.

Introducción

El desarrollo de los sistemas electrónicos, ha desencadenado un cambio radical en la naturaleza de las cargas presentes en las instalaciones eléctricas de uso final. En el entorno industrial se encuentran aplicaciones de control basadas en microprocesadores, PLC's, variadores de velocidad y en general sistemas que operan utilizando variables digitales y sensores, y así como los demás equipos electrónicos.

En el sector comercial se utilizan por ejemplo, computadores personales (PC's), máquinas de fax, fotocopadoras, iluminación electrónica tipo LED y fluorescente⁵, así como equipos de telecomunicaciones. Incluso en el sector residencial, se observa el desarrollo de equipos electrónicos en cada habitación que van desde juguetes hasta las herramientas de cocina, ordenadores personales, Smartphone, tabletas, sistemas de entretenimiento doméstico, consolas de vídeo juegos, videograbadoras, reproductores de DVD, y relojes digitales entre otros.

Estos sistemas electrónicos presentes en cualquier tipo de instalación eléctrica de uso final utilizan señales con niveles de potencia muy bajos, lo cual los hace susceptibles a tensiones muy por debajo de los niveles perceptibles por los seres humanos y que no tienen ningún efecto sobre los equipos de potencia eléctrica. Por ejemplo, el equipo electrónico más moderno, es altamente sensible a cargas estáticas de tensión generadas por los seres humanos mediante movimientos simples del cuerpo.

Por otra parte, las corrientes inyectadas en la tierra por efecto de las descargas atmosféricas pueden causar serios daños en los equipos electrónicos, incluso si la descarga se presenta a varios kilómetros, efectos que se pueden contrarrestar con algunos mecanismos de mitigación.

En el Anexo D: Curva CBEMA. se presenta la tolerancia de las aplicaciones electrónicas o sensibles en tecnologías de la información, con respecto a perturbaciones asociadas a la calidad de la energía. Estos problemas de compatibilidad electromagnética en las instalaciones eléctricas de uso final han incrementado notablemente el interés y

⁵ La iluminación fluorescente y tipo LED son cargas lineales muy comunes al interior de las instalaciones eléctricas de uso final.

la necesidad de un diseño eléctrico que aporte soluciones en procura de mitigar problemas operativos de los sistemas eléctricos, haciendo que estos sean más eficientes y seguros y que al mismo tiempo incluyan prácticas de ingeniería que aborden la solución a los problemas inherentes a este tipo de cargas.

El interés en la solución de esta problemática se ve materializado después de la puesta en marcha de la instalación, pues es en este momento cuando los problemas en los equipos empiezan a ocurrir, situación que en muchos casos genera prácticas improvisadas e inseguras que siguen sin resolver los problemas de operación. Con el fin de dar solución a esta problemática, se ha encontrado que un diseño con buenas prácticas de compatibilidad electromagnética, permite enfrentar los problemas de calidad de la energía y en general mitigar las perturbaciones electromagnéticas en los equipos y sistemas electrónicos, manteniendo la seguridad de la instalación.

1. Criterios legales, normativos y técnicos.

1.1 Perspectiva general.

Los criterios legales, normativos y técnicos permiten establecer las metodologías básicas para el diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento de cualquier proyecto de ingeniería. A través de estos aspectos se identifican las exigencias mínimas de obligatorio cumplimiento por parte de los involucrados, de forma que se pueda garantizar la seguridad, eficiencia y calidad del producto final, proporcionando las herramientas legales para la fiscalización de aquellos que incumplan estos requisitos mínimos.

Este capítulo está enfocado a identificar los principales estándares, normas y reglamentos en los que se definen los alcances técnicos, temáticos y legales relacionados con la compatibilidad electromagnética, como soporte para el diseño, desde la perspectiva vigente en Colombia y en el mundo. Para ello, en la sección 1.2 se describirán las normas y reglamentos relacionados con CEM en Colombia. Paso seguido, en la sección 1.3, se enumeran las normas internacionales relacionadas con CEM. En el numeral 1.4 se revisan las publicaciones nacionales en materia de diseño de instalaciones eléctricas. En la misma línea, en la sección 1.5, se especifican las normas relacionadas con CEM de implicación directa sobre los sistemas de protección contrarayos y protecciones. Así mismo en la sección 1.6, se abordarán las normas CEM relacionadas con sistemas de puesta a tierra. Finalmente, en la sección 1.7, se citan algunas normas relacionadas con transformadores, motores y equipos asociados.

1.2 Reglamentación y normas relacionadas con compatibilidad electromagnética en Colombia.

El Ministerio de Minas y Energía, como máxima autoridad en materia energética en Colombia, estableció el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas [1], como el documento de referencia para el diseño, instalación, montaje o construcción, inspección,

operación y mantenimiento de instalaciones eléctricas. La más reciente actualización corresponde a la Resolución No. 90708 de Agosto 30 del 2013 y en ella se especifican los diferentes parámetros de diseño que se deben cumplir en una instalación eléctrica de uso final, con el principal objetivo de garantizar el adecuado funcionamiento de las instalaciones y la seguridad de quienes las operan.

Desde la perspectiva de la compatibilidad electromagnética (CEM), el RETIE [1] presenta un avance significativo con la inclusión del Artículo 6°. Análisis de compatibilidad electromagnética (2008), en donde por primera vez se dan algunas definiciones importantes relacionadas con la compatibilidad electromagnética. En la actualización del 2013, se establece en el Artículo 11°. Compatibilidad electromagnética, que a partir del 1 de enero del 2016, los equipos objeto del reglamento y de regulación internacional sobre CEM, deben marcarse con grupo y clase de compatibilidad electromagnética, conforme a las normas internacionales vigentes, abriendo un nuevo panorama en materia de evaluación y certificación de CEM en Colombia.

Por otro lado, en el artículo 14° “Campos electromagnéticos” [1], se definen las exigencias para la intensidad de campo eléctrico y densidad de flujo magnético para las zonas de permanencia de personas sin importar el tiempo, tomando como base los criterios de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la institución internacional ICNIRP⁶, para la protección de las personas y el medio ambiente frente a las radiaciones no-ionizantes. En este artículo, también se suministran guías y recomendaciones para evitar la exposición a dichas radiaciones, así como algunas directrices para el cálculo y medición de campos electromagnéticos.

Así mismo, el Artículo 15°. Puestas a tierra, expresa textualmente:

“Los objetivos de un sistema de puesta a tierra (SPT) son: La seguridad de las personas, la protección de las instalaciones y la compatibilidad electromagnética” [1]

De esta manera, además de darle importancia a la seguridad de las personas y las instalaciones, incluye la relación directa del sistema de puesta a tierra con la compatibilidad electromagnética de la instalación, representando una herramienta para la mitigación de las perturbaciones electromagnéticas que generan dificultades en la operación de los equipos y riesgo eléctrico sobre las personas.

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

⁶ International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.

- NTC 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.
- NTC-IEC 61000-1-1 Compatibilidad electromagnética CEM parte I Generalidades. Sección 1. Aplicación y presentación de definiciones y términos fundamentales. ICONTEC. 2000.
- NTC-IEC 61000-4-30 - Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-30: técnicas de ensayo y de medida. Métodos de medida de la calidad de potencia. ICONTEC. 2012
- NTC 4947 - Accionamientos eléctricos de velocidad variable. Requisitos de compatibilidad electromagnética (CEM) y métodos de ensayo específico ICONTEC. 2007
- NTC 4628. Calificación de conexiones permanentes usadas en puestas a tierra en subestaciones. ICONTEC. 1999
- NTC 4552. Protección contra descargas eléctricas atmosféricas. Parte 1: Principios generales. ICONTEC. 2008
- NTC 4552. Protección contra descargas eléctricas atmosféricas. Parte 2: Manejo del Riesgo. ICONTEC. 2008
- NTC 4552. Protección contra descargas eléctricas atmosféricas. Parte 3: Daños Físicos a estructuras y amenazas a la vida. ICONTEC. 2008
- GTC 174. Protección contra las perturbaciones. Evaluación del riesgo de daños en las instalaciones de telecomunicaciones debido a las descargas del rayo. ICONTEC. 2008
- NTC 4628. Calificación de conexiones permanentes usadas en puestas a tierra en subestaciones. ICONTEC. 1999
- NTC 4171. Telecomunicaciones. Nuevas tecnologías. Requisitos para la conexión y continuidad de tierra para telecomunicaciones en construcciones comerciales. ICONTEC. 1997
- NTC 2155. Conectores de potencia para subestaciones eléctricas. ICONTEC. 2000
- NTC 2206. Equipo de conexión y puesta a tierra. ICONTEC. 2001
- Proyecto de Norma Técnica en Sistemas de Puesta a tierra 389/03 (En estudio)

Esta Normatividad, representa un gran avance en Colombia en el ámbito de compatibilidad electromagnética, brindando una serie de criterios a tener en consideración durante la planeación, diseño, construcción, puesta en marcha y mantenimiento de una instalación eléctrica de uso final. Aunque no profundizan en prácticas enfocadas a mitigar los fenómenos que causan incompatibilidad

electromagnética, ofrecen importantes definiciones, además de un soporte técnico para establecer estándares de calidad al interior de las instalaciones.

1.3 Normas internacionales relacionadas con CEM.

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

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

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

Part 1: General.

Part 2: Environment.

Part 3: Limits.

Part 4: Testing and measurement techniques.

Part 5: Installation and mitigation guidelines.

Part 6: Generic standards.

Part 9: Miscellaneous

Así mismo la serie IEC CISPR 16, se encuentra dividida en cuatro partes:

CISPR 16-1: Voltage, current and field measuring apparatus

CISPR 16-2: Methods for measuring high-frequency EMC phenomena, dealing both with disturbances and immunity

CISPR 16-3: Specific technical reports and information on the history of CISPR

CISPR 16-4: Information related to uncertainties, statistics and limit modelling

Por otra parte, las normas de algunos comités como la NFPA, CENELEC, AENOR y la EC con establecidas por comités regionales que toman como referencia las publicaciones de las normas IEC, reflejando la importancia que le ha dado a la CEM la Comunidad Europea no solo en el escenario industrial sino, en gran cantidad de equipos como electrodomésticos, máquinas de baja tensión e instalaciones eléctricas de uso final.

Por ello, en julio de 2007 en el Reino Unido y Europa se dio un gran paso con la inclusión en la versión de borrador de la EMC Directive 2004/108/EC (versión revisada en abril del 2010), 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. En esta última versión de la directiva, aunque aún no se establece ninguna obligación jurídica para la construcción de instalaciones eléctricas, la mayoría de los usuarios sí tienen la obligación legal con respecto a ellas.

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

1.4 Normas y reglamentos en Colombia asociados con diseño de instalaciones eléctricas.

En materia de diseño de instalaciones eléctricas el RETIE [1], a través del capítulo 2, artículo 10: "Requerimientos generales de las instalaciones eléctricas", contempla 23 ítems para el diseño de una instalación eléctrica. El desarrollo de este trabajo de investigación, busca identificar parámetros de compatibilidad electromagnética y prácticas, que procuren la mitigación de las perturbaciones asociadas a 7 categorías especificadas que agrupan algunos de estos requerimientos, estas categorías son citadas a continuación:

- Dimensionamiento del sistema de protección contra rayos en instalaciones eléctricas de uso final
- Dimensionamiento de protecciones de instalaciones eléctricas de uso final
- Dimensionamiento de transformadores en instalaciones eléctricas de uso final
- Dimensionamiento de motores en instalaciones eléctricas de uso final
- Dimensionamiento de conductores en instalaciones eléctricas de uso final
- Dimensionamiento de ductos, (tuberías, canalizaciones, canaletas) en instalaciones eléctricas de uso final.
- Dimensionamiento del sistema de puestas a tierra en instalaciones eléctricas de uso final.

Por su parte, el RETIE asocia para el diseño de sistemas de protección contra rayos las referencias, [2], [3], [4]; y tan solo en el anexo E.4 en la referencia [4], se hace referencia a la compatibilidad electromagnética, en donde textualmente se afirma:

“El diseñador e instalador de un SIPRA debe estar en capacidad 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”.

Así pues, el RETIE [1], no hace referencia a la forma como las diferentes perturbaciones pueden generar incompatibilidad electromagnética en una instalación, ni mucho menos en la manera en que se podrían mitigar dichas perturbaciones.

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

En el ámbito internacional se encuentran más de 100 publicaciones en torno al tema de Protección contra rayos [5], por su parte los EE.UU. a través del comité técnico NFPA-780 junto con la publicación del mismo nombre [6] ha sido objeto de mejoras significativas con la nueva información acerca de la protección contra sobretensiones; actualmente este estándar ya cuenta con 26 revisiones desde su publicación en 1904. Por su parte Estados Unidos, a través del Departamento de Energía, público en el año 2002 M440.1-1 [7], para su aplicación en instalaciones con ambientes explosivos, así mismo el Departamento de transporte Federal público en el 2005 a FAA-STD-019E [8].orientado a protección contra rayos para equipo electrónico.

Ahora bien existen otros códigos en países como Singapur, (CP 33), Australia / Nueva Zelanda (AS/ANZ-1786), Sudáfrica (SABS-03), y la India (IS-2309), los cuales se basan en el estándar de Inglaterra (BS-6651). Otras normas nacionales, como la alemana (VDE-0185), la china (GB 50057), la rusa (RD 34.21.122-87) y la Polaca (PN-86/E-05003/01), se han generado a partir de comités de cada país.

Por otra parte el Comité Técnico Europeo de la Comisión Electrotécnica Internacional (TC 81) ha venido trabajando fuertemente para consolidar un documentos sobre Protección contra rayos a través de la norma IEC 62305 (Protection against lightning), la cual corresponde a la base principal de la Norma Colombiana vigente NTC 4552 que se encuentra dividida en cinco partes:

- Part 1: Protection of Structures against Lightning: 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 62305 fueron publicadas a través de 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 Impulso Electromagnético del Rayo, que es la fuente principal de CEM en relación al Sistema de protección contra rayos.

Por otro lado 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. Todos estos estándares, normativas y reglamentos constituyen la base para el camino recorrido para la serie de buenas prácticas descritas en el Capítulo 3 y el Capítulo 4 del presente trabajo de investigación.

1.6 Normas relacionadas con CEM a nivel internacional asociadas con los SPT.

De acuerdo con los escenarios de aplicación de los sistemas de puesta a tierra descritos por la referencia [9] y citados a continuación: SPT para equipos sensibles, SPT para sistemas de potencia, SPT para protección contra rayos y SPT para control de corrosión; en el presente trabajo de investigación se abordan las siguientes normas internacionales que pueden cubrir en parte algunos de estos horizontes y de las cuales enseguida se hace una descripción básica de su contenido y relevancia:

- IEEE Std. 1100 Emerald Book. Powering and grounding electronic equipment [10]. En los capítulos 3 y 4 de este estándar, se hace mención a algunas prácticas para la puesta a tierra de equipos electrónicos. Así mismo, en la sección 9.9 se profundiza en las configuraciones recomendadas para las instalaciones de telecomunicaciones y centros de cómputo, teniendo en cuenta su susceptibilidad a los problemas calidad de la energía e incompatibilidad electromagnética debido a las prácticas de cableado de SPT habituales.
- IEEE Std. 142 Green Book. Grounding of industrial and commercial power systems [11]

Este documento además de incluir en el capítulo 5 buenas prácticas en el diseño de SPT de equipos electrónicos, también hace énfasis en cómo se deben aterrizar los

sistemas de potencia con el fin de evitar los problemas de cargas estáticas. En él, también se aborda el tema de protección respecto a descargas atmosféricas y fenómenos de incompatibilidad electromagnética que afectan seriamente las instalaciones eléctricas.

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

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

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

En estas normas IEC se abordan los mecanismos de mitigación de las perturbaciones asociadas al impulso electromagnético del rayo, como el principal causante de incompatibilidad electromagnética en un sistema de puesta a tierra de protección contra rayos. Es de anotar que aunque el alcance principal de estos estándares no es la CEM, presentan un compendio de buenas prácticas, enfocadas a lograr la seguridad y un buen desempeño de las instalaciones eléctricas y los equipos en su interior, tratando inherentemente los problemas de compatibilidad electromagnética. De esta manera, a partir de la documentación técnica se identificarán prácticas de ingeniería en el diseño de SPT enfocadas a la compatibilidad electromagnética.

1.7 Normas relacionadas con CEM en transformadores, motores y equipos asociados

El Estándar IEEE C57.110TM-2008 [12] “Recomendaciones prácticas del IEEE para el establecimiento de la capacidad de transformadores de distribución, cuando la alimentación de corrientes de cargas no es sinusoidal”, permite definir el factor de carga adecuado para un transformador sometido a corrientes no sinusoidales con solo disponer de los resultados de las pruebas de rutina. Con ello, se disminuyen los efectos causados por la circulación de corrientes con alto contenido armónico, quienes son los causantes de calentamientos debido al aumento de las pérdidas con la variación de la frecuencia

y que pueden controlarse al aplicar la recomendación de la norma en la selección del transformador, pues el valor de la corriente nominal estimado estará por debajo del valor de la corriente nominal, y así, no sobrepasar las temperaturas máximas permitidas. En Estados Unidos, con los estándares UL 1561-1994 [13] y UL 1562-1994 [14], se introduce el concepto de factor K, que indica el contenido armónico que puede soportar un transformador a corriente nominal y representa el aumento de pérdidas adicionales en los conductores asumiendo, al igual que en la referencia [12], la dependencia con el cuadrado de la frecuencia de cada armónico.

Por otra parte, las normas NEMA MG1-2011 “Motores y Generadores” [15], e IEC 60034-26 “Efectos de tensiones desbalanceadas en el rendimiento de motores de inducción trifásicos tipo jaula” [16], proponen metodologías de desclasificación de la potencia nominal del motor, recomendadas para evitar el calentamiento excesivo causado por las pérdidas adicionales producto de la distorsión armónica de la red y el desequilibrio de tensiones.

2. Parámetros que intervienen en la incompatibilidad electromagnética

En este capítulo, se expondrán los escenarios en los cuales se generan estas perturbaciones y de qué manera afectan la operación de los equipos electrónicos (Sección 2.1). Así mismo, se abordará la problemática desde la óptica de sistemas de puesta a tierra como componente básico de los sistemas de protección contrarayos (Sección 2.2). Finalmente, se revisa el problema en donde la principal afectación se da en sistemas de potencia (Sección 2.3)

2.1 Problemas de compatibilidad electromagnética en equipos electrónicos debido al SPT.

En esta sección se definen los principales problemas relacionados con incompatibilidad electromagnética en sistemas de puesta a tierra, de principal afectación sobre equipos electrónicos: En el literal 2.1.1 se contempla el problema del conexionado del conductor de tierra en múltiples puntos, al igual que las Múltiples conexiones neutro-tierra., en el numeral 2.1.2, el problema de Tierra aislada IG en el ítem 2.1.3, a su vez la descripción de los Problemas de referencia en los equipos electrónicos., en la sección 2.1.4, por su parte en el inciso 2.1.5 se contempla el problema del Incremento de la impedancia de las conexiones a tierra bajo altas frecuencias , al igual que el problema relacionado con las Perturbaciones electromagnéticas generadas por autoresonancia en los conductores del SPT en el ítem 2.1.6, adicionalmente se cita en el numeral 2.1.7 el problema de Inductancia y capacitancia parasita de los caminos compuestos por los conductores del SPT. Finalmente es descrito el problema ocasionado por Perturbaciones de modo común en las líneas de alimentación., en el literal 2.1.8.

2.1.1 Múltiples conexiones del conductor de tierra.

Teniendo en cuenta los requerimientos de seguridad consignados en el NEC [17] y adaptados en Colombia por el Código Eléctrico Colombiano [18], los equipos electrónicos

comenzaron a ser conectados a tierra. Inicialmente fueron equipontecializados al SPT de los equipos de potencia de la construcción o la instalación donde estaban ubicados. El conductor de tierra de los equipos electrónicos EGC⁷, bien podía ser un conductor verde aislado o desnudo. En muchos casos, los ductos metálicos se utilizaron como EGC. Bajo estas condiciones la tierra de los equipos terminaba conectada al conductor de tierra (conectado al neutro en el tablero principal), que ingresa al edificio junto con los conductores de alimentación.

No existía un requerimiento particular sobre a qué parte del SPT de potencia debían conectarse los equipos electrónicos, las conexiones al conductor de tierra fueron hechas generalmente en la clavija, tomacorriente o en el panel que alimentaba al equipo electrónico. Esta configuración cumplía con los requerimientos de la referencia [18] sección 250, en donde se especifica que nadie puede estar expuesto a un choque eléctrico al tocar la carcasa de un equipo bajo condiciones de falla de fase a tierra. A medida que los equipos electrónicos se hacían más complejos y sensibles a tensiones más pequeñas, se encontró que tensiones transitorias generadas por las múltiples conexiones del conductor de tierra, podían ser nocivas y causar serios daños en los elementos electrónicos [10].

2.1.2 Múltiples conexiones neutro–tierra.

A pesar de que en la referencia [18], exige que el neutro de una instalación eléctrica debe conectarse a tierra únicamente en el tablero de distribución principal de la construcción o en el secundario de un sistema derivado, tal como un transformador de aislamiento, es muy común encontrar en instalaciones con malas prácticas de cableado, múltiples conexiones del conductor neutro a tierra, permitiendo que una parte de la corriente de la carga fluya a través del SPT al que está referenciado. Esta situación genera tensiones y corrientes parasitas nocivas para el desempeño de los equipos, causando errores o lentitud en la transferencia de datos, bloqueo de equipos y daños en los puertos de entrada/salida.

En la Figura 1, se muestran algunos errores típicos de cableado que generan tensiones y corrientes parasitas, a tierra. El Error 1, consiste de uniones neutro-tierra tales como un conductor, que de forma descuidada conecta el barraje del neutro con la carcasa de un tablero de distribución aguas abajo del tablero principal, permitiendo el desvío de la corriente normal de la carga a través del SPT. El Error 2, describe otra fuente de corrientes parasitas, a partir de una inversión entre el neutro y la tierra dentro de un tomacorriente. En el Error 3, expone el caso en el que errores de cableado o averías al

⁷ EGC (Equipment Grounding Conductor): Conductor de puesta a tierra de equipos.

interior de los equipos, crean una conexión neutro tierra que generará corrientes parasitas.

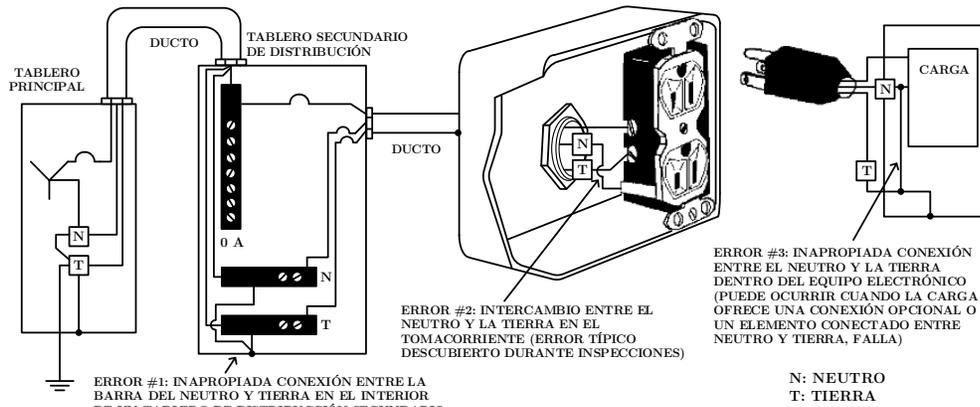


Figura 1. Errores típicos de cableado en circuitos ramales.

Fuente: [10]

2.1.3 Tierra aislada IG⁸

Teniendo en cuenta que la conexión de los equipos electrónicos al sistema de puesta a tierra de potencia de la instalación causaba a menudo mal funcionamiento y fallas en estos equipos, la solución que en algún momento se adoptó fue no usar este sistema para aterrizar los equipos electrónicos específicos y en contraparte utilizar un nuevo pozo de tierras (aislado) sin conexión al tablero de distribución, práctica desde varios puntos de vista inadecuada. La tierra aislada, como establece el NEC [17], se trata de un conductor de puesta a tierra de equipo aislado (jamás desnudo) que va desde el puente de unión de tierra aislada de la instalación hacia el equipo sin entrar en contacto con tubos o gabinetes de tableros o nada que este en contacto eléctrico con la construcción, solo en el puente de unión, dando como resultado el rompimiento de los lazos de tierra, que normalmente se encuentran en los sistemas de tierras normales. Dichos lazos de tierra, por ser caminos cerrados, generan corrientes parásitas que permiten perturbaciones electromagnéticas y contaminan las señales de equipos electrónicos sensibles. Existen entonces tableros, canalizaciones, y receptáculos destinados a recibir este conductor de tierra aislado, se identifican con un triángulo y típicamente se identifican en color naranja con las letras "Isolated Ground". Teniendo en cuenta que no se debe aterrizar el equipo a un nuevo pozo de tierras, dado que esto formaría de nuevo el lazo de tierra.

En este orden de ideas, algunos fabricantes de equipos sensibles, incurrieron en requerimientos de instalación erróneos. Por ejemplo, se especificó que los equipos electrónicos se aterrizarán a una malla de tierra aislada, conformada por uno o más

⁸ IG (Insulated Grounding), representa un sistema de tierra aislado.

electrodos (aislados del SPT de potencia) como lo indica la Figura 2. Esta malla debía ubicarse a pocos metros del edificio y con una resistencia de puesta a tierra que oscilaba entre los 10 hasta 30 Ω o más [11]. Esta configuración, aunque reduce el ruido proveniente del SPT de potencia, introduce graves problemas de operación y seguridad debido a la impedancia adicional introducida en el circuito. A continuación, se explicarán con mayor detalle estos problemas de operación y seguridad por causa de la impedancia introducida.

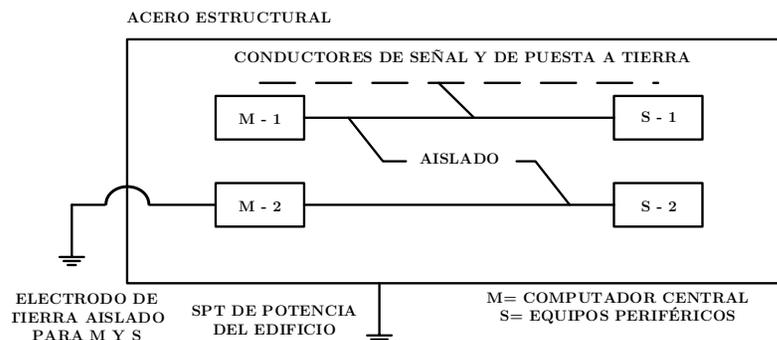


Figura 2. Configuración tierra aislada.

Fuente: [11]

- **Diferencias de potencial**

La separación de los electrodos de tierra es responsable de altas tensiones inducidas en los componentes electrónicos durante condiciones de tormenta y de descarga a tierra de rayos. Debido a la resistencia del SPT de la instalación, el potencial de la construcción se puede elevar a niveles substancialmente altos por encima del potencial de los equipos electrónicos, que se mantienen al nivel del sistema de tierra aislado (Ver Figura 3).

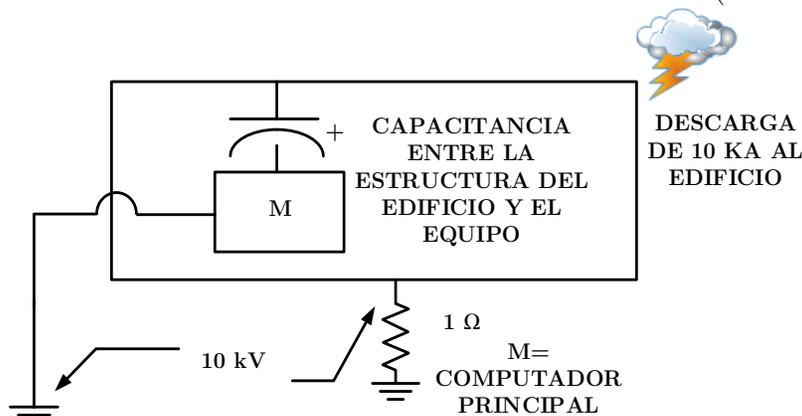


Figura 3. Diferencias de potencial entre la construcción y los equipos electrónicos.

Fuente: [11]

De acuerdo con la referencia [11], la diferencia de potencial debida a campos electrostáticos y descargas atmosféricas puede llegar a ser de hasta cientos de volts entre la construcción y un SPT aislado a 1 m de la construcción. Esta diferencia de potencial

y la capacitancia entre los equipos electrónicos, así como la estructura de la construcción, pueden inducir en los componentes de los equipos electrónicos potenciales que pueden estar muy por encima de sus tensiones admisibles.

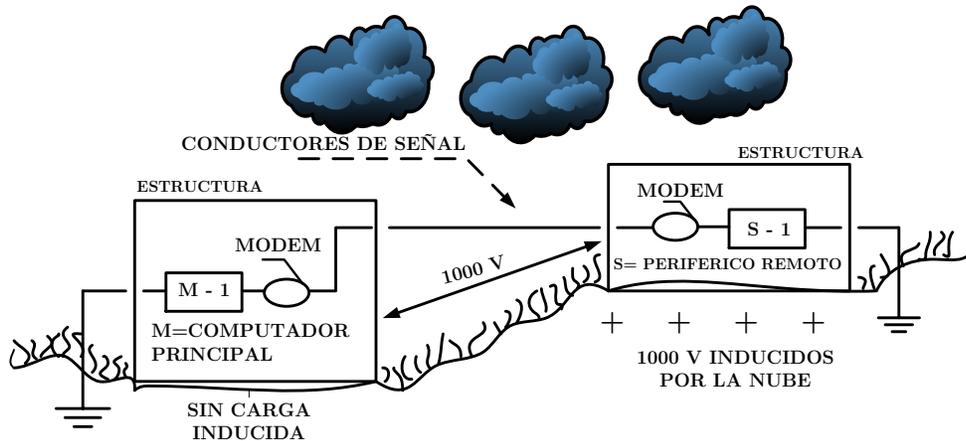


Figura 4. Diferencias de potencial en equipos remotos.

Fuente: [11]

De forma similar cuando existen unidades, componentes o equipos remotos ubicados en una edificación separada de la principal (Ver Figura 4) y que están conectados a una tierra aislada en su ubicación, la presencia de nubes cargadas puede inducir potenciales destructivos (sin la presencia de descargas) entre el equipo remoto y el equipo principal [11]

- **Operación de las protecciones.**

La instalación de un SPT aislado, genera graves problemas cuando ocurre una falla a tierra en el equipo remoto a través de su carcasa. Con el electrodo de puesta a tierra aislado, una falla en el equipo remoto requiere que la corriente de falla fluya hacia la fuente de señal o de alimentación a través de la resistencia en serie, tanto del SPT aislado como el instalado para la unidad principal. Suponiendo que tanto la resistencia de puesta a tierra de la unidad principal como la de la unidad remota es 20Ω ⁹ (Ver Figura 5), cuando ocurra una falla a tierra en el equipo remoto conectado a 120 V, la corriente de falla que circulará por el lazo será de 3 A ($120V/40 \Omega$). Esta magnitud no será insuficiente para operar un elemento de protección de 15 A y alguien resultará electrocutado en mayor o menor grado al tocar las partes metálicas del equipo. Claramente, cuando se utiliza un SPT aislado para los equipos electrónicos, se incurre en una violación de los requerimientos de la referencia [18] sección 250-23 y el NEC [17], pues se requiere que todos los equipos alimentados por una fuente eléctrica estén unidos o conectados a tierra en el punto de la puesta a tierra de la fuente [11]

⁹ Para una mayor ampliación del tema revisar la referencia [11] en la sección 5.5.3.5.

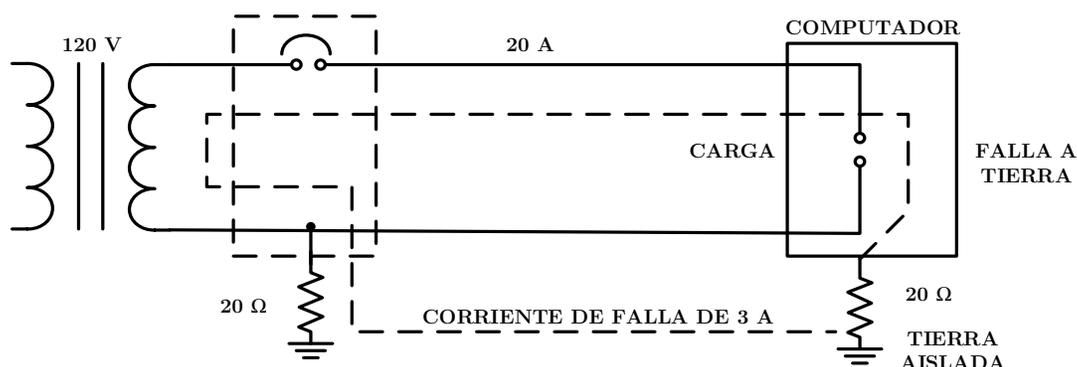


Figura 5. Problemas en la operación de protecciones con configuraciones aisladas del SPT.

Fuente: [11].

2.1.4 Problemas de referencia en los equipos electrónicos.

En la práctica, los requerimientos para conectar a tierra los equipos electrónicos de forma segura están más claros, que los requerimientos necesarios para que tengan una referencia efectiva y operen de forma adecuada. El hecho de no dedicar una especial atención a estos últimos requerimientos durante el diseño del SPT de los equipos electrónicos, puede generar graves problemas en la operación de los mismos a pesar de cumplir con los requisitos de seguridad. Tres escenarios en particular tienden a experimentar un mayor número de problemas relacionados con la referencia de los sistemas electrónicos, presentando daños y operaciones indeseables en el procesamiento de datos, más que en otras circunstancias [10].

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

Este escenario hace referencia a las perturbaciones presentes cuando diferentes componentes de un sistema (computador, impresora, red de datos y procesos industriales de control, entre otros), están interconectados por cables de datos, pero alimentados desde diferentes puntos del sistema de alimentación (ramales, tableros de distribución o en el peor caso, diferentes alimentadores de la construcción), dentro de la misma instalación eléctrica de la edificación. La Figura 6 ejemplifica esta situación, mostrando una impresora, referenciada a tierra con otro componente del sistema como el computador, a través de la línea de datos y al mismo tiempo tanto el computador como la impresora están alimentados por diferentes circuitos ramales o por diferentes puntos del sistema de alimentación. Este escenario es a menudo vulnerable a diferencias de tensión en los niveles de referencia a tierra entre componentes, pues el enlace de datos (conductores de señal entre los periféricos) puede tener uno o ambos extremos conectados al chasis de los equipos. Con ambos extremos puestos a tierra, las corrientes transitorias

o continuas pueden fluir a través del enlace. Con un solo extremo conectado, aparecerán tensiones estáticas o transitorias en el otro extremo. Estas condiciones causan problemas en la transferencia de datos, los cuales ocurren durante eventos transitorios tales como sobretensiones o sobrecorrientes en los conductores de tierra.

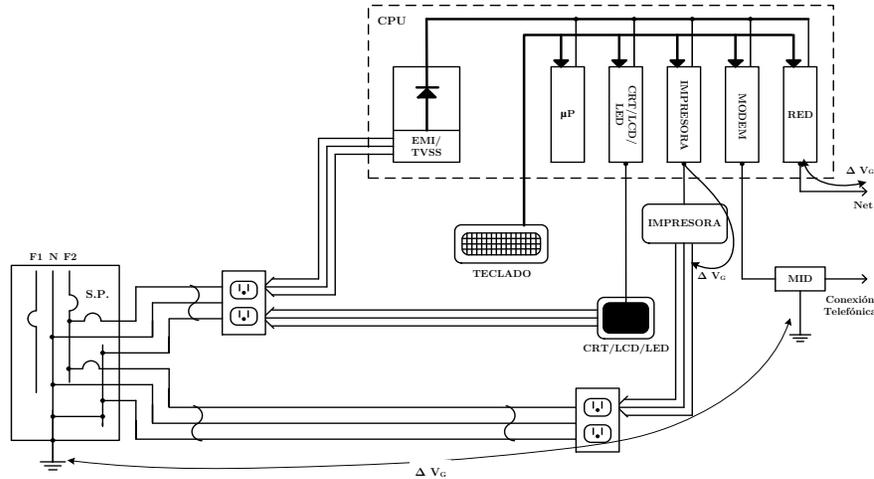


Figura 6. Computador y las interfaces de periféricos con el cableado y las rutas de circuito de referencia de puesta a tierra.

Fuente: [10].

- **Escenario 2. Equipo electrónico conectado a más de una red externa con diferentes referencias.**

Mantener todos los elementos en el mismo nivel de referencia, es difícil si las unidades están aterrizadas en diferentes sitios y entran a la edificación o al área donde están los equipos desde diferentes ubicaciones. Por ejemplo en la Figura 7 se encuentra un equipo de comunicaciones referenciado a más de un sistema externo (al tablero de distribución y a la acometida de la Red TI).

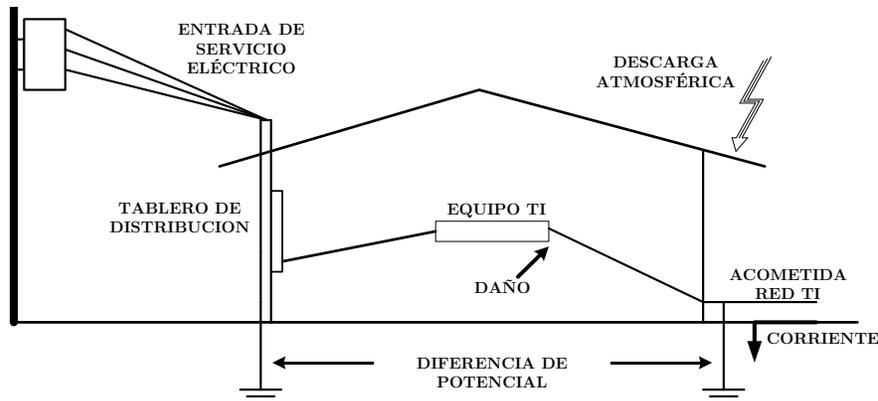


Figura 7. Daño en un equipo de TI, debido al impacto de una sobretensión transitoria.

Fuente: [10]

En el evento que ocurra una caída de un rayo, se generan tensiones o corrientes transitorias, creando una diferencia de potencial entre los sistemas, haciendo que los equipos soporten perturbaciones que generan lentitud en la transferencia de datos, reinicio, bloqueo y daños.

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

En este escenario, el problema ocurre cuando varios componentes de un sistema de procesamiento (computador, impresora, red de datos, servidores), están físicamente separados pero interconectados a través de cables de datos y alimentados por diferentes circuitos ramales del mismo sistema eléctrico.

Esta conexión genera en los conductores de alimentación o de datos, corrientes parasitas que ingresan a través de las uniones con el SPT de potencia y red de equipotencialización, o las conexiones entre la tierra de señal de los conductores de datos y los apantallamientos; por ejemplo, un cable RS-232¹⁰ de una impresora o los blindajes de una red de cables coaxiales aterrizados en ambos extremos.

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

2.1.5 Incremento de la impedancia de las conexiones a tierra bajo altas frecuencias [10]

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

Las rutas incluyen los conductores de puesta a tierra de los equipos electrónicos, y en general cualquier tipo de conexión de la red de equipotencialización. Estas conexiones

¹⁰ RS232 Standard 232, es una interfaz designada para intercambio serie de datos.

del sistema de puesta a tierra producen un incremento en la impedancia con la frecuencia (Ver Figura 8), limitando significativamente la efectividad del sistema de puesta a tierra en relación con el control del ruido de alta frecuencia. Esta condición hace que el electrodo (o malla) de puesta a tierra por sí solo no sea un medio eficaz para controlar los efectos no deseados, asociados con las componentes de alta frecuencia; por ejemplo, de un evento de descarga atmosférica o para el caso de una descarga con alto contenido armónico.

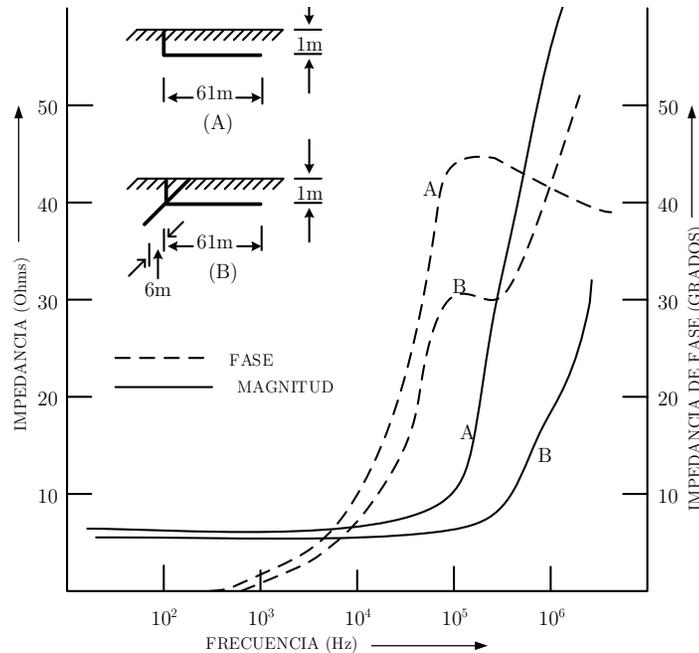


Figura 8. Impedancia vs frecuencia de un electrodo de puesta a tierra para dos configuraciones A y B.

Fuente: [10]

Las componentes de alta frecuencia presentes en el sistema requieren caminos de retorno que sean de baja impedancia para el rango de frecuencia correspondiente. De lo contrario, potenciales desarrollados a través de la alta impedancia presentada en una o más de las frecuencias contenidas pueden interferir o dañar los equipos electrónicos conectados. Por lo tanto, para que el sistema de puesta a tierra cumpla efectivamente con su función de referencia de señal, debe estar diseñado para proporcionar caminos de retorno de baja impedancia para una amplia gama de frecuencias (por ejemplo DC a decenas de mega Hertz).

2.1.6 Perturbaciones electromagnéticas generadas por autoresonancia en los conductores del SPT

La resonancia en los conductores ocurre debido a la capacitancia distribuida y la inductancia a lo largo de los conductores del sistema de puesta a tierra. Por esta razón, los conductores de sistemas de distribución AC oscilan cuando son excitados a

frecuencias específicas. La frecuencia de resonancia es una función de la inductancia y capacitancia del conductor, y en la mayoría de los casos es mucho mayor que la frecuencia de operación o sus armónicos (60 Hz). Sin embargo, la autoresonancia toma relevancia en los conductores de equipotencialización y puesta a tierra en el rango de los MHz, cerca de las frecuencias de operación de los equipos relacionados con tecnologías de la información.

La autoresonancia, ocurre cuando la longitud de los conductores es igual o múltiplo par o impar de $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda λ de la señal de tensión aplicada. Teniendo en cuenta que los conductores en esencia pueden actuar de forma inadvertida como fuentes (o receptores) de ruido debido a campos cercanos, esta señal puede aplicarse al conductor de forma conducida o radiada. Cuando un conductor está bajo condiciones de autoresonancia, el resultado es un circuito abierto virtual, con una impedancia casi infinita y una diferencia de potencial alta entre los extremos del conductor. Esta situación se ilustra a continuación en la Figura 9.

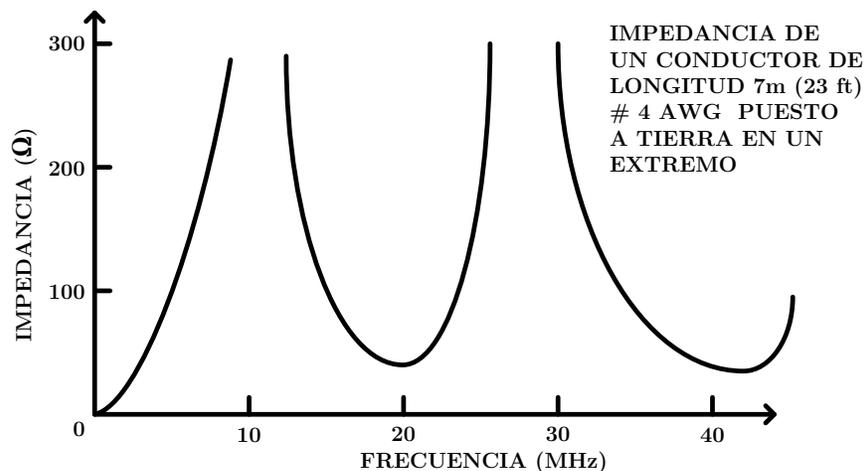


Figura 9. Resonancia característica de los conductores.

Fuente: [10]

2.1.7 Inductancia y capacitancia parasita de los caminos compuestos por los conductores del SPT.

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

La relación $-e = L(di/dt)$ es muy útil para representar la tensión desarrollada en una inductancia, cuando una corriente es forzada a fluir en ella. Cuando la corriente

que circula por la misma es interrumpida de forma abrupta, se pueden presentar impulsos de corriente, que circulan por el camino inductivo de los conductores del SPT, como tensiones que pueden ser desarrolladas a través de la capacitancia distribuida o de lazo. En la práctica el problema es representado mediante la siguiente expresión:

$$E_{\max} = I_{\text{impulso}} \sqrt{\frac{L_{\text{circuito}}}{C_{\text{parasita-circuito}}}}$$

Ecuación 2-1

Dónde:

E_{\max} : Es la tensión máxima desarrollada a través del camino a tierra.

I_{impulso} : Es la corriente máxima que fluye por el camino a tierra.

L_{circuito} : Es la inductancia del camino a tierra en Henry.

$C_{\text{parasita-circuito}}$: Es la capacitancia parasita del camino a tierra en Faradios.

La expresión matemática anterior, tiene en cuenta el hecho de que la capacitancia parasita asociada con los caminos y conexiones típicas del sistema de puesta a tierra no debe ser ignorada. En pocas palabras, el problema no se trata de una inductancia teórica en el espacio libre acoplada a nada, dado que la capacitancia parásita puede ser bastante grande (dependiendo de sí entre las conexiones a tierra y la equipotencialización se encuentran gabinetes metálicos o estantería estrechamente espaciada), uno frente al otro y con una área superficial significativa. Esto forma una capa de dieléctrico (aire) entre las caras metálicas y por tanto una capacitancia que es esencial en el análisis del circuito y no puede ser ignorada [10].

2.1.8 Perturbaciones de modo común en las líneas de alimentación.

Las perturbaciones de modo común (Ver sección 0) envuelven el ruido presente en los conductores de fase y neutro con respecto al conductor de tierra, los cuales se conectan a determinado equipo electrónico. Este tipo de perturbación no debe confundirse con el ruido existente en el conductor de tierra de equipos interconectados; como por ejemplo los cables de tierra de dos ordenadores conectados por cables de datos.

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

o apagados. Adicionalmente, las fuentes conmutadas de alimentación (al interior de los equipos electrónicos) también pueden generar este tipo de perturbaciones.

2.2 Problemas de compatibilidad electromagnética asociados al sistema de puesta a tierra del sistema de protección contra rayos

Existen diversas perturbaciones eléctricas que causan Interferencia electromagnética en los sistemas eléctricos y electrónicos asociadas con el Impulso electromagnético del rayo, transmitiéndose a los equipos mediante diferentes canales de acople. Estas perturbaciones pueden generarse tanto al interior de la edificación, cuando el rayo impacta directamente la estructura, como en el exterior, cuando este impacta las líneas de entrada o el suelo en una zona cercana al edificio.

Los canales de acoplamiento de estas perturbaciones incluyen:

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

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

2.2.1 Diferencias de potencial.

Las descargas atmosféricas e inclusive una nube cargada electrostáticamente pueden causar grandes diferencias de potencial, tanto al interior de una edificación como a los alrededores. Cuando las corrientes de gran magnitud se inyectan en el terreno, ya sea directamente o a través de los bajantes del SIPRA (o a través del conductor de puesta a tierra en el caso de una falla del sistema), elevan el potencial del sistema de puesta a tierra (y de los elementos metálicos conectados a él) o de la zona circundante al punto

de inyección. Este fenómeno es conocido como elevación del potencial de tierra GPR (Ground Potential Rise) [19].

Las diferencias de potencial producidas por las descargas atmosféricas, generan corrientes que fluyen hacia todos y cada uno de los cuerpos conductores a tierra, incluyendo concreto reforzado, tubos, alambres de cobre e incluso a los seres vivos. De esta forma se compromete la seguridad y la integridad de las personas y de los equipos. Los efectos pueden ir desde problemas de referencia en los dispositivos, hasta la aparición de corrientes destructivas. En el caso de generarse una chispa entre un objeto y tierra, o entre un objeto y otro objeto de potencial diferente por acumulación de carga estática, estos pueden ser la causa de un incendio o explosión, si se lleva a cabo en presencia de materiales o mezclas de gases inflamables [11].

2.2.2 Sobretensiones o sobrecorrientes en el SIPRA (Surges).

Las sobretensiones debidas a descargas atmosféricas son el resultado de impactos directos en los conductores del sistema de protección contra rayos, así como también de la incidencia de los efectos indirectos. Por su parte los impactos directos hacen que circulen sobrecorrientes por la impedancia de los conductores, produciendo una elevación significativa del potencial de estos. Así mismo los efectos indirectos incluyen la inducción de sobretensiones en bucles formados por los diferentes conductores al interior de la instalación, así como en la estructura de la edificación [20]; además de las sobretensiones generadas por el aumento de los potenciales de tierra, debido a las corrientes del rayo inyectadas en los conductores del sistema de puesta a tierra [10].

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

2.2.3 Interferencia electromagnética debida a campos magnéticos generados por el impulso electromagnético del rayo

Teniendo en cuenta que el principio del funcionamiento de un sistema de protección contra rayos es atraer la descarga hacia los terminales de captación, su aplicación genera un peligro para los equipos electrónicos sensibles en los edificios de gran altura, pues una corriente de rayo extremadamente grande fluirá a tierra a través de los bajantes del sistema de protección contra rayos. De acuerdo con la ley de Faraday, ésta corriente

generará un intenso campo magnético alrededor de los conductores bajantes en el interior de la construcción. Este campo magnético transitorio, traerá serias interferencias electromagnéticas en los equipos eléctricos al interior de la edificación, que se reflejan como mal funcionamiento o incluso la destrucción de equipos electrónicos sensibles [21]. Dado que las aplicaciones electrónicas siguen en aumento, así como su abundante presencia en edificios de gran altura (tales como computadoras y equipos de redes de telecomunicaciones), el riesgo de un IER se convierte en un problema importante, y se deben tomar las medidas adecuadas para garantizar la seguridad y la operación adecuada de la instalación.

2.2.4 Altas impedancias en los conductores del SPT.

Actualmente, es comprensible que tanto el diseño como la evaluación del desempeño de los sistemas de puesta a tierra, se fundamente en la resistencia del mismo para la frecuencia nominal del sistema (60 Hz), considerando que las corrientes de falla que el SPT debe despejar poseen la misma frecuencia. Sin embargo, el comportamiento del SPT es muy diferente para sobrecorrientes de falla de alta frecuencia, pues se conoce que los impulsos de corriente de frente rápido (tales como las de una descarga atmosférica) hacen que la efectividad del sistema de puesta a tierra se degrade [22]. Por esta razón, es importante el estudio para minimizar tanto la resistencia como la reactancia del SPT en los sistemas de protección contra rayos [11].

2.3 Problemas de compatibilidad electromagnética relacionados con conductores y conexionado.

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

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

2.3.1 Perturbaciones causadas por malas prácticas de cableado y conexión a tierra.

Un gran porcentaje de los problemas en la calidad de la energía se asocian con las prácticas inapropiadas de cableado y de conexión a tierra [23]. Estas prácticas son el resultado, tanto desconocimiento o malas interpretaciones de los requerimientos del fabricante por parte del usuario final, como exigencias inapropiadas de los mismos fabricantes [10]. Como se verá a continuación, la conexión neutro tierra (Ver ítem 2.3.1.1), la presencia de tierras aisladas (Ver literal 2.3.1.2), y la falta de conexionado del secundario del transformador (Ver numeral 2.3.1.3) generan tensiones y corrientes parasitas que afectan la operación de los sistemas eléctricos de potencia de las instalaciones eléctricas de uso final.

2.3.1.1 Conexiones neutro tierra.

En un sistema correctamente cableado y configurado, toda la corriente de alimentación volverá a la fuente a través del conductor neutro (sistemas monofásicos), o una combinación de los conductores de fase y neutro. Como se trató en la sección 2.1.2. La inapropiada conexión de conductores neutros y conductores de puesta a tierra de equipos al interior de paneles de alimentación o en piezas individuales de equipos, permite que parte de las corrientes de retorno circulen por los conductores del sistema de puesta a tierra, elevando el potencial de los elementos conectados por encima del potencial de tierra, a pesar de que esta práctica constituye una violación de la referencia [18] y del NEC [17], se encuentra de manera frecuente en instalaciones eléctricas de uso final, tanto nuevas como antiguas, generando alto riesgo eléctrico para el personal y afectando de manera significativa la operación de las protecciones y equipos conectados a la red.

2.3.1.2 Tierras aisladas.

Al igual que en los equipos electrónicos (Ver Sección 2.1.3), el afán de aislar los sistemas eléctricos de potencia, de posibles ruidos presentes en el SPT de la red; o cuando los fabricantes requieren un electrodo adicional de puesta a tierra para una máquina, hace que estos incidan en prácticas inadecuadas como son las tierras aisladas. El usuario final es el responsable de asegurar que su instalación cumpla con los requisitos normativos. Aunque esta práctica es permitida por la referencia [18], el electrodo adicional está destinado a ser un complemento de conexión a tierra, y debe estar equipotencializado con el resto del sistema de puesta a tierra de la instalación. A menudo este electrodo adicional es considerado incorrectamente como “aislado” del ruido del sistema de puesta a tierra del edificio, o “dedicado” al equipo en cuestión, lo que conlleva a la instalación de una puesta a tierra aislada tal como se muestra en la Figura 10.

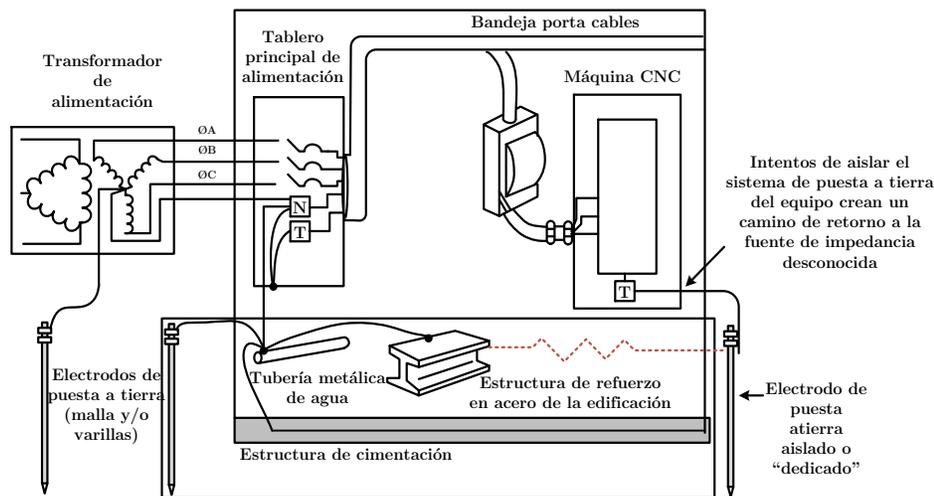


Figura 10. Instalación incorrecta de una tierra "aislada o dedicada" para una máquina CNC.

Fuente: [24].

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

2.3.1.3 Secundario del transformador sin conexión a tierra.

Esta configuración puede presentarse de manera intencional o puede ser el resultado de una deficiente conexión del neutro al sistema de puesta a tierra. Si el devanado secundario de un sistema derivado independiente no está conectado a tierra, el neutro del sistema de distribución "flotará" o perderá su referencia a tierra [25]. Esta situación puede originar huecos y sobretensiones con respecto a tierra en el secundario del transformador, incluso cuando no existen fluctuaciones de tensión en la entrada, adicionalmente las tensiones de fase medidas respecto a tierra pueden alcanzar valores altos durante la operación normal, provocando mal funcionamiento y/o daños en los equipos de potencia [23].

2.3.2 Altas impedancias de puesta a tierra.

Obtener una baja impedancia de puesta a tierra es esencial para garantizar la seguridad de una instalación eléctrica de uso final, pues su valor está directamente relacionado con la máxima elevación del potencial del sistema de puesta a tierra y contribuye a limitar las tensiones transferidas [11].

También se requiere una baja resistencia de puesta a tierra para permitir una efectiva operación de los dispositivos de protección en condiciones de falla a tierra. Teniendo en cuenta que para la frecuencia fundamental del sistema (60 Hz), la componente reactiva de la impedancia de puesta a tierra es muy pequeña comparada con la componente resistiva, se establecen valores máximos refiriéndose solamente a la componente resistiva.

La Tabla 15.4 Valores de referencia para resistencia de puesta a tierra presentados en la referencia [1], indica los valores máximos de resistencia de puesta a tierra en donde recientemente se agregó especificaciones para resistencia de puesta a tierra para equipo electrónico o sensible. Como se trató en secciones anteriores (Ver secciones 2.1.5 y 2.2.4), cabe resaltar que bajo altas frecuencias la reactancia del sistema de puesta a tierra toma relevancia y debe ser considerada para su dimensionamiento

2.3.3 Contenido de armónicos en la red.

El incremento en el uso de aplicaciones con bajos niveles de potencia como circuitos de transmisión de datos digitales, en combinación con el rápido crecimiento del nivel de ruido en los conductores de circuitos de potencia, producto de la modulación del tiempo en convertidores de corriente (usualmente rectificadores controlados de silicio SCR's), diseñados para controlar aplicaciones de calefacción, graduadores de iluminación, control de velocidad de motores etc. [11], han ocasionado una fuerte presencia de componentes armónicas en la red de distribución, esto ha ocasionado diversos problemas tanto en los demás usuarios de la red (Ver sección 2.3.3.1 Problemas causados por armónicos de corriente.), como dentro de la instalación (Ver numeral 2.3.3.2 Problemas causados por armónicos de tensión.). La Figura 11 muestra el espectro armónico de una fuente de alimentación de funcionamiento conmutado SMPS (Switch Mode Power Supply), empleada en aplicaciones de control y equipos electrónicos, Igualmente la Figura 12, indica el espectro armónico de un variador de velocidad trifásico

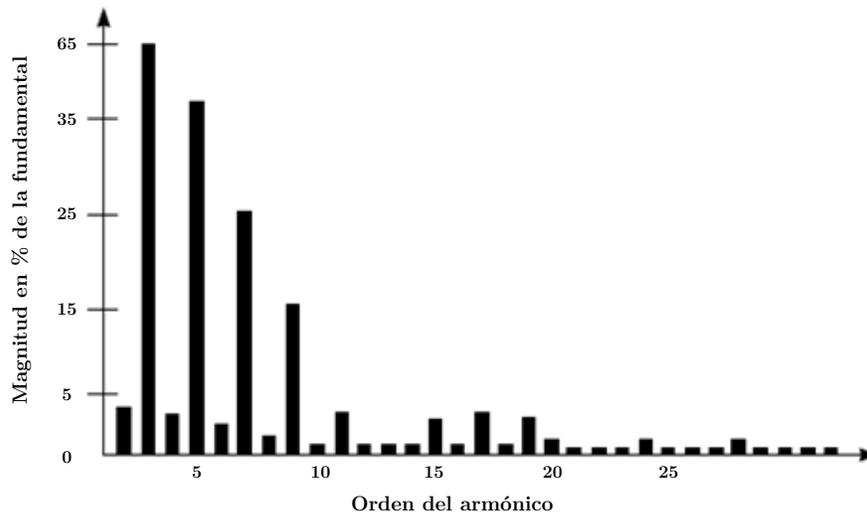


Figura 11. Espectro armónico de fuentes de alimentación conmutada

Fuente: [26].

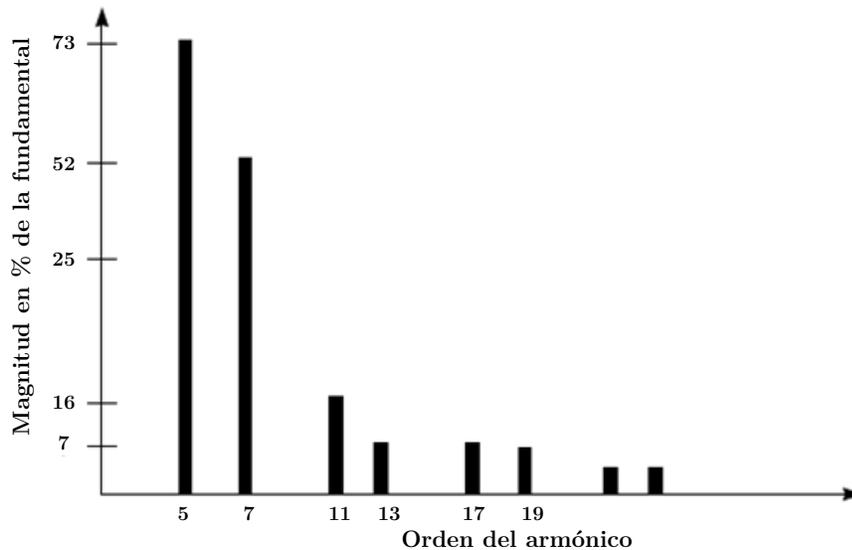


Figura 12 Espectro armónico de un variador de velocidad trifásico

Fuente: [26]

2.3.3.1 Problemas causados por armónicos de corriente.

- **Sobrecalentamiento de los conductores neutros:** En un sistema trifásico, la forma de onda de tensión de cada fase, y entre fase y neutro, está desfasada 120° de manera que cuando cada una de las fases tiene la misma carga, la corriente combinada en el neutro es cero. Cuando las cargas no están equilibradas, por el neutro solo circulará la corriente neta correspondiente al desequilibrio de las cargas. Sin embargo, aunque las corrientes fundamentales se anulan entre sí, no ocurre lo mismo con las corrientes armónicas, pues aquellas que son un múltiplo impar del triple de la fundamental (armónicos “triple n”), se suman en el conductor neutro. Los casos encontrados en edificios comerciales, generalmente muestran corrientes en el neutro de magnitudes comprendidas entre el 150 % y el 210 % de las corrientes de fase, lo que ocasiona un aumento en la temperatura y en las pérdidas a lo largo del conductor [27].
- **Efectos sobre los transformadores (Ver también el literal 2.5):** Los transformadores se ven afectados por los armónicos de dos formas. En primer lugar, por las pérdidas por corrientes parasitas, que normalmente representan un 10% de las pérdidas a plena carga, aumentan con el cuadrado del número de orden del armónico [27]. El segundo efecto está relacionado con los armónicos triple-n, pues estos solo circulan en el devanado de alta tensión con conexión en delta actuando como un filtro y no se propagan hacia las líneas de alimentación, sin embargo con una conexión diferente a la Delta en el devanado de alta, al igual que los armónicos

diferentes a los triple-n podrán circular libremente hacia las líneas de alta tensión y contaminar la red.

- **Disparos intempestivos de los interruptores automáticos (Ver también numeral 2.4 Problemas de compatibilidad electromagnética relacionados con protecciones eléctricas):** Los interruptores automáticos de corriente diferencial residual (ID), funcionan sumando la corriente presente en los conductores de fase y neutro, y si el resultado no está dentro del límite especificado, desconectan la energía en la carga [27]. La desconexión anómala se produce normalmente porque la corriente que circula por el circuito es superior a la que se preveía según los cálculos (o las simples mediciones), debido a la presencia de corrientes armónicas.
- **Sobrecarga de los condensadores utilizados en la corrección del factor de potencia:** Los bancos de condensadores empleados para la corrección del factor de potencia, se utilizan para compensar las corrientes con fase retrasada producidas por una carga inductiva, tal como un motor de inducción. Debido a que la impedancia del condensador disminuye al aumentar la frecuencia, es probable que el condensador permita el paso de armónicos de orden superior y a menos que haya sido diseñado específicamente para ello, puedan producir graves daños. Un problema potencialmente más grave es que el condensador y la inductancia parásita del sistema de alimentación, puedan entrar en resonancia a una de las frecuencias armónicas (o a una frecuencia próxima), ocasionando tensiones y corrientes muy grandes, que a menudo provocan averías catastróficas en la batería de condensadores [27].
- **Efecto piel:** La corriente que fluye en un cable produce pérdidas I^2R . Cuando la corriente de carga contiene armónicos, se introducen pérdidas adicionales (Ver sección 2.5). Para agravar el problema, la resistencia efectiva del cable aumenta con la frecuencia debido al fenómeno conocido como efecto de la piel. Este efecto es debido al desigual acoplamiento de flujo a través de la sección transversal del conductor, lo que provoca que la corriente alterna fluya sólo en la periferia exterior del conductor. Esto tiene el efecto de aumentar la resistencia del conductor para corriente alterna. Cuanto mayor sea la frecuencia de la corriente, mayor será la tendencia de la corriente a la circulación en la periferia exterior del conductor y mayor es la resistencia efectiva de dicha frecuencia [28]. Normalmente el efecto piel es ignorado puesto que no tiene mayores consecuencias a la frecuencia fundamental del sistema, pero cuando la frecuencia está sobre los 350 Hz, es decir valores correspondientes al séptimo armónico, puede alcanzar valores importantes produciendo pérdidas y calentamientos adicionales.

2.3.3.2 Problemas causados por armónicos de tensión.

En la práctica, tanto las redes eléctricas como los transformadores de alimentación no son ideales, luego presentan una impedancia determinada. Las corrientes armónicas producidas por cargas no lineales dan lugar a una caída de tensión distorsionada en estas impedancias. La onda de tensión distorsionada resultante, se aplica a todas las demás cargas conectadas al mismo circuito, haciendo que por ellas circulen corrientes armónicas, incluso aun tratándose de cargas lineales [27].

- **IEM en los motores de inducción:** La distorsión armónica de tensión provoca un aumento de las pérdidas por corrientes parásitas en los motores, al igual que en los transformadores. Pero adicionalmente, aparecen pérdidas debidas a la generación de campos magnéticos en el estator, cada uno de los cuales intenta hacer girar el motor a una velocidad diferente tanto en un sentido como en el otro, según la secuencia del armónico [27]. Las corrientes de alta frecuencia inducidas en el rotor incrementan estas pérdidas todavía más.
- **Ruido de paso por cero:** (Ver también el numeral 2.4). Muchos controladores electrónicos detectan el punto en el cual la tensión de alimentación pasa por cero Volts, para determinar cuándo deben activarse las cargas. Si en la fuente de alimentación están presentes armónicos o perturbaciones transitorias, el ritmo de variación de la tensión por el punto de paso por cero se hace más rápido y difícil de detectar, provocando un funcionamiento errático.
- **Carga estática:** La carga estática se produce cuando ciertos materiales se frotran uno contra el otro. El proceso de rozamiento causa que se retiren los electrones de la superficie de un material y se reubiquen en la superficie del otro material.
Este fenómeno puede ocurrir bajo las siguientes circunstancias:
 - a) Materiales pulverizados que pasan a través de conductos o transportadores neumáticos.
 - b) Correas de transmisión, cuando están fabricadas en material no conductor.
 - c) Gas, vapor o aire que fluye a través de una abertura.
 - d) Movimientos que impliquen cambios en la posición relativa de superficies en contacto, por lo general de diferentes materiales, líquidos o sólidos donde al menos uno ellos es un mal conductor de la electricidad.
 - e) Movimiento del cuerpo humano en un área de baja humedad, puede acumular cargas estáticas de varios miles de volts, por el contacto de los zapatos con revestimientos de suelo o por trabajar cerca de maquinaria que genere electricidad estática.

La acumulación de cargas estáticas introduce un riesgo potencial para los operarios, las máquinas y materiales procesados, especialmente donde existen líquidos, gases o

materiales inflamables o susceptibles a pequeñas corrientes [11]. El control de la carga estática también puede ser necesario para una adecuada operación en plantas de fabricación y mantener la calidad del producto. La acumulación de carga estática en las operaciones textiles puede causar que las fibras se vean afectadas, disminuyendo la calidad del material. En la industria de la impresión, el control de la carga estática es importante para evitar daños a las imágenes impresas, por la atracción de partículas de polvo y para prevenir la atracción de la tinta a la parte inferior de las hojas.

Hay muchos otros procesos de fabricación u operaciones donde las acumulaciones estáticas representan o un peligro de incendio o explosión o causan defectos en la calidad de los productos y la operación de la maquinaria [11]. La Tabla 1 indica tensiones estáticas observadas en plantas de fabricación industrial.

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

Tabla 1. Rango de tensiones estáticas producidas por diferentes procesos.

Fuente: [11].

2.4 Problemas de compatibilidad electromagnética relacionados con protecciones eléctricas

Durante los últimos años el tema de investigación en torno a relés, contactores y equipos de protección operados bajo condiciones de interferencia electromagnética específicamente de distorsión armónica, se ha orientado a la estructura electromecánica de los mismos y en menor medida con las soluciones de tipo electrónico. Como se sabe, el comportamiento de estos puede variar significativamente bajo estas condiciones armónicas. La respuesta no sólo depende del tipo de dispositivo y del fabricante, sino que también puede variar con la naturaleza de los componentes del equipo y los cambios en las características en el espectro [29].

Así mismo la sensibilidad a los armónicos de corriente o tensión de estos equipos disminuye con el aumento del orden armónico; la mayoría de los contactores y relés son insensibles a la distorsión de tensión menor al 20% [30], por encima de este valor su funcionamiento puede cambiar, bajo condiciones regulares e irregulares de operación. Los relés de sobrecorriente son accionados por ejemplo, por corrientes de corto-circuito y/o corrientes con un valor considerablemente superior a la corriente nominal. En tales casos, los armónicos no tienen ningún efecto sobre su funcionamiento, así como su

contribución a la corriente de cortocircuito es mínima. Por otro lado, debido a la saturación de los transformadores de corriente utilizados en instrumentación, se puede producir una fuerte distorsión de la corriente en el secundario, en particular cuando la componente de corriente continua en el primario es grande. En tal caso, es difícil una correcta reconstrucción de la onda de corriente primaria, que es esencial para el funcionamiento de los relés.

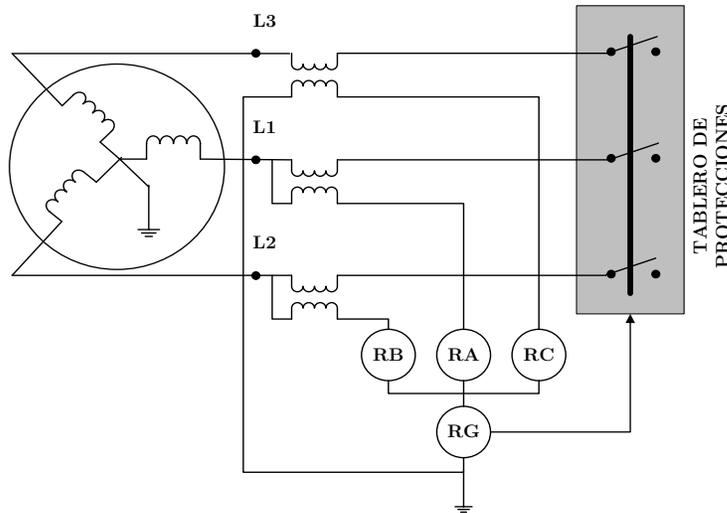


Figura 13. Protección contra-sobrecorriente del generador

Fuente: [31]

En ciertos casos, bajo condiciones normales de funcionamiento de un sistema de potencia, la distorsión armónica puede provocar un funcionamiento irregular de los dispositivos de protección. Esto puede ocurrir en los relés de protección de falla a tierra que son instalados junto con los sistemas de protección contra sobrecorriente.

Por ejemplo, el generador en la Figura 13 está provisto de relés de sobrecorriente en las fases RA, RB, RC, para la detección de cortocircuitos en el sistema. Sus valores son altos con el fin de evitar la acción de disparo del interruptor principal durante las operaciones normales de conmutación, por ejemplo arranque de motores grandes. El cuarto relé RG, que responde a la falla a tierra, se instala normalmente en el conductor neutro y responde a las corrientes de secuencia cero asociadas con el desequilibrio de impedancia de carga. Puesto que esta corriente es generalmente pequeña, el ajuste del relé de falla a tierra puede ser mucho más bajo que los ajustes del relé de fase. Un bajo nivel en este relé permite la detección de fallas a tierra con corrientes muy pequeñas para ser detectadas por los relés de fase. En el caso de la corriente de carga que contiene armónicos triple n, principalmente el tercero, de magnitud significativa, puede causar un accionamiento falso del relé de falla a tierra y como consecuencia, el disparo del interruptor principal. Otro tipo de relé con gran afectación es el relé de baja frecuencia, su propósito es desconectar cargas en el caso de un déficit de energía que se manifiesta

como una disminución en la frecuencia del sistema por debajo de un valor de ajuste. En algunas tecnologías el seguimiento de frecuencia consiste en identificar los cruces por cero de tensión. Más de dos cruces por cero durante un período, con una posible baja de frecuencia del sistema, puede causar una lectura errónea de frecuencia (alta frecuencia) y como consecuencia, la carga no se desconectará.

Por otra parte en las redes de alta tensión, el interruptor principal a veces toma lecturas de sensores tensión / corriente cuyo funcionamiento se basa en la medición del valor de pico. La distorsión armónica puede aumentar el valor máximo y hacer que el interruptor se dispare, incluso cuando el valor RMS se mantiene dentro del rango seguro.

Así mismo el efecto de la distorsión es importante en la medición en los relés de impedancia, los armónicos pueden dar resultado a un error de medición significativa con respecto al valor de la impedancia a la frecuencia fundamental. De igual forma en la referencia [32], se presentan algunas soluciones de protección de sobrecorriente dependientes del tiempo, donde el tiempo de funcionamiento (retardo de tiempo o time delay) es una función de las amplitudes y los armónicos que distorsionan la onda de corriente. Teniendo en cuenta que el principio de funcionamiento de muchas soluciones es la proporcionalidad inversa de su tiempo de funcionamiento y el valor medio de corriente, la operación de estos dispositivos puede variar considerablemente, en comparación de las soluciones actuales de relés electrónicos, las cuales han demostrado ser menos sensibles a los armónicos.

2.5 Problemas de compatibilidad electromagnética relacionados con transformadores.

En transformadores, la principal consecuencia de las corrientes armónicas es un aumento de las pérdidas en los devanados debido a la deformación de los campos de dispersión. Este aumento, hace que se genere más calor en el transformador de modo que la temperatura de funcionamiento aumenta, lo que provoca el deterioro del aislamiento y una potencial reducción del ciclo de vida útil del equipo [33].

En este sentido, una de las alternativas para controlar el aumento excesivo de la temperatura y sus consecuencias, consiste en reducir la capacidad del transformador, procedimiento conocido como desclasificación.

En los numerales 5.1 y 5.2, se documenta esta metodología partir del espectro armónico especificada por la referencia [12], la cual es aplicable para transformadores bidevanados inmersos en líquido y de tipo seco, incluyendo los de devanado impregnado y encapsulado en resina. Igualmente, aplicable para transformadores normales con un cierto estado de carga no lineal, pero no para transformadores que alimentan rectificadores. Al final del capítulo, en el numeral 5.3 se realiza una comparación entre

la desclasificación propuesta en la referencia [12] y el factor K especificado por Underwriter Laboratories, en las referencias [13] y [14].

La influencia de los armónicos en transformadores se puede analizar tomando como punto de partida una corriente continua (DC) "I" que pasa a través de los conductores del devanado. Por efecto Joule se producen pérdidas I^2R , donde R es la resistencia de corriente continua del devanado. Sin embargo, si una corriente alterna (AC) con valor eficaz igual a la "I" de corriente continua se hace pasar a través de los conductores del devanado, además de las pérdidas I^2R se producen unas pérdidas adicionales.

Esto se debe a que cuando los devanados del transformador transportan la corriente alterna, cada conductor está rodeado por un campo electromagnético alterno cuya fuerza es directamente proporcional a la magnitud de la corriente.

Una imagen del campo producido por la corriente de carga nominal que fluye a través de todos los conductores del devanado se muestra en la **¡Error! No se encuentra el rigen de la referencia..** En la cual se presenta una vista de la sección transversal del núcleo, devanados, abrazaderas y el tanque de un transformador y el campo electromagnético inducido por la corriente.

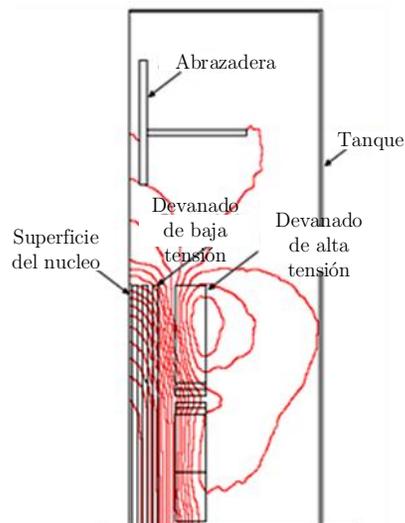


Figura 14. Campo electromagnético producido por la corriente de carga
Fuente [12]

Cada conductor metálico experimenta una tensión inducida interna, que provoca el flujo de corrientes de eddy¹¹ en ese conductor. Estas corrientes, a su vez producen pérdidas que se disipan en forma de calor, ocasionando un aumento de temperatura adicional en el conductor sobre su entorno. Este tipo de pérdidas adicionales (diferentes a las pérdidas I^2R), se conocen como "pérdidas por dispersión". Aunque todas la pérdidas

¹¹ Corresponden a las pérdidas provocadas por las corrientes de Foucault, también conocidas como corrientes de Eddy o "Corrientes torbellino" en inglés.

adicionales son ocasionadas por corrientes de eddy, las que ocurren en los devanados se suelen llamar **pérdidas por corrientes de eddy en los devanados** (P_{CE}) y las que ocurren en otras partes estructurales externas a los devanados tales como fijaciones depósitos, etc., se llaman "**otras pérdidas por dispersión**" (P_{OSL}).” [12]

Las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados son proporcionales al cuadrado de la intensidad del campo electromagnético (o el cuadrado de la corriente de carga que produce el campo), y al cuadrado de la frecuencia de corriente alterna.

$$P_{CE} \propto I_C^2$$

Ecuación 2-2

$$P_{CE} \propto f^2$$

Ecuación 2-3

Las otras pérdidas por dispersión, son generalmente proporcionales a la corriente elevada a una potencia ligeramente inferior a 1, porque la profundidad de penetración del campo electromagnético en las otras partes metálicas (por lo general de acero), varía con la intensidad de campo. Para corrientes armónicas de muy alta frecuencia, el campo no puede penetrar totalmente los conductores del devanado, pero es conservador suponer que las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados P_{CE} , son proporcionales al cuadrado de la frecuencia de la corriente armónica [12].

Cuando un transformador se somete a una corriente de carga que tiene un contenido armónico significativo, las pérdidas adicionales de corriente inducida en los conductores de los devanados y en las estructuras metálicas, elevará la temperatura de esas partes por encima de su temperatura normal de funcionamiento en condiciones nominales.

La experiencia ha demostrado que los conductores de los devanados son las partes más críticas cuando se quiere determinar una temperatura de funcionamiento aceptable, por lo tanto el objetivo debe ser evitar que las pérdidas en los conductores de los devanados bajo condiciones de cargas con contenido armónico, sean superiores a las pérdidas en condiciones nominales de operación.

Los devanados internos (normalmente de baja tensión) de un transformador tienen típicamente mayores pérdidas por corrientes de eddy que los devanados externos, debido a que las líneas del campo tienden a cerrarse por una trayectoria de la columna de baja reluctancia próxima a los yugos y elementos de sujeción, donde se tiene un alto contenido radial de densidad de flujo.

Además, las mayores pérdidas por corrientes de eddy ocurren generalmente en los conductores de los extremos del devanado interior. Esto es resultado del hecho que esta es la región de mayor densidad de campo electromagnético radial (Ver Figura 15) y el campo radial pasa a través del ancho del conductor rectangular del devanado.

Dado que el ancho de un conductor es típicamente tres a cinco veces su grosor y las pérdidas por corrientes de eddy son proporcionales al cuadrado de la dimensión, las pérdidas más altas se producen en los conductores de los extremos [12].

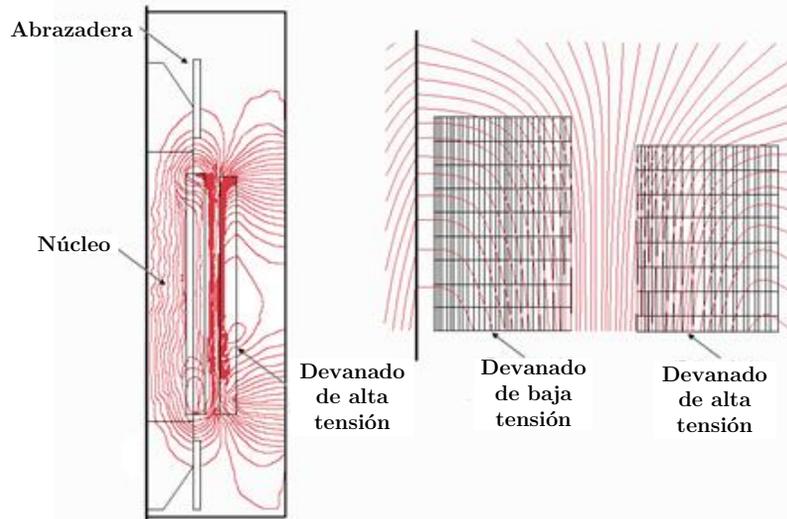


Figura 15. Campo electromagnético en los devanados, producido por la corriente de carga.
Fuente [12]

Las recomendaciones para la determinación de las condiciones óptimas de operación descritas en la referencia [12], se basan en el cálculo de una "capacidad equivalente del transformador" que establece un factor de reducción de la corriente de carga que contiene una composición armónica dada. La Ecuación 5-1 en el Capítulo 5 proporciona un cálculo del máximo valor eficaz de una carga no sinusoidal de corriente (en por unidad de corriente de carga nominal), que asegurará que las pérdidas en la región del devanado con la densidad de pérdidas más alta, no superen el valor de las pérdidas para las cuales el transformador fue diseñado (condiciones nominales de operación).

Aunque las corrientes armónicas también pueden producir distorsiones en la onda de tensión, y a su vez causar pérdidas adicionales en el núcleo del transformador, la experiencia operativa no ha indicado que el aumento excesivo de la temperatura en el núcleo sea el parámetro determinante para determinar la magnitud de las corrientes de cargas no sinusoidales seguras. En el Anexo A: Consideraciones generales para el cálculo de la capacidad equivalente del transformador, se ilustra de manera más detallada los efectos de los armónicos sobre cada una de las pérdidas presentes en los transformadores, así como las consideraciones generales para el cálculo de la capacidad equivalente del transformador, cuyo procedimiento se desarrolla en la sección 5.1 y la sección 5.2.

2.6 Problemas de compatibilidad electromagnética relacionados con motores.

Las máquinas eléctricas son responsables del 50% de la energía eléctrica consumida en todo el mundo y del 65% de la energía consumida en el sector productivo. Cerca del 90% de los motores instalados son motores de inducción [34]. Debido a su extenso uso se debe garantizar su correcto funcionamiento, que puede ser afectado por la presencia de perturbaciones en la red de suministro como los armónicos en la señal de tensión y de corriente, y el desequilibrio de tensiones.

Tanto los armónicos como el desequilibrio de tensiones, producen un incremento en las pérdidas y una disminución considerable de la eficiencia del motor de inducción [35]. Este incremento en las pérdidas puede conducir a sobrecalentamientos de los devanados y a una reducción en su vida útil.

Para neutralizar la elevación de pérdidas es común analizar cada una de las perturbaciones por separado. La referencia [15] establece en el apartado 12.45 los factores de desclasificación de la potencia de la placa del motor de inducción en función del nivel de desbalance de tensión; mientras que en el apartado 30.1.2 se pueden observar los factores de reducción para los diferentes contenidos armónicos.

Estos factores de desclasificación tienen en cuenta solo una de las perturbaciones en el suministro y deben ser aplicados a todos los motores de inducción de todas las potencias, independientemente de su forma constructiva.

De esta forma en el numeral 6.1, se documentan los procedimientos para aplicar factores de corrección, teniendo en cuenta los lineamientos propuestos por la referencia [15]. Estos lineamientos, buscan mitigar los efectos producidos por la distorsión armónica y los desbalances de tensión. Finalmente, en el numeral 6.2 se plantea el factor de reducción de potencia para el motor, cuyo factor pretende la reducción del sobrecalentamiento a partir de lo expuesto en la referencia [16].

El fenómeno puede ser descrito como un incremento del calentamiento debido a las pérdidas en el cobre y en el hierro a frecuencias armónicas, por cuenta del aumento de las tensiones y corrientes con alto contenido armónico en los motores de inducción. Estas componentes armónicas afectan la eficiencia de la máquina y pueden reducir el par desarrollado por el motor y en consecuencia el rendimiento del mismo.

Por otra parte, estas corrientes armónicas también producen un aumento en la emisión de ruido audible, además de producir una distribución de flujo resultante en el entrehierro, el cual puede causar o incrementar en los motores de inducción el fenómeno

llamado muesca, que se puede interpretar como la resistencia del motor a arrancar fácilmente, o el fenómeno de arrastre que produce un deslizamiento muy alto.

Al mismo tiempo los armónicos impares, tales como el quinto y el séptimo armónico, tienen el potencial para crear oscilaciones mecánicas en una combinación turbina-generador o en un sistema motor-carga, como resultado del par del motor oscilante, el cual es causado por la interacción entre las corrientes armónicas y el campo magnético a frecuencia fundamental, cuando excita a una frecuencia de resonancia mecánica.

Por ejemplo, el quinto y el séptimo armónico pueden combinarse para producir una estimulación de torsión sobre un rotor generador en la frecuencia armónica sexta. Si la frecuencia de una resonancia mecánica existe cerca de la frecuencia de excitación eléctrica, pueden desarrollarse grandes esfuerzos mecánicos [36].

En la Tabla 2. Convertidor armónico de seis pulsos

, se puede visualizar la característica del orden armónico derivado de un convertidor de seis pulsos y el efecto que produce cuando se aplica a los terminales de un motor de inducción.

Armónico de tensión	Frecuencia (Hz)	Red de secuencia	Armónico de I en el estator	Rotación del armónico	Armónico del rotor
1	60	Positiva	1	Hacia delante	-
5	300	Negativa	5	Hacia atrás	6
7	420	Positiva	7	Hacia delante	6
11	660	Negativa	11	Hacia atrás	12
13	780	Positiva	13	Hacia delante	12
17	1020	Negativa	17	Hacia atrás	18
19	1140	Positiva	19	Hacia delante	18
23	1380	Negativa	23	Hacia atrás	24
25	1500	Positiva	25	Hacia delante	24

Tabla 2. Convertidor armónico de seis pulsos

Fuente [36]

Cada armónico de tensión, quinto, séptimo, onceavo, etc., inducirá una corriente armónica correspondiente en el estator de la máquina y estarán a una secuencia negativa o positiva de la componente simétrica de corriente total.

Estas corrientes producirán un calentamiento adicional en el devanado del estator, aumentando la temperatura causada por la corriente fundamental.

Otro aspecto importante que se debe considerar, es el flujo de corriente armónica en el rotor, el cual producirá una fuerza magnetomotriz en el entrehierro, que inducirá flujos de corriente en el rotor de la máquina. Dado que cada armónico puede ser definido con una secuencia positiva o negativa, la rotación de este armónico será hacia delante o hacia atrás con respecto a la rotación del rotor.

De esta forma, el quinto armónico rotará en dirección hacia atrás (secuencia negativa). Así, un armónico de corriente inducirá en el rotor una frecuencia correspondiente a la diferencia rotacional de la red entre la frecuencia del entrehierro fundamental y el quinto, por ejemplo el quinto más uno o el sexto armónico.

Puesto que el séptimo armónico rotará en una dirección adelantada (secuencia positiva), una corriente armónica será inducida en el rotor con una correspondiente frecuencia a la diferencia rotacional de la red entre el séptimo y la frecuencia fundamental del entrehierro, por ejemplo el séptimo menos uno o sea el sexto armónico.

Desde este punto de vista del calentamiento del rotor el quinto y el séptimo armónico en el estator, se combinan para producir una corriente de sexto armónico en el rotor. El undécimo y el decimotercero armónico actúan de la misma manera para producir la decimosegunda corriente armónica en el rotor, y así sucesivamente, produciendo un calentamiento resultante del rotor y las pulsaciones o reducciones en el par.

Los motores de rotor devanado se ven mucho más afectados que los motores tipo jaula de ardilla, y a su vez los rotores tipo jaula de ardilla con barra profunda son más afectados que los tipo jaula de ardilla ordinarios.

El calentamiento armónico típicamente reduce el funcionamiento entre 90 y 95% del que puede ser experimentado por la onda sinusoidal fundamental pura aplicada [36]. De este modo en la referencia [15] se recomienda disminuir la potencia nominal del motor de acuerdo a una curva en función del contenido armónico (Ver numeral 6.1.1), de forma que se pueda evitar el calentamiento excesivo del motor.

Por otra parte, las corrientes desbalanceadas en los devanados del estator de la máquina, pueden incidir fuertemente en la operación de los motores de inducción. Un pequeño porcentaje de desbalance en las tensiones se traduce en altos porcentajes en el desbalance de las corrientes.

En consecuencia, el aumento de temperatura del motor que funciona a una determinada carga, con tensiones desbalanceadas será mayor que para el funcionamiento del motor en las mismas condiciones de carga con tensiones balanceadas.

Por lo tanto, para evitar fallas por calentamiento, las normas recomiendan operar el motor con una potencia menor a la potencia nominal, procedimiento conocido como desclasificación o derating, como se ilustrará en el numeral 6.1.3.

En el Anexo B: Consideraciones generales para el cálculo de la reducción de potencia de los motores de inducción, se realiza una descripción detallada de los efectos de los armónicos y los desbalances en las pérdidas, el aumento de la temperatura, ruido acústico y torques pulsantes, factor de potencia y eficiencia en los motores de inducción. Además, se documentan los niveles de armónicos permitidos y las consideraciones generales para el cálculo y ajuste de potencia de estos equipos

3. Buenas prácticas de ingeniería orientadas a la mitigación de los fenómenos de compatibilidad electromagnética: Impulso electromagnético del rayo (IER)

Este capítulo está orientado a definir las buenas prácticas identificadas para la mitigación de perturbaciones ocasionadas por el impulso electromagnético del rayo, en instalaciones eléctricas de uso final. Para ello, se proponen tres estrategias básicas que se describen como: Primera, la implementación de un Sistema de puesta tierra completo (Ver Sección 3.1) en el que se contempla la red de equipotencialización y los terminales, electrodos, anillos o enmallados de puesta a tierra. Segunda, el uso de blindajes magnéticos y el enrutamiento de líneas (Ver Sección 3.2). Tercera, el establecimiento de Zonas de protección y sistema coordinado de DPS's (Ver Sección 3.3).

3.1 Buenas prácticas para el sistema de puesta a tierra y equipotencialización en un SIPRA.

3.1.1 Información general

El sistema de puesta a tierra (SPT), hace parte del sistema de protección externa definido y descrito en la referencia [4], quien es el encargado de conducir y dispersar las corrientes del rayo en el suelo. Este sistema, comprende toda unión directa de los equipos eléctricos y electrónicos con la tierra o con una masa metálica, con el propósito de conseguir que el conjunto de instalaciones, construcciones y superficies próximas al suelo, no estén sometidas a diferencias de potenciales 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 [37]. Para ello algunos elementos de un SPT pueden disponerse para que cumplan una función específica, dentro de cada instalación de uso final, pero cada uno de estos forma parte de un único sistema. Es de esta forma como en la referencia [38], se propone

que todos los elementos de un SPT estén conectados entre sí formando lo que se conoce como una red de equipotencialización (RE) [38]. Esta red, junto con el TPT¹² (electrodos, anillos o enmallados), forman un sistema completo de puesta a tierra (SPT), con el cual se aseguran cuatro tareas fundamentales: Primero, la protección de las personas, limitando las tensiones de paso y de contacto a valores seguros; Segundo, la protección de las instalaciones contra daños por rayos; Tercero, la compatibilidad electromagnética (CEM), para la mitigación de perturbaciones electromagnéticas; Cuarto, el correcto funcionamiento del sistema de distribución asegurando la calidad en el suministro de energía eléctrica.

Por su parte, la red de equipotencialización tiene como función interconectar el sistema de terminales de puesta a tierra (sistema de protección externa [4]), con todas las partes conductoras de la estructura y del sistema interno (sistemas eléctricos y electrónicos dentro de una estructura, excluidos los conductores activos), con el fin de reducir las diferencias de potencial y el campo magnético causado por las corrientes del rayo. Este sistema pueden estar compuesto por:

1. 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.
2. Anillos: Electrodos a tierra que forman un lazo cerrado alrededor de la estructura. Interconectan los bajantes para distribuir las corrientes de rayo entre ellos.
3. Enmallados: Interconexión del sistema de terminales de puesta a tierra de varias estructuras.

¹² Terminal de puesta a tierra. “Earthing Terminal” en inglés

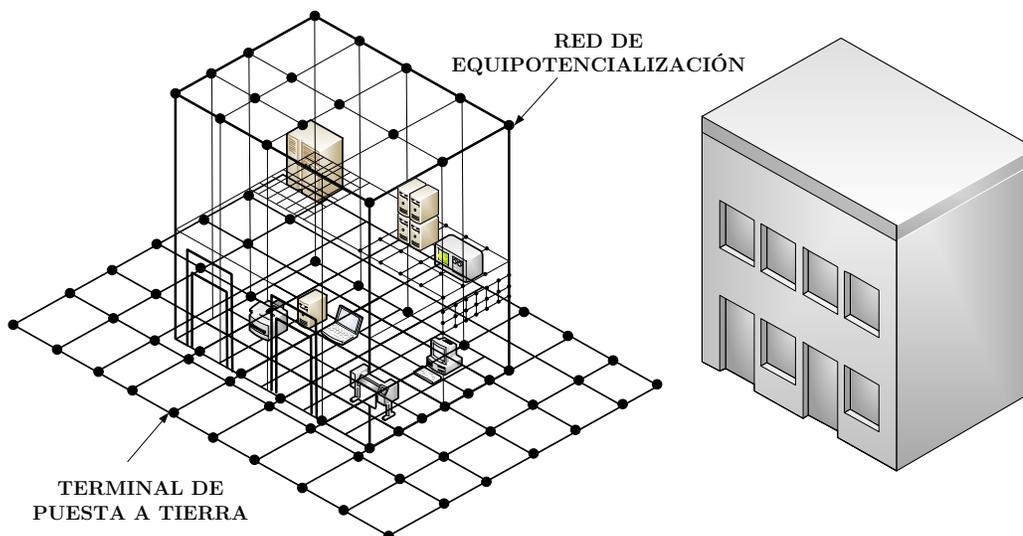


Figura 16. Red de equipotencialización y terminal de puesta a tierra.

Fuente: [38]

En la Figura 16, se presenta un ejemplo de un sistema completo de puesta a tierra, en el que se ha construido una red de equipotencialización (Ver numeral 3.1.2) a lo largo, alto y ancho de la estructura junto con la posterior equipotencialización al sistema de terminales de puesta a tierra. Este último puede estar constituido por electrodos naturales como: el acero de refuerzo de las cimentaciones de la estructura, las tuberías metálicas de los servicios y electrodos prefabricados como placas de concreto con acero reforzado o figurado.

Las configuraciones del sistema de puesta a tierra pueden ser de dos tipos: De tipo A en la que solo se tienen electrodos radiales o electrodos verticales profundos (Ver numeral 3.1.4.1), o de tipo B (Ver numeral 3.1.4.2), la cual presenta muy baja impedancia y actúa como excelente punto de referencia de equipotencialización. Una mínima impedancia del sistema de puesta a tierra y la equipotencialización de las partes metálicas no energizadas permiten una optimización del diseño de un sistema de protección contrarayos, puesto que soportara una mayor disipación de las corrientes presentes ante una descarga atmosférica y una disminución de las diferencias de potenciales peligrosas.

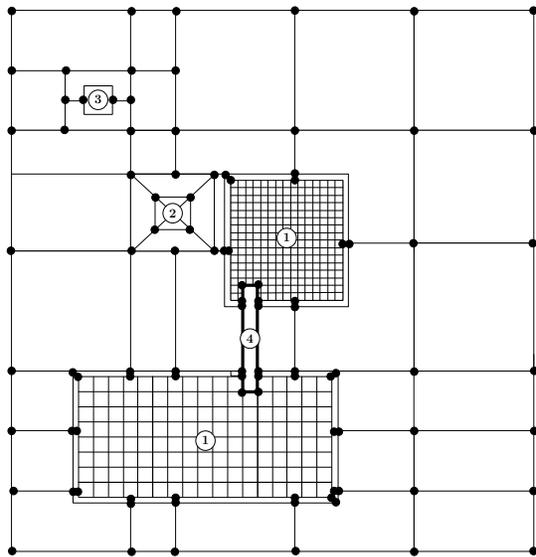
Lograr un efectivo SPT en una edificación construida puede ser bastante difícil, sino imposible, pues no es sencillo garantizar la conexión a tierra de los bajantes y el uso apropiado de la cimentación. Por ello, se recomienda que desde las primeras etapas del diseño de la edificación, se considere la resistividad del suelo y la naturaleza del terreno donde se va a construir. Esta información es importante para el diseño eléctrico y puede condicionar el diseño de la construcción. Por ésta razón, es primordial realizar reuniones previas al inicio de la construcción entre: diseñadores de las instalaciones eléctricas,

arquitectos y constructores, con el propósito de lograr un buen resultado con alta seguridad al mínimo costo.

3.1.2 Implementación de la red de equipotencialización (RE).

La Red de Equipotencialización RE es el conjunto de conductores que conectan las partes metálicas no energizadas del sistema eléctrico y la estructura de una edificación, con el sistema de terminales de puesta a tierra. Esto permite reducir las diferencias de potenciales peligrosos y el campo magnético de fuentes externas (entre todos los equipos en el interior de las ZPR), ante la circulación de una corriente de falla y su respectiva disipación a tierra producto de una baja impedancia. (Ver Anexo A en la referencia [38]). Esta baja impedancia se puede lograr equipotencializando las partes conductoras de la estructura, con las partes conductoras del sistema interno, como por ejemplo los elementos metálicos y servicios domiciliarios entrantes a la instalación y que se conducen usando un material conductor (agua, energía, gas y telecomunicaciones); esta equipotencialización debe realizarse directamente en la frontera de cada ZPR o mediante el adecuado uso de dispositivos de protección contra surges o también definidos como transitorios creados por un impulso electromagnético que aparece como una sobretensión y/o sobrecorriente (Ver numeral 3.3).

Un caso típico de integración de varios sistemas de terminales de puesta a tierra, son las diferentes estructuras pertenecientes a la misma instalación, tales como, torres de comunicaciones y equipos en las partes externas de las edificaciones. Por ejemplo, una planta de generación diésel se muestra en la Figura 17, en donde se realiza la interconexión mediante la construcción de un enmallado. Este sistema provee una baja impedancia entre edificios y tiene una ventaja significativa en la mitigación de fenómenos CEM. Para este caso, los electrodos de tierra del anillo equipotencial (Ring Earth Electrode) presente alrededor de la estructura y dentro de la misma, están unidos a los electrodos de puesta a tierra de las cimentaciones (varillas de refuerzo en las cimentaciones). Estos componentes forman una red equipotencial enmallada dentro y alrededor de la estructura, teniendo un ancho de la malla generalmente de 5 m x 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 esta distancia de separación de estructuras adyacentes, las mallas pueden ser ensanchadas a 40 m x 40 m.



1. Construcción de una red mallada 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.

Figura 17. Terminal del sistema de puesta a tierra en forma de malla

Fuente: [38]

Estas configuraciones requieren múltiples interconexiones de componentes metálicos sobre la estructura tales como: las varillas de refuerzo de los cimientos, utilizadas como electrodos de puesta a tierra, el acero estructural presente en rieles del ascensor, grúas, cubiertas metálicas, fachadas y marcos metálicos de ventanas, puertas, y pisos; y tuberías de servicio y bandejas portacables, los cuales deberán ser conectados con las barras de equipotencialización (Ver numeral 3.1.5) y los blindajes magnéticos de la Zonas de Protección contra Rayos¹³ (Ver numeral 3.2).

Por otra parte, cuando se trata de grandes construcciones pueden ser usadas varias barras de equipotencialización (BE), siempre y cuando se interconecten adecuadamente. Es importante tener en cuenta que las conexiones muy largas pueden formar grandes lazos o bucles que pueden conducir corrientes y tensiones inducidas. Para minimizar estos efectos, se debe considerar la interconexión enmallada de estas conexiones, con la conexión y equipotencialización de la edificación al sistema de terminales de puesta a tierra. Para el caso de estructuras de acero reforzado embebido en concreto, como columnas y vigas, se pueden utilizar como Barras de Equipotencialización, en este caso, debe ser instalada en los muros una red adicional enmallada de uniones soldadas [39] o aseguradas, de forma que estas barras puedan ser conectadas a los conductores mediante soldadura exotérmica o sujeción (Ver anexo A, en la referencia [4]).

Cuando las partes conductoras externas, como las líneas de los sistemas de energía y comunicaciones tienen diferentes acometidas de llegada, es necesario instalar varias barras de equipotencialización, y estas a su vez deben ser conectadas tan cerca como sea

¹³ Zona de protección contra rayos. “Lightning Protection Zone” en inglés.

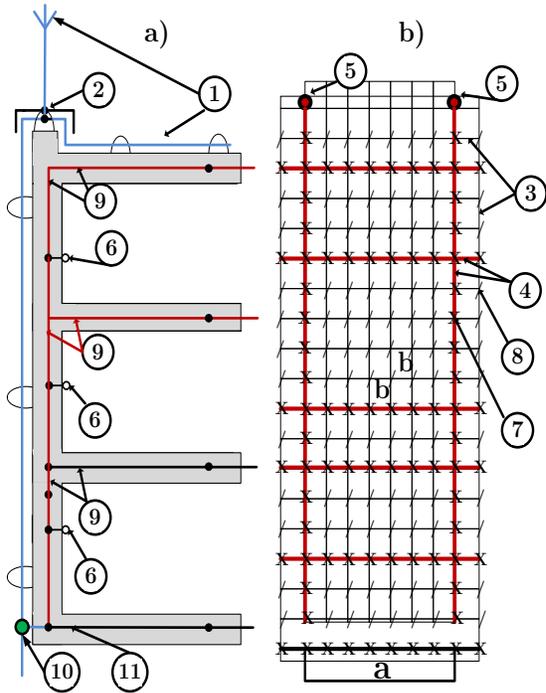
posible al terminal de puesta a tierra, esto ayuda a disminuir los bucles o lazos de inducción y así mismo las sobretensiones inducidas. De esta forma, cuando se utiliza un terminal de puesta a tierra con configuración tipo A (Ver numeral 3.1.4.1) como parte del SIPRA¹⁴, las barras de equipotencialización se deben conectar a los electrodos individuales, a través de un conductor interno (Ring conductor [38]).

Para el caso de una acometida de tipo aéreo, se recomienda una configuración Tipo B, en donde las Barras de Equipotencialización (BE) se deben conectar al anillo horizontal interno o externo (Ver Figura 25.). A este anillo externo se debe conectar los bajantes, el acero de refuerzo y a otros elementos metálicos de la construcción si es posible. Para el caso de los electrodos ubicados dentro de la estructura, las tensiones de paso juegan un papel importante en materia de seguridad, de forma que se deben controlar mediante la conexión del acero de refuerzo con los electrodos locales de puesta a tierra. (Ver sección 3.1.4). Cuando existen edificaciones con una altura mayor a 23 m, se recomienda repetir la Red de Equipotencialización cada 20 m desde la base, de forma que en la parte baja, los bajantes externos, los bajantes internos y las partes metálicas se unan, garantizando las distancias (Ver Tabla 4 en la referencia [4]) y la equipotencialización. En el caso de conductores energizados se deben unir vía DPS¹⁵. Para las uniones de los servicios externos en edificaciones con grandes instalaciones de comunicaciones y cómputo o estructuras donde la CEM¹⁶ es de gran importancia, se debe usar una barra de equipotencialización con múltiples conexiones al acero de refuerzo u otros elementos metálicos de la estructura. En la Figuras 18 a) y Figura 20, se muestra un corte transversal de una edificación esquematizando la Red de Equipotencialización. En la Figuras 18 b), se explica una vista de planta y una vista de perfil en donde se evidencia la integración del acero de refuerzo o figurado y el acero estructural de cubiertas con la Red de Equipotencialización.

¹⁴ Sistema de Protección contra rayos o “lightning protection Systems” en inglés.

¹⁵ Dispositivo de protección contra surges o “SPD Surge protective device” en inglés.

¹⁶ Compatibilidad electromagnética, “Electromagnetic Compability” en inglés.



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).

a: Distancia típica de 5m para conductores de malla superpuestos

Figuras 18. a) y 18. b) Utilización de acero de refuerzo para la unión equipotencial.

Fuente: [38]

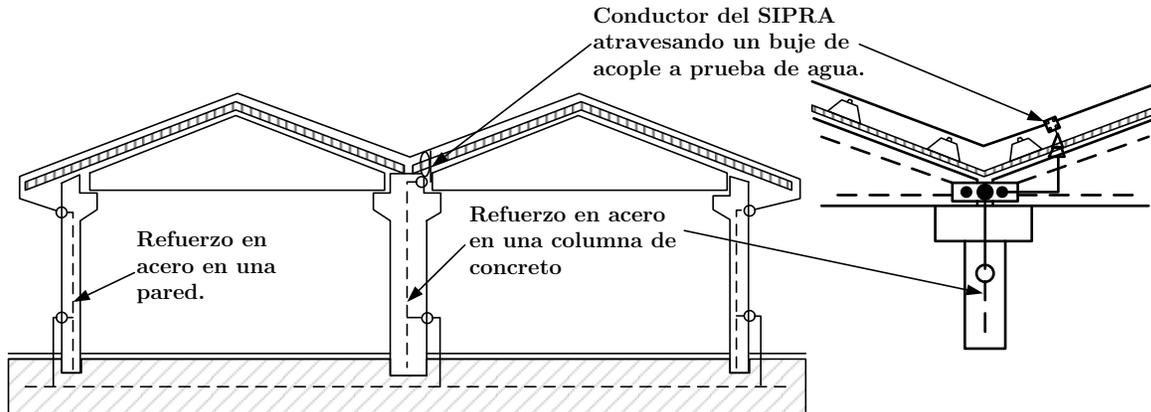


Figura 19. Conductores bajantes internos en estructuras industriales

Fuente: [38]

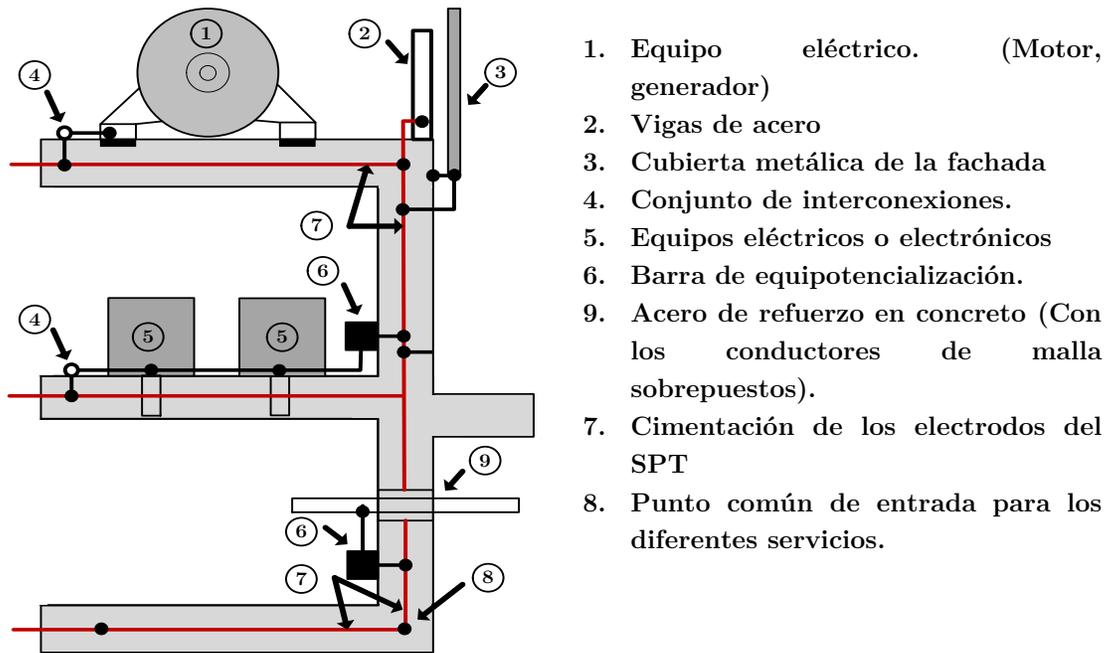


Figura 20. Unión equipotencial en una estructura con refuerzos de acero.

Fuente: [38]

3.1.3 Configuración de la red de equipotencialización (RE)

Las partes conductoras (gabinetes, recintos, estantes) y el conductor de protección (Protective Earth Conductor PE) de los sistemas internos (sistemas eléctrico o electrónico), deben ser conectados a tierra mediante una red de equipotencialización, de acuerdo con las siguientes configuraciones (Ver Figura 21):

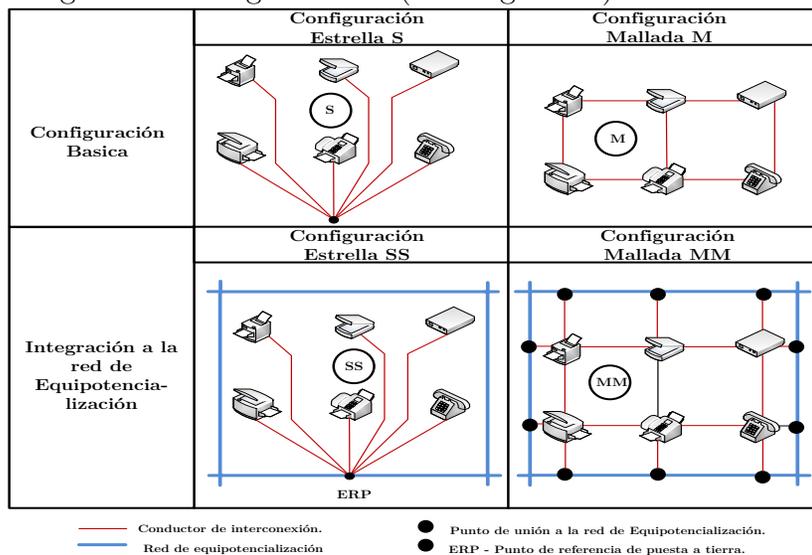


Figura 21. Integración de partes conductoras de los sistemas internos a la red de equipotencialización.

Fuente: [38]

Configuración en estrella (S): Configuración básica en donde todos los componentes metálicos (ejemplo gabinetes, recintos, estantes) de los sistemas eléctricos y electrónicos han sido aislados del SPT [38]. 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 PE, con el fin de evitar lazos o bucles de inducción. Los bucles o lazos se presentan debido al enrutamiento de las líneas (Ver numeral 3.2.2). A mayor área de inducción (tamaño del bucle), se presentara una mayor sobretensión, ante la incidencia de un campo magnético. De esta forma 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.

Configuración en estrella (SS): En esta, 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 (PRT¹⁷).

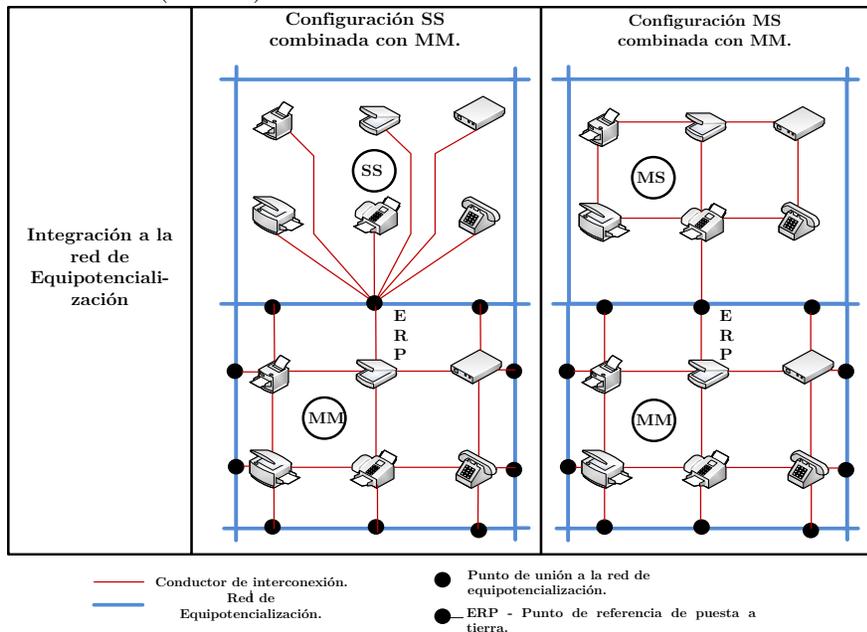


Figura 22. Combinaciones de los métodos de integración de las partes conductoras de los sistemas internos en la red de equipotencialización.

Fuente: [38]

Configuración enmallada (M): Esquema en donde todos los componentes metálicos de los sistemas internos, eléctricos y electrónicos, no deben ser aisladas del SPT. La configuración M es preferida para sistemas eléctricos y electrónicos extendidos sobre zonas relativamente amplias o en estructuras donde muchos de los conductores se

¹⁷ Punto de referencia a tierra: “Earthing Reference Point” en inglés.

encuentran entre las partes individuales de los equipos, y en donde las líneas entran a la estructura por diferentes puntos.

Configuración enmallada (MM): Configuración en donde la configuración M básica se integra al sistema de puesta a tierra mediante múltiples puntos de equipotencialización¹⁸, a la RE. En sistemas complejos, las ventajas de las configuraciones S y M pueden ser combinadas como se muestra en la Figura 22.

3.1.4 Configuración del SPT

3.1.4.1 Configuración Tipo A.

Este tipo de configuración (Ver Figura 23) está compuesta por un terminal de puesta a tierra que incluye dos o más electrodos horizontales¹⁹ o verticales, instalados fuera de la estructura a ser protegida y conectados a cada una de los 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. De acuerdo con lo que se indica en la referencia [4], el sistema de terminales de puesta a tierra tipo A deben ser instalado a una profundidad de al menos 0,5 m, distribuidos uniformemente para poder minimizar efectos de acople eléctrico en la tierra e instalados de tal forma que permita su inspección durante la construcción.

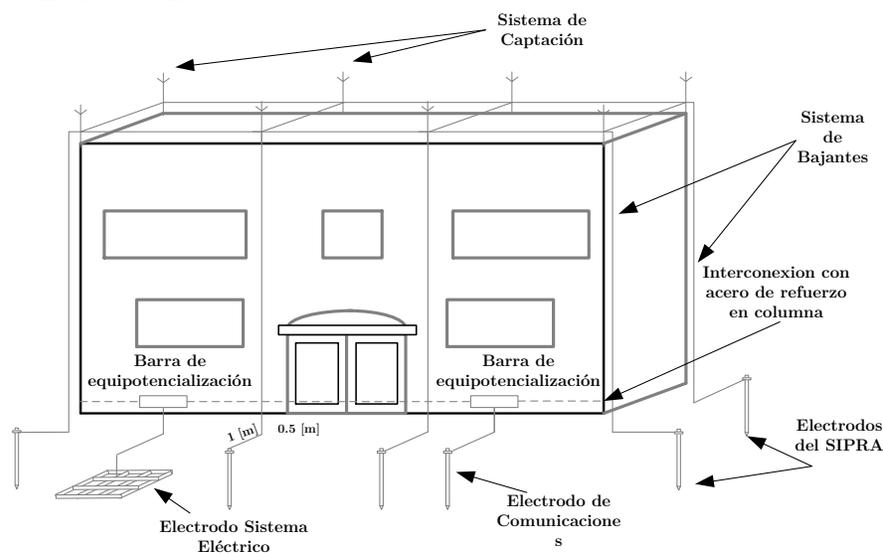


Figura 23. Esquema general de la configuración tipo A.

Fuente: [40]

¹⁸ Puntos de equipotencialización: “Bonding Points” en inglés.

¹⁹ Para información de longitudes mínimas de los electrodos de puesta a tierra ver [4], [38].

3.1.4.2 Configuración Tipo B.

Esta configuración está conformada por un terminal de puesta a tierra que incluye un anillo conductor externo²⁰ 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 a su vez deben estar interconectados. Estos electrodos también pueden ser del tipo mallado (Ver Figura 25). En esta configuración el número de electrodos no debe ser 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 los bajantes son conectados a éste y en lo posible, deben ser equidistantes. Así mismo, el anillo perimetral se debe situar a una profundidad de al menos 0,5 metros y separado de la fachada del edificio mínimo 1,0 metros. Desde este anillo, se deben prever las conexiones necesarias para los bajantes y para las barras de equipotencialización [41], como se muestra en la Figura 24.

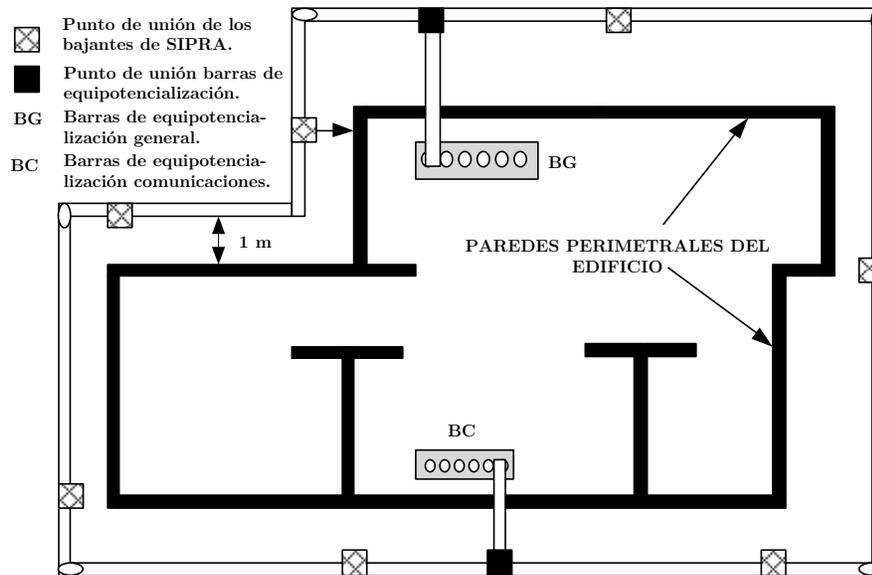


Figura 24. Esquema de anillo perimetral de tierra tipo B.

Fuente: [41]

Generalmente la configuración tipo B es recomendada para sistemas de captación enmallados (Ver Anexo C en la referencia [4]), estructuras con peligro de incendio y explosión (Ver la referencia [4] capítulo 5.4.2), terrenos de roca sólida al descubierto, estructuras que usan material aislante en ladrillo o madera sin cimentación de acero reforzado. Así mismo, esta configuración también es efectiva para controlar las tensiones de paso y de contacto, puesto que iguala el potencial entre los bajantes a nivel de tierra. Estos potenciales diferentes son producto de una distribución desigual de las corrientes

²⁰ Para información del área a encerrar por el anillo conductor externo, y la necesidad de adicionar electrodos horizontales o verticales, refiérase a [4].

del rayo, en sistemas con múltiples puntas de captación y bajantes, puesto que cada camino por el que se drena la corriente mostrará un valor de impedancia diferente y de esta manera una caída de potencial diferente.

Por otra parte, en la referencia [4] se recomienda que en estructuras provistas de aparatos eléctricos no sensibles, se utilice una disposición de puesta a tierra tipo A; pero en sistemas con equipos sensibles o sistemas electrónicos, se recomienda una disposición de tierra Tipo B, puesto que esta provee una mayor equipotencialización de la instalación debido a su construcción, tal como sucede en el caso de un centro de comunicaciones o procesamiento de datos. La Figura 25, muestra un esquema general de la configuración tipo B para una edificación.

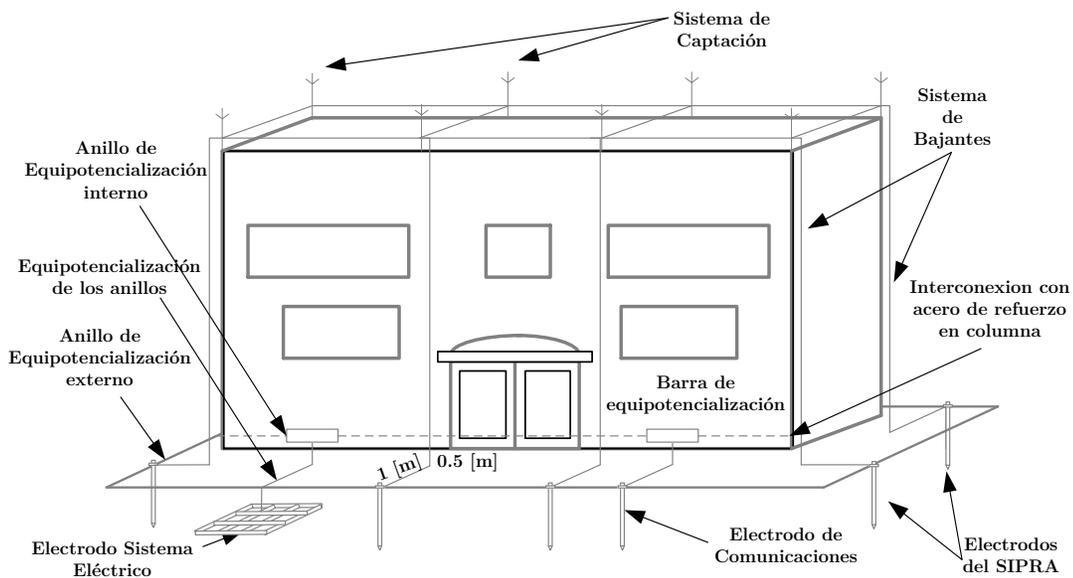


Figura 25. Esquema general de la configuración tipo B.

Fuente: [41]

3.1.5 Instalación de barras de equipotencialización

La barra de equipotencialización (Ver Figura 26), es un elemento de material conductor, en el cual se agrupan partes metálicas no energizadas de una instalación o parte de ella. En esta instalación debe existir una barra de equipotencialización principal, la cual debe estar conectada directamente a un electrodo del SPT [38]. Para instalaciones con abundante equipamiento sensible, como en el caso de sistemas de comunicaciones, se recomienda tener una barra de equipotencialización para los equipos eléctricos en general y otra exclusiva para los equipos de comunicaciones como se muestra en la Figura 24 y Figura 25.

Así mismo, estas barras son generalmente instaladas para la interconexión de todos los servicios conductivos que entran en una zona de protección contra rayos

(directamente o mediante el uso adecuado de DPS²¹), junto con el conductor de protección a tierra (PE), los componentes metálicos del sistema interno (ejemplo gabinetes, recintos, estantes) y el blindaje magnético de las ZPR ubicado en la periferia y dentro de la estructura. La Figura 26, muestra una representación de la equipotencialización de los servicios conductivos, a una barra de equipotencialización.

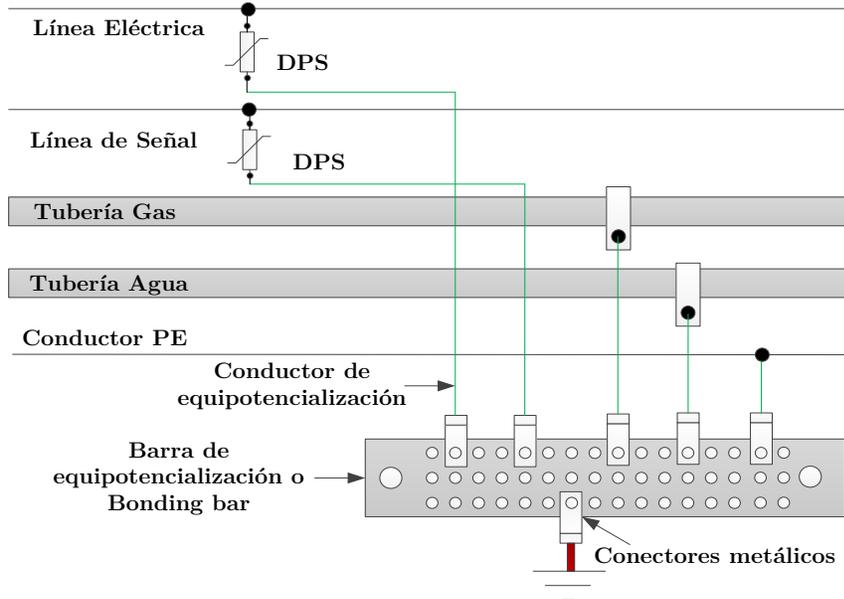


Figura 26. Arreglo de red de equipotencialización

Fuente: [40]

A continuación, se citan las reglas básicas de instalación de las barras de equipotencialización para una conexión eficiente:

- ◆ Debe tener una baja impedancia en la red de equipotencialización.
- ◆ Deben ser conectadas al SPT por el camino más corto posible.
- ◆ El material y las dimensiones de la Barra de Equipotencialización y de los conductores de interconexión deben cumplir con la Tabla 4.
- ◆ Los DPS deben ser instalados de forma que se use la conexión más corta posible a la BE, así como a conductores vivos. Esto minimiza los cambios de tensión inductivos.

Sobre el lado protegido del circuito (aguas abajo de un DPS), deben ser minimizados los efectos de inducción mutua, minimizando el área del bucle o utilizando cables o ductos portacables, dado que la sobretensión generada al incidir un campo magnético sobre la instalación, este es directamente proporcional al área de los bucles producidos por el enrutamiento de las líneas (Ver numeral 3.2.2).

²¹ Dispositivos de protección contra surges. “Surge protective device” SPD en inglés.

3.2 Buenas prácticas mediante el uso de blindajes magnéticos y enrutamiento de líneas [17].

3.2.1 Información general.

Los blindajes magnéticos²² son usados para la atenuación del acoplamiento directo de perturbaciones electromagnéticas radiadas desde el exterior al interior de los circuitos eléctricos y electrónicos e inversamente mediante la atenuación de las perturbaciones radiadas de los circuitos internos hacia el exterior, contribuyendo de esta forma en la CEM de la instalación. Entre los ejemplos de edificaciones generalmente 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 computo, entre otras.

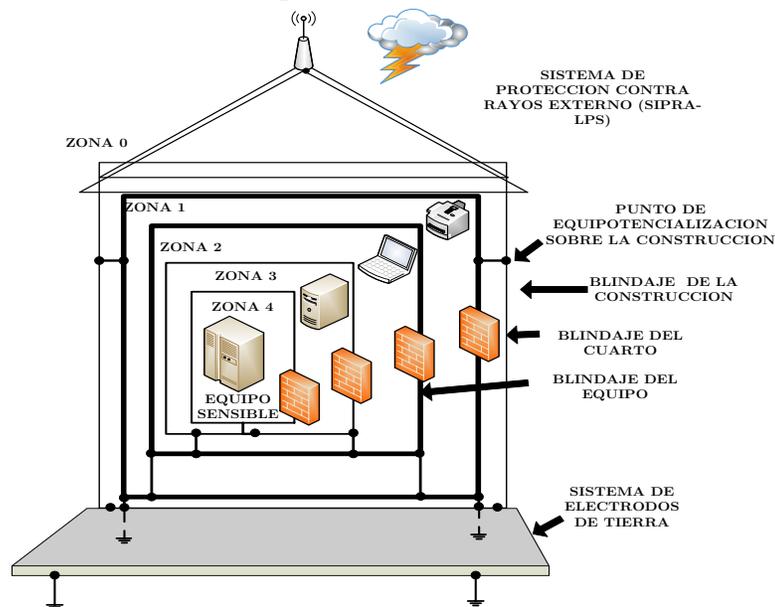


Figura 27. Topología del concepto de blindajes con interfaces en puntos de penetración.

Fuente: [42]

En la Figura 27 se aprecian los blindajes definidos mediante las 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.

²²“Magnetic Shielding” en inglés.

3.2.2 Blindaje espacial, de líneas internas, líneas externas y enrutamiento de las líneas internas

Los blindajes espaciales²³ son los encargados de definir las zonas de protección que pueden cubrir toda la estructura o parte de ella, por ejemplo una sola habitación o solo la carcasa del equipo²⁴. Estos blindajes pueden tomar forma de cuadrícula²⁵, pueden ser de metal continuo o compuestos por componentes naturales de la misma estructura. A menudo, son aconsejables y útiles para proteger una zona definida de la estructura, en vez de algunas piezas individuales de los equipos.

Los blindajes deben ser previstos en la etapa de planeación inicial de una nueva construcción o un nuevo sistema eléctrico y electrónico, puesto que la aplicación de estos en instalaciones existentes, conlleva a altos costos y grandes dificultades técnicas. Cuando el blindaje está restringido al cableado y el equipo de un sistema que está protegido, se le conoce como blindaje de líneas internas y corresponde al blindaje metálico de cables, los ductos metálicos, portacables cerrados y la carcasa metálica del equipo.

Por otra parte, está el blindaje de líneas externas que entran a la estructura, el cual puede estar compuesto por cables blindados, ductos metálicos portacables y cárcamos, todos estos a su vez interconectados con el acero de refuerzo de la estructura; esta medida es útil puesto que minimiza las tensiones inducidas y conducidas.

Finalmente, el enrutamiento de líneas es definido como la forma en la cual se realiza la distribución y cableado de los conductores o circuitos ramales dentro de una instalación interna. Por lo general se utilizan circuitos separados para las líneas eléctricas y las líneas de datos. Este permite minimizar los lazos de inducción y reducir la creación de picos de tensión internamente en la estructura. El área de los lazos de inducción puede ser minimizada mediante el enrutamiento cerca a los componentes naturales de la estructura, que se encuentran conectados a tierra y/o por el enrutamiento de las líneas eléctricas contiguas con las de señal. Puede ser necesaria cierta distancia entre las líneas eléctricas y las líneas de señal que se encuentran sin blindaje para evitar interferencia. [38], [42].

Desde la Figura 28 hasta la Figura 33, se presenta 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). Al mismo tiempo en la Figura 28, se aprecia que se forma un lazo de inducción que en principio no está definido, pues el camino de retorno de la corriente

²³ “Spatial Shielding” en inglés.

²⁴ “Equipment Enclosure” en inglés.

²⁵ “Grid-Like” en inglés.

“i” a través del sistema de masas y la definición de este camino, depende de varios factores como la frecuencia de la señal y la existencia de otras corrientes que circulen por las masas, etc. Si la unión entre el generador de sobretensiones y el receptor se hace mediante un cable blindado (Ver la Figura 29) y no se consideran las conexiones de masa, el campo neto exterior creado por el cable es cero, dado 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 influencias externas. Sin embargo, si se consideran las conexiones a masa, como en la Figura 30, 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 28. Es decir, a frecuencias bajas la corriente retorna por el plano de masa y no por el blindaje, por tanto este no es efectivo.

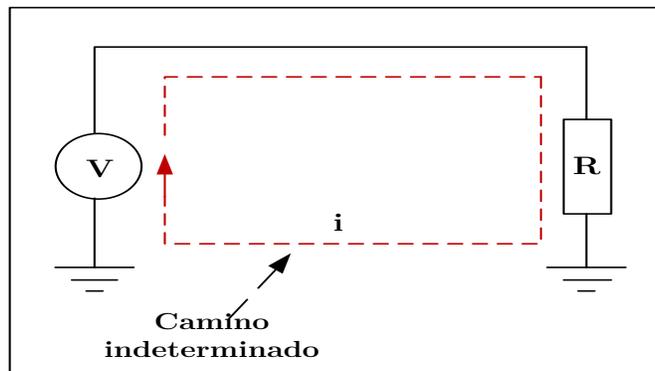


Figura 28. Lazo de inducción entre generador de sobretensiones y receptor.

Fuente: [42]

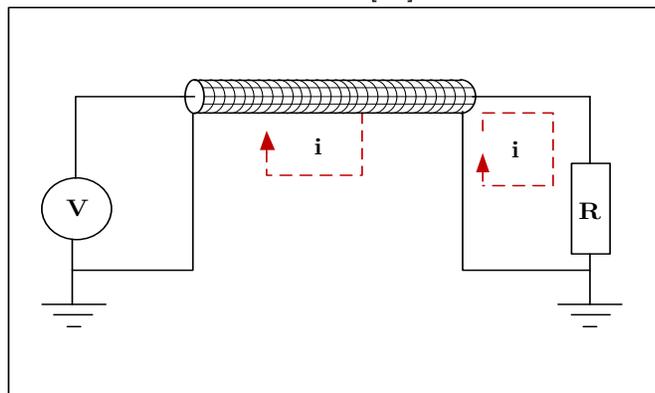


Figura 29. Circuito interconectado mediante cable coaxial sin conexiones a masa.

Fuente: [42]

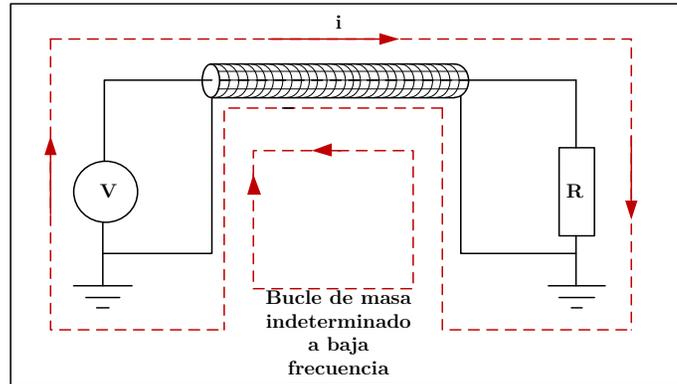


Figura 30. Circuito interconectado mediante cable blindado con conexión a masa.

Fuente: [42]

En la Figura 31 se observa que a bajas frecuencias, el cable blindado no debe quedar aislado de masa en cualquiera de sus extremos, puesto que al desconectarse la masa en uno de los puntos del blindaje, el circuito se vuelve efectivo frente a campos magnéticos pues toda la corriente retorna por él y no existe bucle de masa.

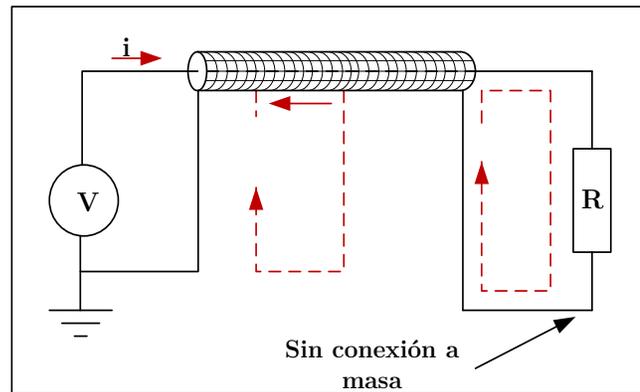


Figura 31. Blindaje efectivo frente a campos magnéticos sin conexión a masa.

Fuente: [42]

Del mismo modo en la Figura 32 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. 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.

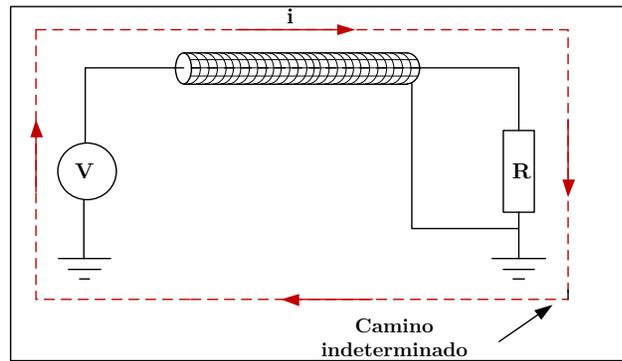
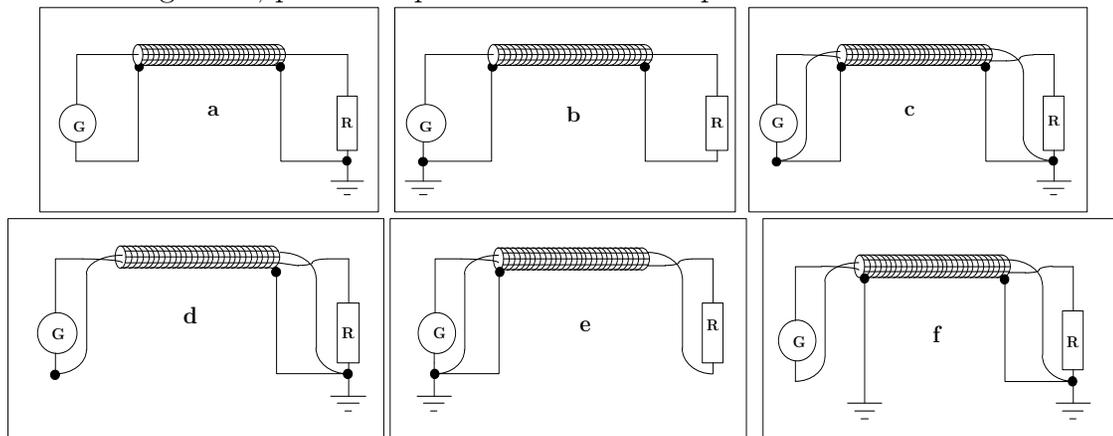


Figura 32. Blindaje efectivo frente a campos magnéticos con conexión a masa.

Fuente: [42]

Con respecto a la protección frente a campos electromagnéticos externos, se presentan en la Figura 33 varias formas de conectar un cable blindado, ordenadas de mayor a menor protección general, siendo la menor la conexión m, que es equivalente a no tener blindaje. Esta comparación se hace con base en una frecuencia de 60 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 33 presentan una doble conexión a masa, por lo que no son muy efectivas contra campos magnéticos, esto debido a 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 33 tiene un solo extremo de blindaje a masa y puede ofrecer protección electrostática, pero no magnética. El uso de un par trenzado como en la conexión (k) de la Figura 33 podría dar una mejor protección magnética, pero lo impide el lazo formado por la doble conexión de masa.



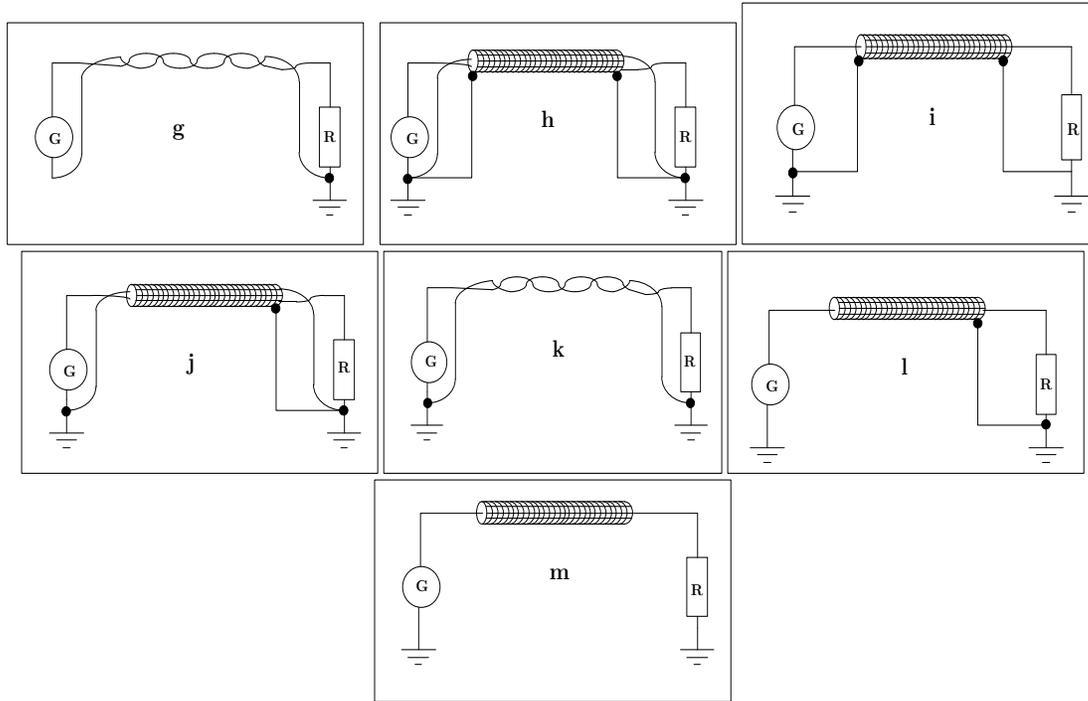


Figura 33. Formas de conexión de un cable blindado.

Fuente: [42]

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 pues 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 la doble conexión del blindaje, pues 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 evitan 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 Buenas prácticas mediante la definición de Zonas de protección y sistema coordinado de DPS [38]

3.3.1 Información general.

Las zonas de protección corresponden a divisiones que se le hacen al entorno, de una instalación eléctrica, considerando los posibles daños asociados al impulso electromagnético del rayo (IER), sobre los equipos eléctricos y electrónicos en el interior de dicha instalación. Por lo tanto, los sistemas internos deben estar provistos de un sistema coordinado con DPS y otras medidas, de acuerdo con la severidad del IER, y teniendo en cuenta la existencia de diferentes clasificaciones que garantizan la protección, la operación y buen funcionamiento de los equipos, así como la CEM de la instalación. El número de estas zonas de protección contra el rayo está determinado por las propiedades físicas de la estructura y la susceptibilidad o inmunidad del equipo vulnerable.

3.3.2 Clasificación de zonas de protección contra el rayo (ZPR).

De acuerdo con las referencias [2] y [38], se proponen las siguientes zonas:

Zonas externas o ZPR 0: Zona donde la amenaza se debe a la no atenuación del IER del rayo y donde los sistemas internos pueden estar sometidos al pico de corriente, total o parcial del rayo. Se divide en dos:

- a. ZPR 0_A: Zona donde la amenaza es debido a impactos directos del rayo y debe soportar la corriente total del rayo. Los campos electromagnéticos son muy intensos y no atenuados. Los sistemas internos pueden ser sometidos al pico de corriente total del rayo.
- b. ZPR 0_B: 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 y no están atenuados.

Zonas internas:

- a. 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 se encuentran en las fronteras. El blindaje espacial puede atenuar el campo electromagnético del rayo.

- b. 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, en las fronteras. Adicionalmente puede ser usado el blindaje espacial para atenuar aún más el campo electromagnético del rayo.

En la Figura 34 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.

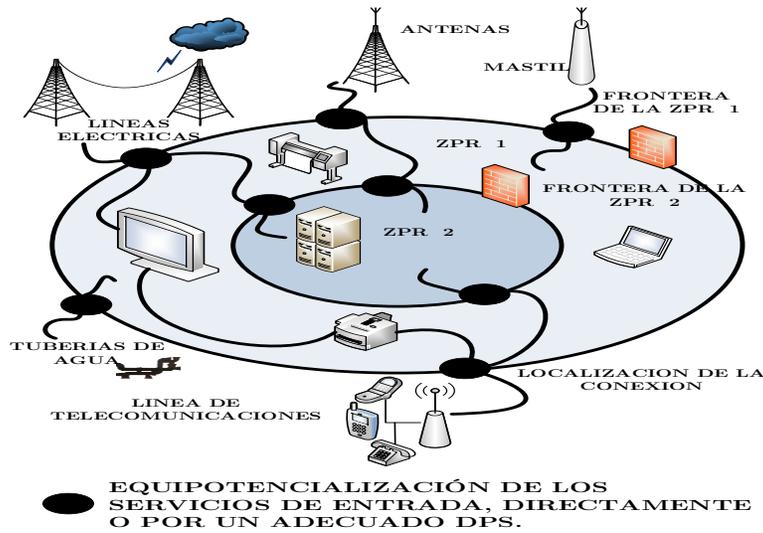


Figura 34. Principio general para las diferentes ZPR.

Fuente: [38]

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 (Ver numeral 3.3.7). Todos los servicios metálicos que entran en la estructura, están unidos a través de barras de equipotencialización en la frontera de la ZPR 1(Ver Figura 26), al igual que los conductores de las entradas de servicios de la ZPR 2 (por ejemplo, salas de cómputo), en la frontera de la ZPR 2.

Para asegurar la protección de las distintas zonas que se muestran en la Figura 35, 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.

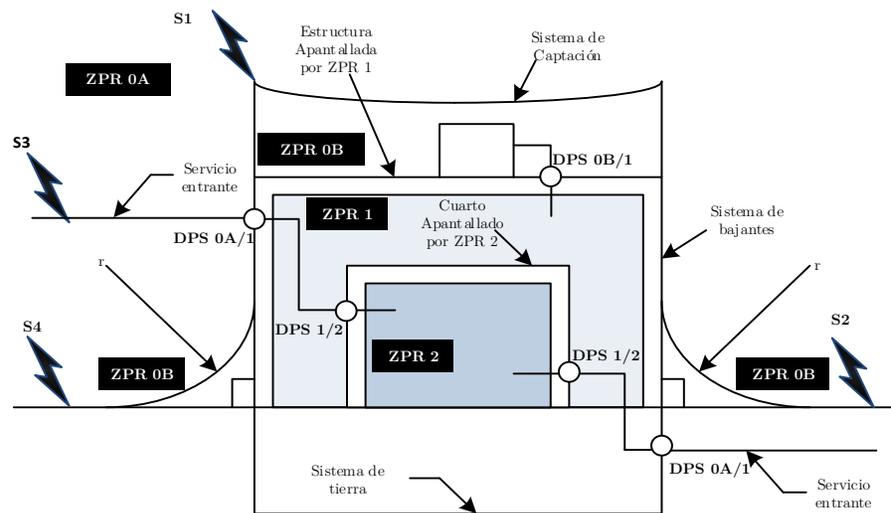


Figura 35. Zonas de protección contra rayos para medidas de protección contra el IER.

Fuente: [2]

3.3.3 Dispositivos de protección contra surges (DPS)

Los dispositivos de protección contra surges (DPS) tienen como propósito mitigar las interferencias electromagnéticas. La mitigación de estos efectos, requiere que los componentes básicos estén orientados al control de tensión y corriente, por ejemplo: varistores, diodos supresores y vía de chispas [43].

Los DPS están encargados de limitar las sobretensiones transitorias y desviar las sobrecorrientes a tierra. Dichos dispositivos contienen al menos un componente no lineal. Su función principal es proteger contra sobretensiones y sobrecorrientes a los equipos eléctricos o electrónicos e instalaciones, así como para establecer conexiones equipotenciales y deben cumplir con los siguientes requerimientos:

- ◆ **Supervivencia:** Es vital que la protección escogida sea capaz de soportar el 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 comunicaciones y los equipos de seguridad son particularmente susceptibles a este tipo de problemas.

Por otra parte los DPS se pueden clasificar de acuerdo con los siguientes parámetros descritos en la referencia [2]:

Números de puertos (Uno o dos); Topología de diseño (Operado por tensión por ejemplo vía de chispas o limitador de tensión o la combinación de ambos); Clase: I, II o III. (Ver Tabla 3); Localización (Interior o exterior); Accesibilidad (Accesible o no accesible); Método de montaje (Fijo o portátil); Ubicación (externo, interno, ambos externo e interno o ninguno); Función (térmica, corriente de fuga, sobrecorriente); Protección de sobrecorriente de respaldo (Especificada o no); Grado de protección (Código IP); Rango de temperatura.

Descripción	Clase	Descripción
Descargadores de corriente del rayo y descargadores combinados de sobretensión y corriente del rayo	Clase I	Descargadores de corriente del rayo: Utilizados para protección 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 8/20 μs ²⁶ y pruebas de impulso de tensión con forma de onda 1,2/50 μs , según [43] Combinación de descargadores de corriente del rayo y descargadores de sobretensión: Utilizados para dispositivos terminales por interferencias debidas a impactos de rayos directos o cercanos a la instalación a proteger.
DPS para tableros de distribución e instalaciones fijas	Clase II	Descargadores de sobretensión: Se utilizan para protección 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 μs , según [43]
DPS para tomacorrientes y equipos	Clase III	

Tabla 3. Clases de DPS.

Fuente: [43]

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

Cuando se define una Zona de Protección contra Rayos, se deben equipotencializar todas las partes metálicas y servicios que cruzan la frontera de esta ZPR (tuberías metálicas, tuberías de gas o de agua entre otras) (Ver sección 3.3). Esta equipotencialización debe ser discutida con los diferentes operadores de red involucrados (telecomunicaciones, red eléctrica, agua, gas y alcantarillado, cuya tubería sea metálica) o autoridades concernientes, debido a que pueden existir requisitos opuestos. Para el caso Colombiano, a través de la referencia [44] se ha dispuesto tener en cuenta la clasificación de áreas contemplada por el Código eléctrico colombiano [18], con respecto

²⁶ Formas de onda para evaluación de DPS. (Ver las referencias [109] [43])

a la instalación de redes eléctricas en inmediaciones de redes de gas, al igual que otros reglamentos específicos por parte de los operadores de red, la equipotencialización de estas tuberías deberá realizarse de acuerdo a las exigencias planteadas en cada localidad.

Esta equipotencialización debe realizarse a través de barras de equipotencialización, las cuales se instalarán lo más cerca posible del punto de entrada de los servicios domésticos en la frontera de la ZPR definida. Siempre que sea posible, las entradas de los servicios deben estar en el mismo punto de la ZPR, al mismo tiempo deben ser conectados a una misma barra de equipotencialización como se muestra en la Figura 36.

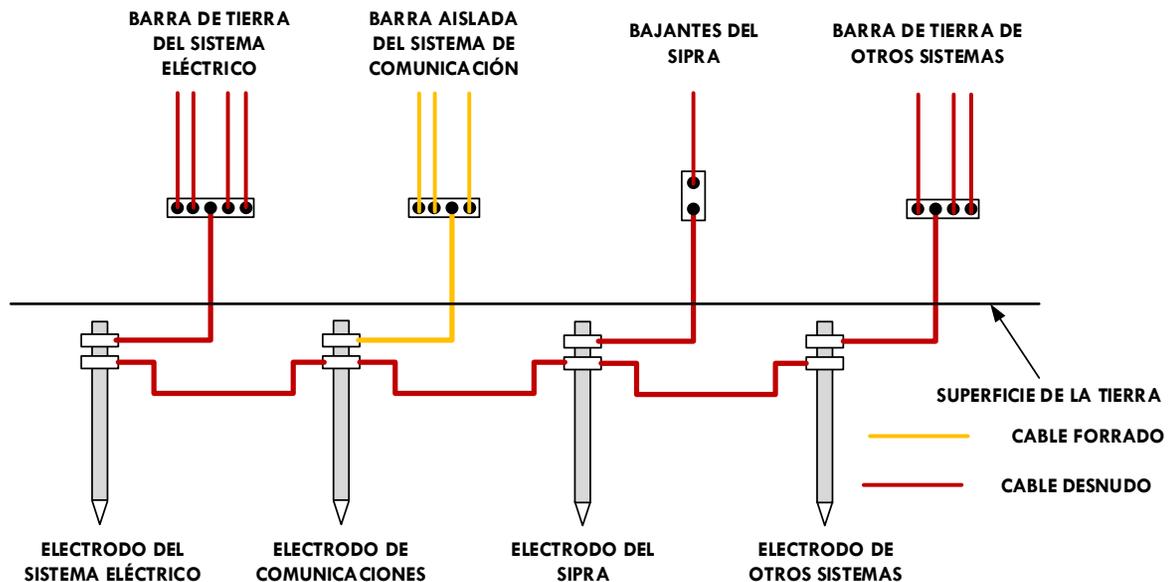


Figura 36. Equipotencialización en anillo de los electrodos de puesta a tierra.

Fuente: [40]

Si la entrada de los servicios está localizada en diferentes lugares, cada servicio debe estar conectado a una barra y al mismo tiempo deben estar interconectadas entre sí.

Los DPS siempre deben estar equipotencializados en la barra de la entrada de las ZPR²⁷. Esto con el objetivo de unir las líneas entrantes, que están conectados a los sistemas eléctricos y electrónicos dentro de la ZPR. Como práctica común para reducir el número de DPS requeridos se utiliza una interconexión o extensión de la ZPR (Ver sección 3.3.8). Así mismo, los cables blindados o los ductos portacables metálicos interconectados, se deben unir en cada frontera²⁸ de la ZPR, estos cables blindados pueden ser utilizados para interconectar varias ZPR del mismo orden en una ZPR conjunta, de manera que se pueda extender una ZPR hasta la siguiente frontera.

²⁷ Zonas de protección contra rayos. “Lightning Protection Zones” en inglés.

²⁸ “Boundary” en inglés.

3.3.5 Selección e instalación de un sistema coordinado de DPS.

En sistemas eléctricos y electrónicos complejos, tanto para en las redes eléctricas como en las de señal, se debe tener en cuenta un adecuado sistema coordinado de DPS²⁹. La eficiencia de este depende, no solo de la selección adecuada de los DPS sino también de su correcta instalación. Entre los aspectos más importantes se encuentran los descrito en los siguientes numerales [42]:

3.3.5.1 Localización del DPS.

La localización del DPS está principalmente afectada por la fuente de daño [2] 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), así como 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:

- ◆ El primer criterio 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).

3.3.5.2 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 (Considérese que U_w es el nivel de inmunidad del equipo (Ver numeral 3.3.3)). 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:

$$d_{po} = \frac{U_w - U_p}{k} \text{ (m)} \quad 30$$

Ecuación 3-1

²⁹ “Coordinated SPD System” en inglés.

³⁰ Los parámetros de un DPS como U_p , U_w entre otros, son definidos en la referencia [43].

En donde $k= 25$ [V/m]

3.3.5.3 Conductores de conexión.

Los conductores de conexión de los DPS deben tener la mínima sección transversal posible, de acuerdo con la Tabla 4.

Componente de equipotencialización		Material	Sección transversal mm ²
Barras de equipotencialización (cobre, acero recubierto de cobre y acero galvanizado)		Cu, Fe	50
Conductores de conexión entre las barras de equipotencialización y el sistema de puesta a tierra u otra barra de equipotencialización. (Llevan la corriente parcial del rayo)		Cu	16
		Al	25
		Fe	50
Conductores de conexión entre instalaciones metálicas internas y barras equipotenciales		Cu Al Fe	6 10 16
Conductores de tierra para DPS. (Llevan la corriente total o una parte significativa del rayo)	Clase I	Cu	16
	Clase II		6
	Clase III		1
	Otros DPS		1
Otros materiales usados en vez del cobre deben tener una sección transversal equivalente. En muchos países, pueden ser utilizados conductores más pequeños, cumpliendo los requerimientos térmicos y mecánicos. Ver anexo D en la referencia [2]. Para DPS usados en sistemas de potencia, se debe consultar información adicional consignada en las referencias [45] y [46]. Otros DPS, incluidos los DPS utilizados en telecomunicaciones y sistemas de señalización			

Tabla 4. Materiales y dimensiones para los componentes de equipotencialización

Fuente: [38]

3.3.5.4 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 numerales 3.2.2 y 3.3.7).
- ◆ 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, la protección en relación a la distancia del tramo del conductor debido a fenómenos inducidos, puede ser despreciada. 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:

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

Ecuación 3-2

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 referencia [3], que se denominan como:

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.

3.3.6 Procedimiento para instalar un sistema coordinado de DPS

El Procedimiento puede ser citado como sigue a continuación:

1. Instalar en la entrada de la línea a la estructura un DPS (DPS I), en la frontera de ZPR 0 – ZPR 1 (Ver Figura 38. Ejemplo de aplicación de DPS en una instalación eléctrica.), 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 I o 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 I), y $d_{pi/1}$ (distancia de protección contra inducciones del DPS I).
5. Si las condiciones 3 y 4 se cumplen, el equipo se encuentra protegido por el elemento DPS I, de lo contrario se necesita un DPS II adicional:
6. 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 DPS I.
7. Seleccionar el U_{p2} (nivel de protección del DPS II o clase II) para garantizar que el nivel efectivo de protección cumpla con $U_{p2} \leq U_w$.
8. 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 DPS I 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 DPS I y DPS II. Por otra parte si dos o más DPS son instalados uno después del otro en el mismo circuito, se deben coordinar de tal forma que se divida entre ellos la energía a ser manejada de acuerdo con su propia capacidad de absorción energética. 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 37, presenta el procedimiento antes descrito en el literal 3.3.5, así mismo la Figura 38 presenta un ejemplo de la implementación de DPS en una instalación eléctrica de acuerdo con el concepto de zonas de protección contra rayo [2], (Ver numeral 3.3.7). Los DPS son instalados en secuencia y son escogidos de acuerdo con los requisitos del punto particular de instalación.

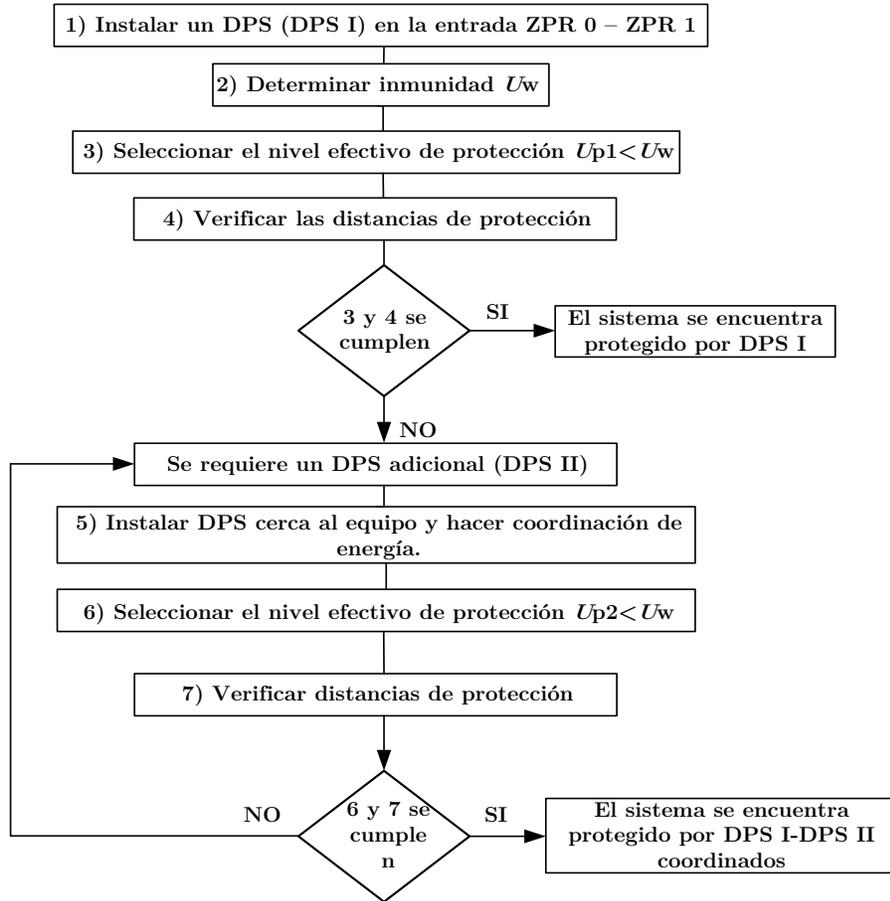


Figura 37. Procedimiento de instalación de un sistema coordinado de DPS.

Fuente: [43]

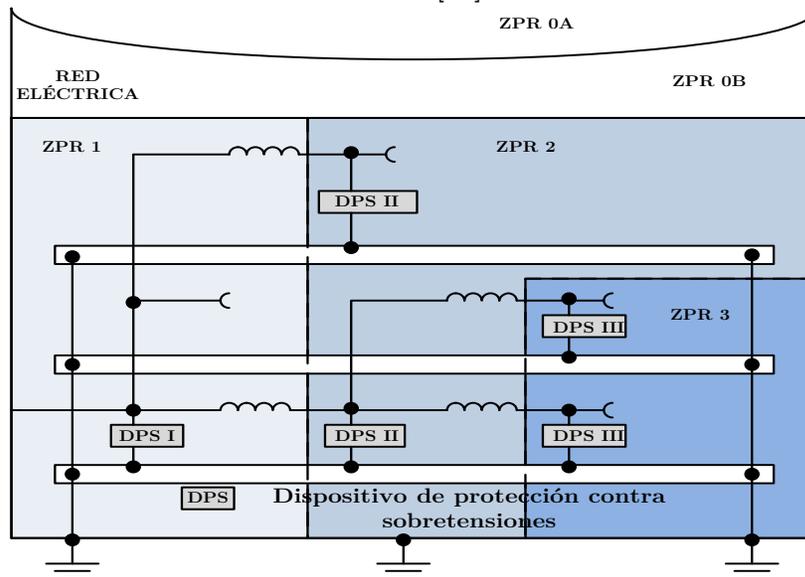


Figura 38. Ejemplo de aplicación de DPS en una instalación eléctrica.

Fuente: [43]

También se hace necesario la coordinación energética para evitar sobre esfuerzos en los DPS de un sistema interno y los equipos a proteger. Esta se logra si la porción de energía a la cual está sujeta cada DPS es menor o igual a su propia energía soportable. La premisa fundamental consiste en reducir paso a paso la interferencia electromagnética que pueda incidir dentro de una instalación [46]. Así mismo, los niveles de energía soportable pueden ser obtenidos de ensayos eléctricos de acuerdo con lo indicado en la referencia [43] e información técnica proporcionada en los catálogos de fabricantes.

En este sentido, la coordinación energética está orientada a dimensionar un circuito de protección para el equipo a proteger de forma tal, que solo ante el inminente riesgo de sobrecarga del circuito de protección activa el nivel de protección dimensionado. Sólo así se logra una relación equilibrada entre los costos que suponen un sistema de protección y los beneficios obtenidos.

En este sentido se presenta la Figura 39, en la que se aprecia 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 DPS I y DPS II es despreciable.

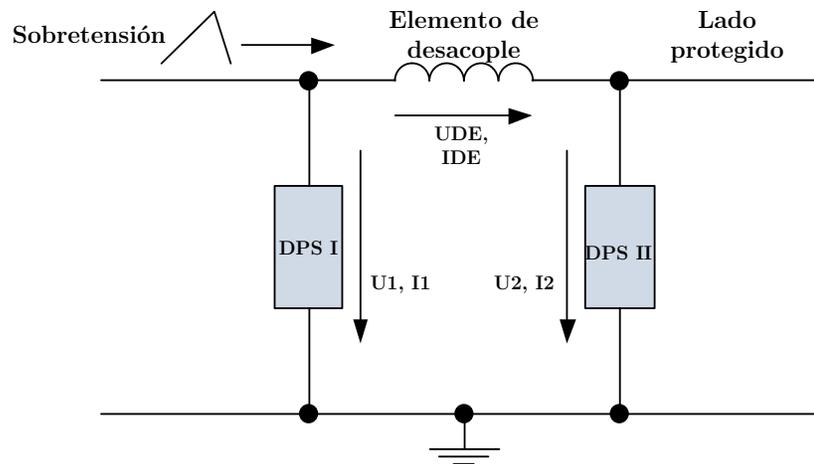


Figura 39. Modelo básico para la coordinación de energía de DPS.

Fuente: [46]

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 en la instalación o en el equipo a proteger, para garantizar que la operación sea efectiva.

La Figura 40 presenta el concepto de coordinación energética de acuerdo con lo descrito por la referencia [46]. Cada DPS respecto a la ZPR (Ver numeral 3.3.3) está sujeto a una tensión de corte, garantizando que la salida de tensión aguas abajo de los DPS, no supera dicho límite de tensión, puesto que para valores superiores de tensión actúa el DPS desviando dicha sobretensión.

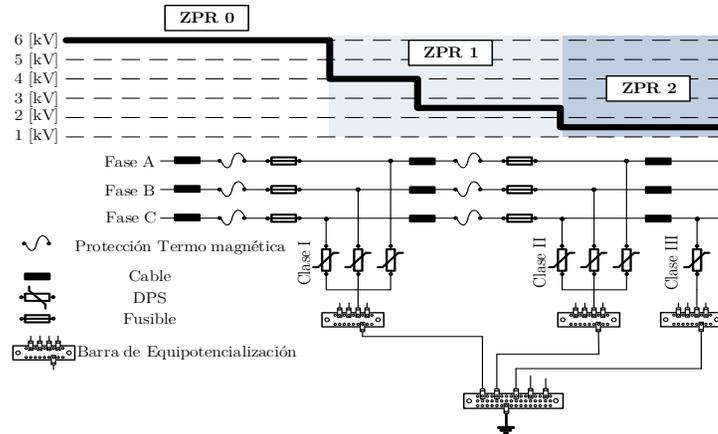


Figura 40. Esquema de coordinación energética de DPS.
Fuente: [43]

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

Las MPR contra el IER, consisten de blindajes espaciales, cables apantallados y/o sistemas coordinados de DPS, que en conjunto con la carcasa del equipo, proporcionan una protección contra los efectos de conducción e inducción de sobrecorrientes y sobretensiones conducidas e inducidas a través del cableado y campos electromagnéticos generados por el impulso electromagnético del rayo, que inciden directamente sobre los equipos. Por lo tanto, para su mitigación se deben tener en cuenta las siguientes medidas:

3.3.7.1 MPR 1: El Sistema de puesta a tierra y equipotencialización.

- ◆ 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. 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.

3.3.7.2 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.
- ◆ 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 blindaje de redes internas eléctricas o de comunicación usando cables apantallados o ductos para cables. Esto minimiza las sobretensiones inducidas.

- ◆ El apantallamiento de redes externas que entran a la estructura reduce las sobretensiones que son conducidas al interior de la estructura.

3.3.7.3 MPR 3: El sistema coordinado de DPS. (Ver sección 3.3.3)

Esta medida mitiga los efectos de las surges externas e internas. En general 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 (El nivel de inmunidad de los equipos contra radiaciones de campos magnéticos, deben ser seleccionados de acuerdo con las referencias [47] y [48]) pertinentes en las normas de productos CEM. De ahí que, el equipo está obligado a cumplir con estas normas.

Al aplicar una MPR conformada por un sistema coordinado de DPS, se considera suficiente para la protección de estos equipos contra los efectos del IER. Para los equipos que no cumplan con estas normas, las MPR conformadas por un sistema coordinado de DPS, se consideran inadecuadas para la protección contra los efectos del IER.

En este caso el ANEXO A, en la referencia [38], se proporciona mayor información en cuanto a cómo lograr una mejor protección contra los campos electromagnéticos que inciden directamente.

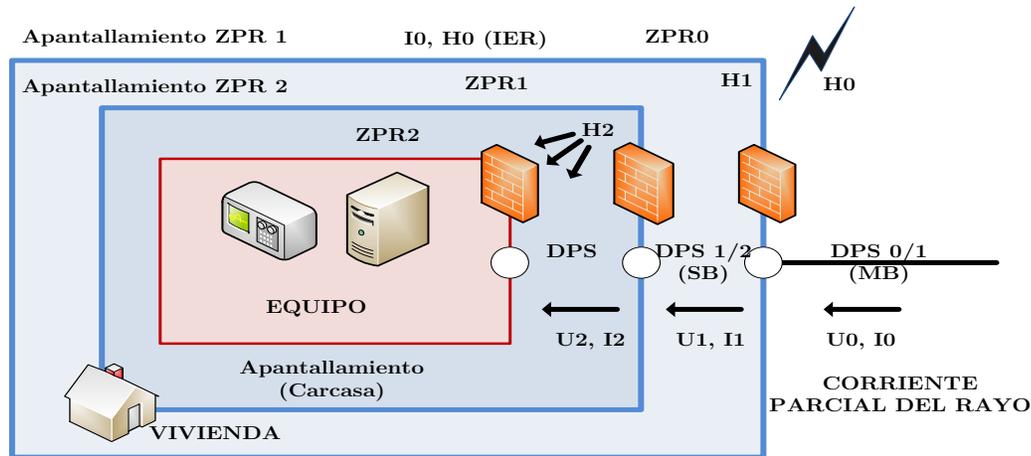


Figura 41. Ejemplo de la situación del IER debido al impacto del rayo.

Fuente: [38]

Por otra parte, la Figura 41 resume los niveles de inmunidad presentados en el caso de un impacto por rayo a una estructura, exponiendo las zonas de protección ZPR 0, ZPR 1 y ZPR 2.

El sistema electrónico a proteger está instalado dentro de la ZPR 2. De las Figura 42 a la Figura 45, se presentan otras 4 MPR adicionales, que surgen de la combinación de medidas de protección contra rayos, tales como el sistema de puesta a tierra, blindajes magnéticos y sistemas coordinados de DPS en diversas disposiciones.

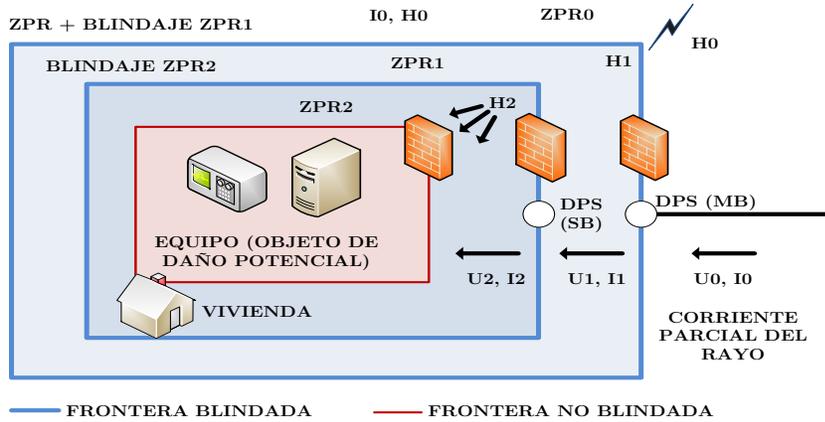


Figura 42. MPR que utilizan blindajes espaciales y un sistema coordinado de DPS, –contra surges ($U_2 \ll U_0$ y $I_2 \ll I_0$) y radiación de campos magnéticos ($H_2 \ll H_0$)

Fuente: [38]

La Figura 42, muestra la implementación de blindajes espaciales y sistemas coordinados de DPS, como 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.

En la Figura 43, se emplea un blindaje espacial en la ZPR1 y un DPS en la entrada de dicha zona. Estas son las medidas de protección contra el IER, que protegen el equipo contra la radiación de magnético y contra la conducción de surges.

Respecto a la Figura 42 y Figura 43, la protección podría no ser suficiente si el campo magnético remanente sigue siendo demasiado alto (debido a la baja efectividad del blindaje en la ZPR1), 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).

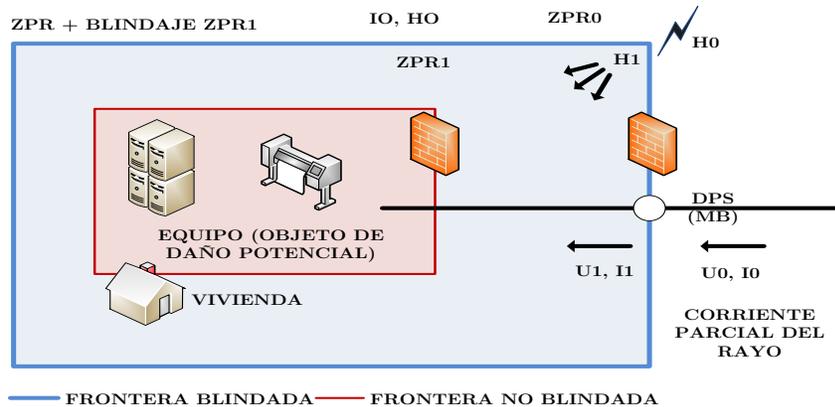


Figura 43. MPR que utiliza un blindaje espacial de la ZPR 1 y DPS en la entrada de la ZPR 1, contra surges ($U_1 < U_0$ y $I_1 < I_0$) y radiación de campos magnéticos ($H_1 < H_0$)

Fuente: [38]

En la Figura 44, se emplean cables apantallados combinados con el uso de los blindajes de las carcasas de los equipos. Estas son MPR que protegen contra la radiación de campos magnéticos. Así mismo, el DPS en la entrada de la ZPR1 proporcionará la protección contra surges conducidas. Para lograr disminuir el nivel de amenaza (desde la ZPR0 a la ZPR2), 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. Las soluciones correspondientes a la aplicación de las MPR expuestas en las Figura 42 a la Figura 44, recomiendan especialmente para equipos que no cumplan con las normas pertinentes de productos CEM.

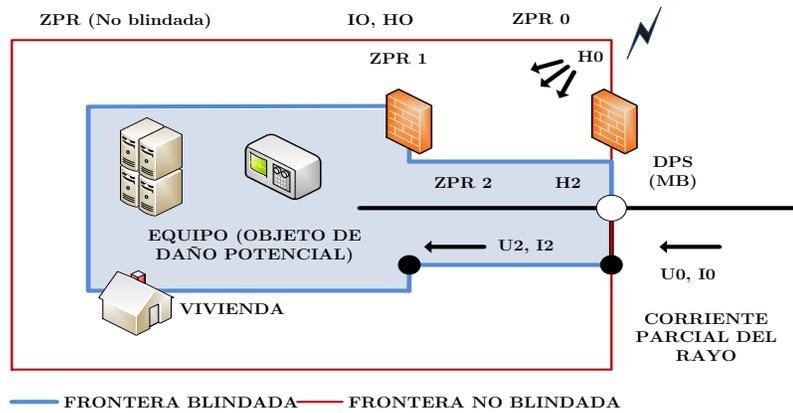


Figura 44. MPR que utiliza blindajes de líneas internas y DPS en la entrada de la ZPR 1. Contra surges ($U_2 < U_0$ y $I_2 < I_0$) y radiación de campos magnéticos ($H_2 < H_0$)
Fuente: [38]

La Figura 45, se utiliza solo un sistema coordinado de DPS que corresponde una MPR que solo es adecuada para la protección de equipos que son inmunes a la radiación de campos magnéticos, pues los DPS solo ofrecerán protección contra surges conducidas. Se puede alcanzar un nivel de amenaza menor de surges, empleando la coordinación de DPS.

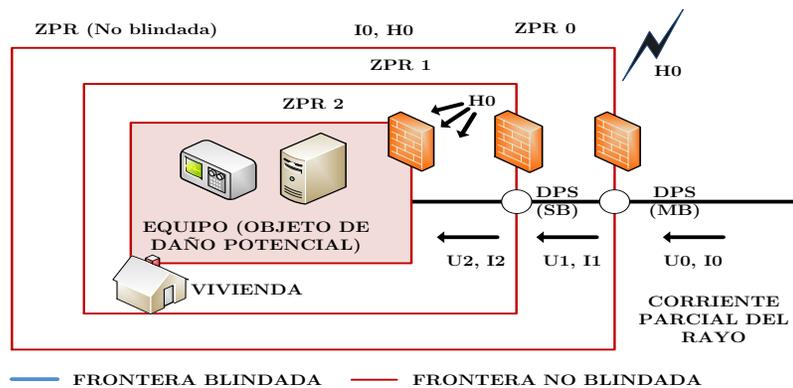


Figura 45. MPR que utiliza solo un sistema coordinado de DPS. Contra surges conducidas ($I_2 \ll I_0$ y $U_2 \ll U_0$), pero no contra la radiación de campos magnéticos (H_0).
Fuente: [38]

Respecto a las MPR de las Figura 42 a la Figura 45, los DPS a menudo se localizan en la frontera de la ZPR1 (tablero de distribución principal-TP), o en la frontera de la ZPR2 (tablero de distribución secundario-TS), o cerca a los equipos o en los equipo por ejemplo en los toma corrientes.

Por otra parte un sistema de protección contrarayos, diseñado de acuerdo con la referencia [4], 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 sistema de protección contra rayos 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.

La interconexión de ZPR del mismo orden (zonas de igual clasificación), puede ser necesaria cuando dos estructuras separadas se encuentran conectadas por líneas eléctricas o de señal o si se requiere que el número de DPS sea reducido. En las Figura 46 hasta la Figura 49, se presentan las diferentes interconexiones de estas estructuras.

La Figura 46 muestra dos ZPR1 interconectadas mediante redes eléctricas o de señales. Este caso debe tomarse con un especial cuidado cuando ambas ZPR 1 representan estructuras, con SPT independientes o separados, espaciadas decenas o cientos de metros una de la otra, puesto que una gran parte de la corriente del rayo puede fluir a lo largo de las líneas interconectadas, que no están protegidas.

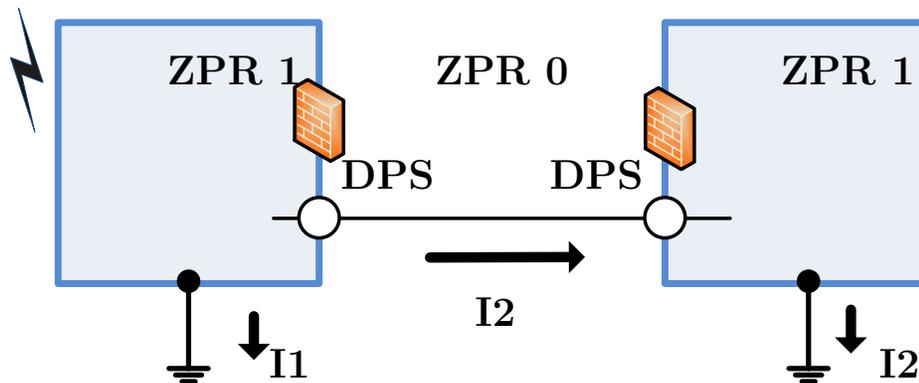


Figura 46. Interconexión de dos ZPR 1 usando DPS.

Fuente: [38]

En la Figura 47 se presenta una solución a lo expuesto en la Figura 46 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 pueden ser omitidos si la caída de tensión o el Voltage Drop a lo largo del blindaje no es muy alta.

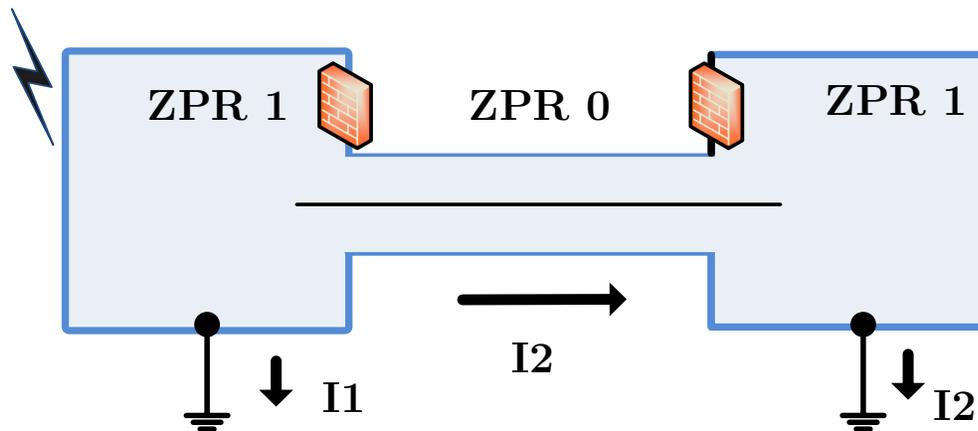


Figura 47. Interconexión de dos ZPR 1 usando cables o ductos portacables blindados.
Fuente: [38]

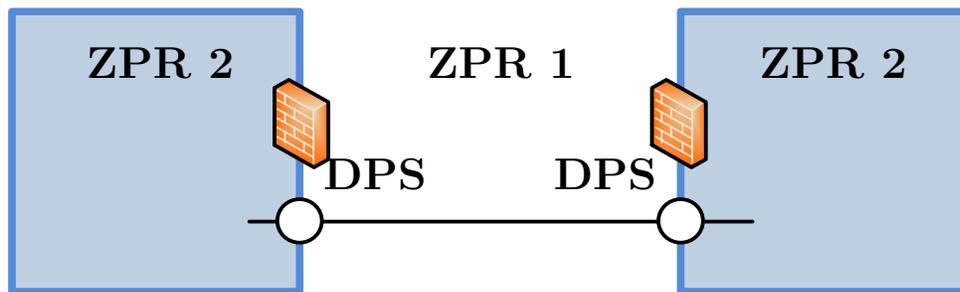


Figura 48. Interconexión de dos ZPR 2 usando DPS.
Fuente: [38]

La Figura 48 presenta dos ZPR³¹ conectadas por líneas de redes eléctricas o de datos. Debido a que las líneas están expuestas al nivel de amenaza de la ZPR1, se requieren DPS en la entrada de cada ZPR2.

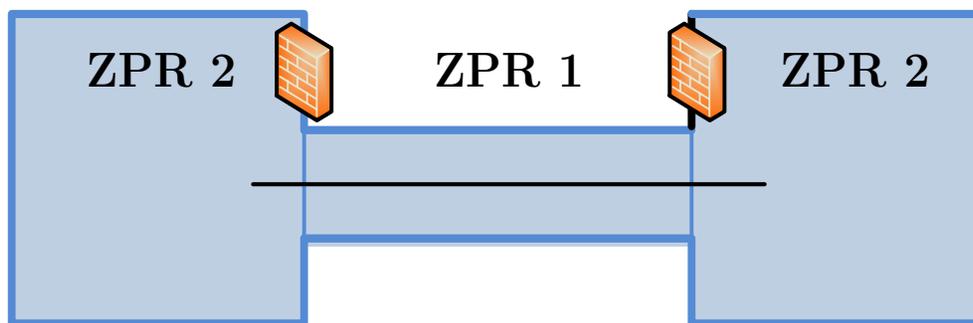


Figura 49. Interconexión de dos ZPR 2 usando cables o ductos portacables blindados.
Fuente: [38]

A sí mismo la Figura 49 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.

³¹ Zona de protección contra rayos. “Lightning Protection Zone” en inglés.

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 50 y la Figura 51, o puede ser usada para reducir el número de DPS requeridos como se muestra en la Figura 52 y Figura 53.

La Figura 50 presenta una estructura alimentada por un transformador de potencia. Si este está ubicado fuera de la estructura, se requiere utilizar un DPS en las líneas de baja tensión que entran por ésta ZPR1.

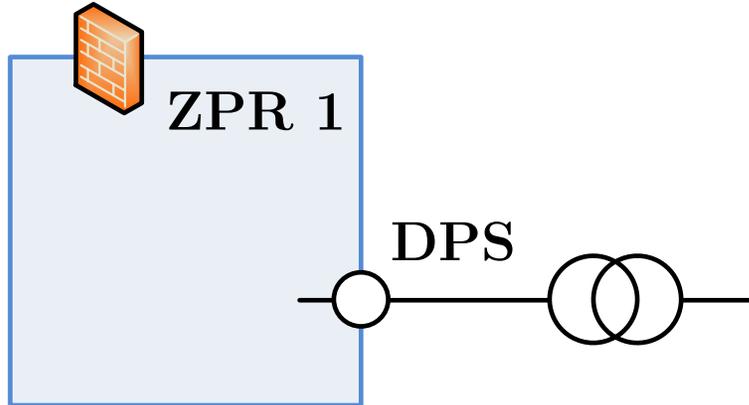


Figura 50. Transformador fuera de la estructura.

Fuente: [38]

Por otra parte, 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 51, en la que el problema de la ubicación del DPS puede ser solucionado mediante la extensión de la ZPR 0 en el interior de la ZPR1, que a su vez requiere DPS para ser instalados solo en el lado de baja tensión. Si el transformador debe ser ubicado dentro de la estructura, al propietario de la estructura generalmente, no se le permite colocar medidas de protección en el lado de alta tensión [38].

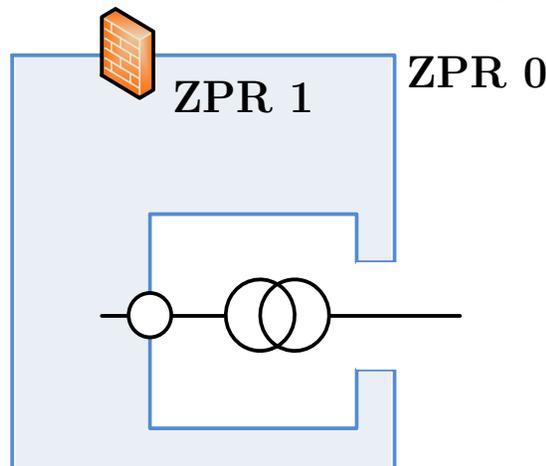


Figura 51. Transformador en el interior de la estructura.

Fuente: [38]

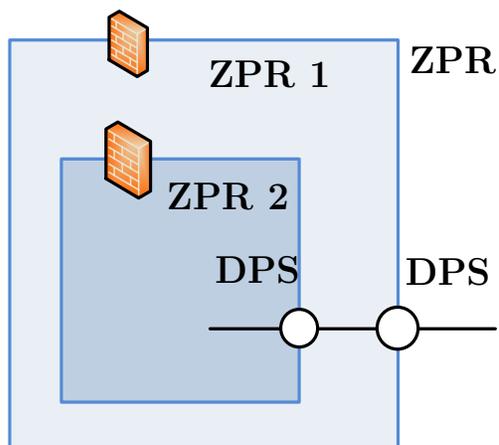


Figura 52. Coordinación de dos DPS (Entre las ZPR 0/1 y Entre la ZPR 1/2).

Fuente: [38]

La Figura 52 presenta una ZPR 2 alimentada por una línea eléctrica o de datos. Ésta línea necesita la coordinación de dos DPS, para disminuir los efectos que se pueden llegar a inducir sobre el tramo del conductor que se encuentra entre éstas dos zonas; uno en la frontera de las ZPR 0/1, y el otro en la frontera de las ZPR 1/2. Por su parte, se evidencia que solo es necesario un DPS entre las ZPR 0/2, puesto que la ZPR2 se extiende en el interior de la ZPR1.

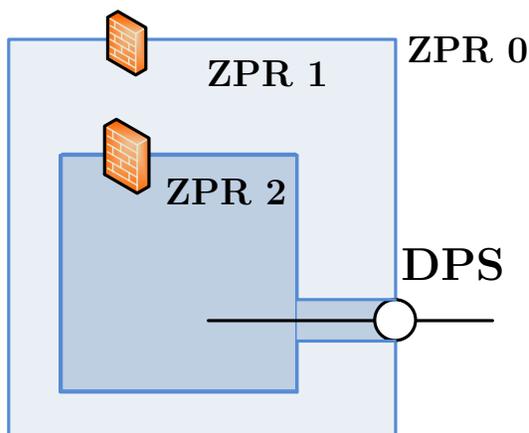


Figura 53. Reducción en el número de DPS

Fuente: [38]

4. Buenas prácticas de ingeniería orientadas a la mitigación de los fenómenos de compatibilidad electromagnética: Protecciones eléctricas (armónicos)

Partiendo de lo expuesto en la sección 2.4 Problemas de compatibilidad electromagnética relacionados con protecciones eléctricas, es evidente que el principal problema inherente a los equipos de protección es el fenómeno de armónicos. A lo largo de este capítulo se abordaran dos estrategias de mitigación enfocadas hacia esta problemática desde la perspectiva de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), a través de las referencias [49], [50], junto con otros artículos y catálogos técnicos de fabricantes de protecciones eléctricas. Por una parte, se aborda como primera práctica la Implementación de filtros (Ver numeral 4.1), en especial de tipo pasivo. Finalmente se propone como segunda práctica la Implementación de dispositivos de desacoplamiento (Ver numeral 4.2)

4.1 Implementación de filtros [49], [50] y [51]

4.1.1 Información general.

Los filtros son utilizados en sistemas eléctricos, señales de telecomunicaciones y sistemas de control cuando los niveles de perturbación no corresponden al nivel de inmunidad de los equipos instalados. Su función general es limitar el ancho de banda permitiendo:

Primero, proteger los equipos electrónicos contra las perturbaciones no deseadas, con frecuencias fuera de la banda de frecuencias de las señales de trabajo, segundo, separar las perturbaciones de modo común de las perturbaciones de modo diferencial y tercero, limitar el ancho de banda de modo diferencial al ancho de banda mínimo para operar.

A su vez pueden tener un doble efecto al proteger el ambiente electromagnético de perturbaciones conducidas generadas dentro de los equipos y también la protección del equipo contra las perturbaciones de tipo externo generadas para el equipo en cuestión. Este doble papel supone que los filtros y otros dispositivos como los DPS son bidireccionales.

4.1.2 Características fundamentales de los filtros.

4.1.2.1 Tipos de filtros

Existen dos tipos de filtros que permiten reducir la contaminación armónica, mitigando problemas de Compatibilidad electromagnética. Por un lado se encuentran los filtros pasivos y por otro los filtros activos. Los primeros están diseñados como 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, es decir que dejan pasar las señales dentro de la banda de paso y atenúan las señales en otras frecuencias.

Por otra parte, 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, en lugar de protección, 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. Este tipo de filtro no es generalmente bidireccional.

4.1.2.2 Atenuación y pérdida de inserción

Los filtros referidos a este ítem son dispositivos de dos puertos lineales, pasivos y variantes en el tiempo. Las pérdidas de atenuación y de inserción se determinan por los valores de los componentes del circuito de filtro. La Figura 54 y Figura 55 muestra las tensiones de circuito (U^* , U) y corrientes (I^* , I) antes y después de implementar el filtro, respectivamente. La atenuación y las pérdidas de inserción dependen tanto de la impedancia de la fuente Z_s como de la impedancia de carga Z_L .

La pérdida de inserción (I) se refiere a una condición de prueba que se especifica como se muestra en las Figura 54 y Figura 55; se define como la relación de la tensión de carga antes y después de la inserción del filtro:

$$I = \frac{U^*}{U} \text{ o } I = 20 \log \left(\frac{U^*}{U} \right) \text{ (dB)}$$

Ecuación 4-1

El Comité Internacional Especial de Perturbaciones Radioeléctricas (CISPR 17) recomienda la elección de Z_S y $Z_L = 50 \Omega$.

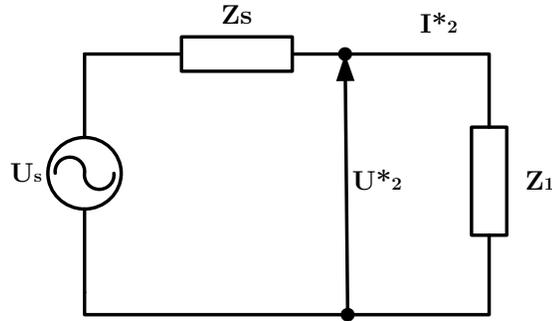


Figura 54. Parámetros de atenuación y pérdidas de inserción antes de la implementación

Fuente: [49]

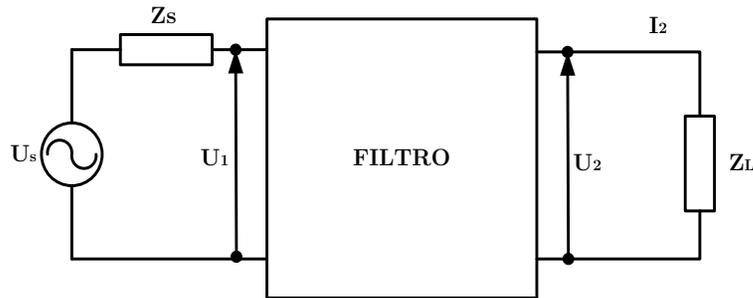


Figura 55. Parámetros de atenuación y pérdidas de inserción después de implementado

Fuente: [49]

La atenuación puede hacer referencia a cantidades diferentes, tales como U_s/U_2 atenuación de absorción o atenuación total, que depende de las características de la fuente y las impedancias de la carga. Es común caracterizar un filtro, ya sea con su pérdida de inserción o su atenuación total. Muy a menudo, los filtros se eligen de acuerdo con su pérdida de inserción (en un sistema de 50Ω), donde $Z_L = Z_s = 50 \Omega$. En este caso especial, las pérdidas de inserción son iguales a la atenuación total. Sin embargo, la pérdida de inserción y atenuación total dependen tanto de la impedancia de la fuente Z_s , como la impedancia de carga Z_L . En el caso donde las impedancia de las carga y de la fuente del sistema no correspondan a 50Ω , no será válida esta apreciación para comparar o seleccionar los filtros por su pérdida de inserción. Esto sucede a menudo cuando el origen de la carga es reactivo. Por otra parte, es muy importante que se conozca la impedancia (que se supone lineal), de la fuente de señal, del filtro y del receptor protegido por el filtro sobre un amplio rango de frecuencias, adaptado a todas las posibles perturbaciones, más que a la banda de frecuencias para las señales solamente. La impedancia a una baja tensión de alimentación asume una amplia gama de valores, especialmente en la gama de frecuencias de 9 kHz a varias decenas de MHz. Estas impedancias también pueden cambiar con el tiempo. La pérdida de inserción o atenuación como se definió anteriormente es por lo tanto de poca ayuda en la caracterización de un filtro en una línea de potencia. De hecho, un diseño conservador

sólo debe contemplar el peor comportamiento posible de un filtro en una línea de potencia cuando la impedancia de la red asume cualquier valor aleatorio.

Finalmente hay que tener en cuenta que estos filtros de supresión de interferencias pueden llegar a su nivel más alto dentro de la banda de atenuación cuando la impedancia de este coincide con la impedancia de la fuente de la perturbación, el aparato víctima o de la línea. El más simple filtro pasa-bajo es un condensador conectado en derivación. En el caso de una fuente de baja impedancia, el más simple filtro pasa-bajo es una inductancia de supresión conectada en serie.

4.1.2.3 Configuraciones básicas de filtros

Dependiendo de la aplicación, los filtros pueden ser diseñados mediante circuitos RL, RC y RLC en varias combinaciones. En la forma más elemental, el filtrado puede obtenerse a través de una inductancia conectada en serie (como una perla de ferrita o núcleo enhebrado en un cable teniendo en cuenta los efectos de saturación), o un condensador conectado derivación o shunt. La selección de un tipo de filtro específico dependerá del rendimiento requerido de las aplicaciones y el costo. Los filtros pasivos utilizan características de resonancia de serie y combinaciones paralelas de inductancia y capacitancia. La reactancia resultante reduce las perturbaciones mediante la introducción de una alta impedancia en serie con las corrientes de perturbación y/o por derivación de estas corrientes a tierra a través de una impedancia baja:

- ◆ Filtro de pasa-bajas (Low-pass filter): permite el paso de bajas frecuencias, atenúa las frecuencias altas.
- ◆ Filtro de pasa-altas (High-pass filter): permite el paso de las frecuencias altas, atenúa las frecuencias bajas.
- ◆ Filtro de pasa-banda (Bandpass filter): pasa de un rango específico de frecuencias pasa-bandas, atenúa las señales con frecuencias fuera de la banda de paso.
- ◆ Filtro parada de banda (Stop-band filter): atenúa un rango específico de frecuencias dentro de la parada de banda, pasa frecuencias fuera de esta.

4.1.2.4 Funciones principales de los filtros

Entre las funciones principales de los filtros se encuentran:

- ◆ Prevención de la interferencia en aparatos instalados, mediante la limitación de las perturbaciones entrantes en los circuitos de potencia, de control y la comunicación (Figura 56)
- ◆ Reducción del ruido electromagnético de salida en las redes de potencia y en el medio mediante la limitación de emisiones de perturbaciones conducidas sobre los cables o radiadas sobre los equipos (Figura 57);
- ◆ Prevenir la interferencia electromagnética entre componentes del equipo o dentro del propio equipo;

- ◆ Proporcionar una ruta para la corriente en modo común (no sólo a frecuencias dentro la banda de paso del filtro).

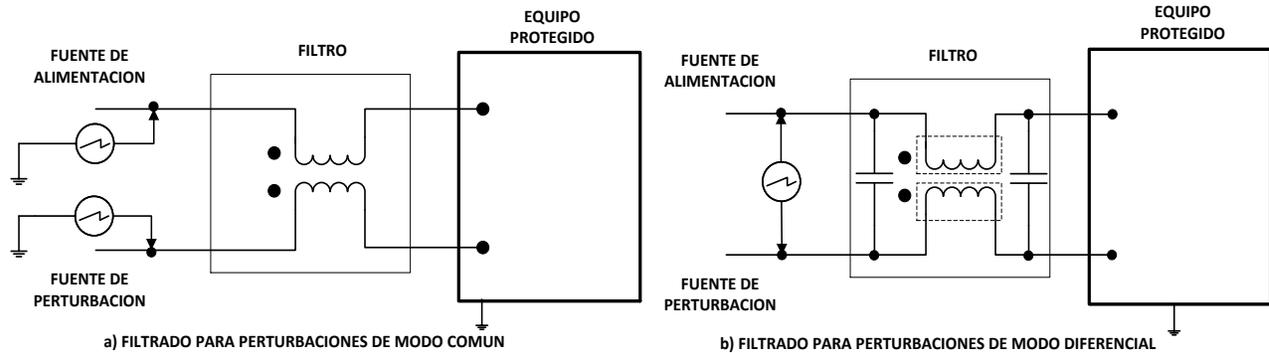


Figura 56. Prevención de la interferencia sobre los equipos instalados

Fuente: [49]

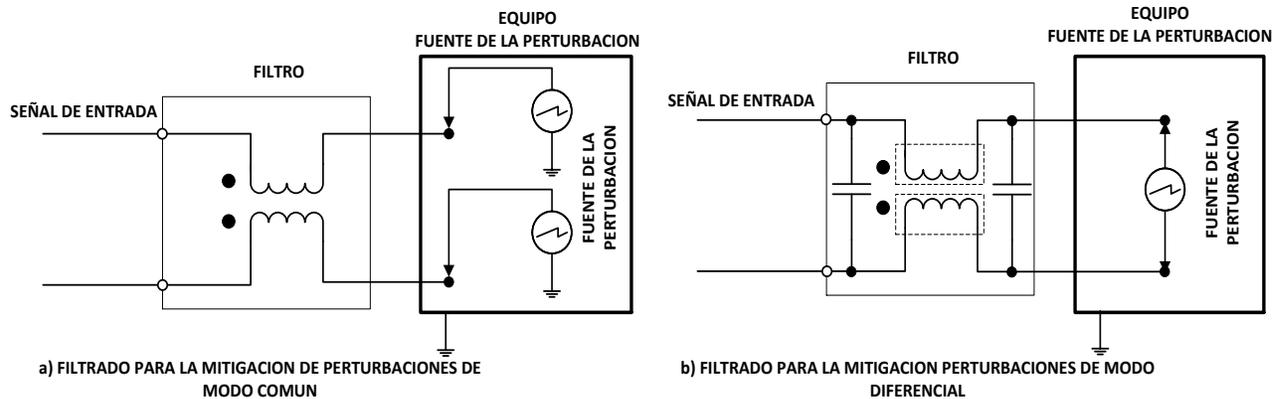


Figura 57. Reducción de las perturbaciones en la red de distribución y el medio

Fuente: [49]

Las Figura 56 y Figura 57 muestran las tareas funcionales de filtros con referencia a las perturbaciones que aparecen en modo común y en modo diferencial. Generalmente, estos dos tipos de perturbaciones están presentes al mismo tiempo, y el mismo dispositivo de filtrado podría limitar ambos tipos de perturbaciones.

4.1.3 Aspectos importantes para la selección y dimensionamiento de filtros.

Existen variedad de filtros disponibles con diversas características y precios. En este sentido un filtro de bajo costo, no siempre es la mejor solución, puesto que a pesar de tener un buen precio, pudiera ser el menos eficaz a la hora de mitigar las posibles perturbaciones de la instalación. Siempre se debe optar por un filtro con un margen suficiente de mitigación, con el que se tengan más opciones a un menor costo.

De igual forma, en todas las instalaciones eléctricas es deseable que los equipos a ser instalados tengan un alto nivel de compatibilidad ante perturbaciones, incluidos aquellos clasificados como sensibles, de forma que no se haga necesario incurrir en costos adicionales por concepto de filtros u otros medios de mitigación. Sin embargo, cuando se hace necesaria una acción extra, los filtros se deben aplicar de acuerdo con los principios y directrices, a fin de asegurar una adecuada mitigación de las perturbaciones. Los principios y directrices son (Ver Figura 58):

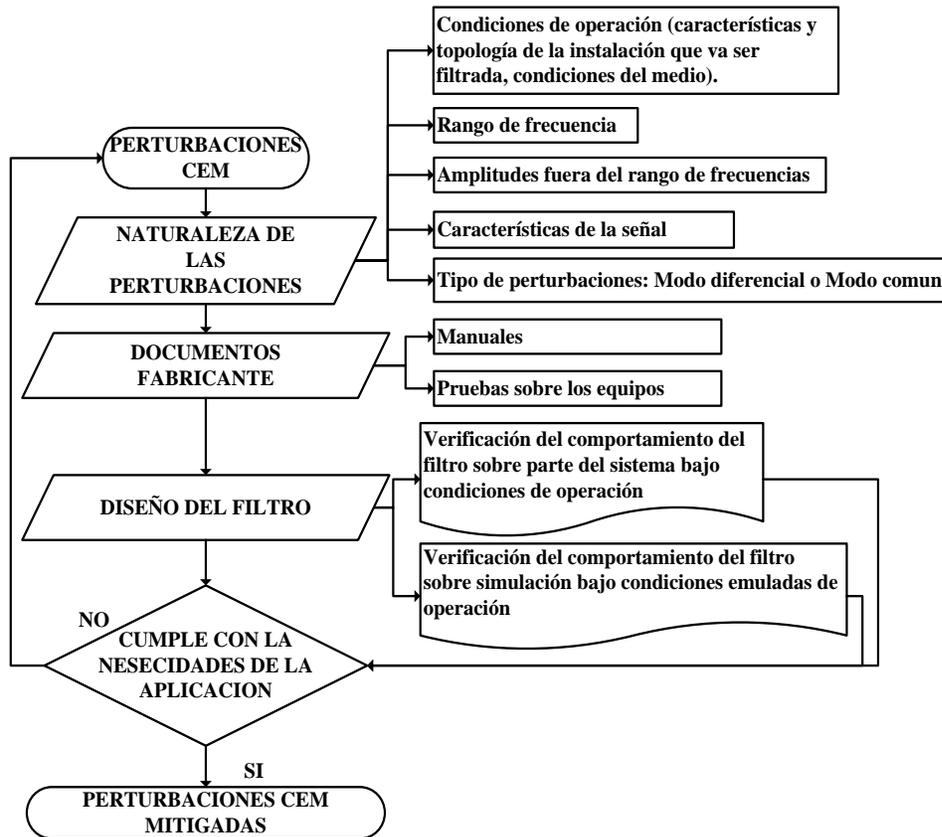


Figura 58. Procedimiento básico para la selección de filtros.

Fuente:Autores

4.1.3.1 Estudios previos

Estos estudios generalmente corresponden a:

- ◆ Análisis detallado sobre las características de las fuentes de perturbación (de tipo continuo o transitorio, rango de frecuencia, etc.)
- ◆ Estudio de los tipos de perturbaciones (en modo común, modo diferencial, de tipo mixto)
- ◆ Informes acerca de la atenuación necesaria (valor relacionado con la gama de frecuencias)

- ◆ Condiciones de aplicación (características y la topología de aislamiento del circuito que va ser filtrado, las condiciones ambientales, etc.)
- ◆ Aspectos de seguridad de la instalación.

4.1.3.2 Aspectos técnicos

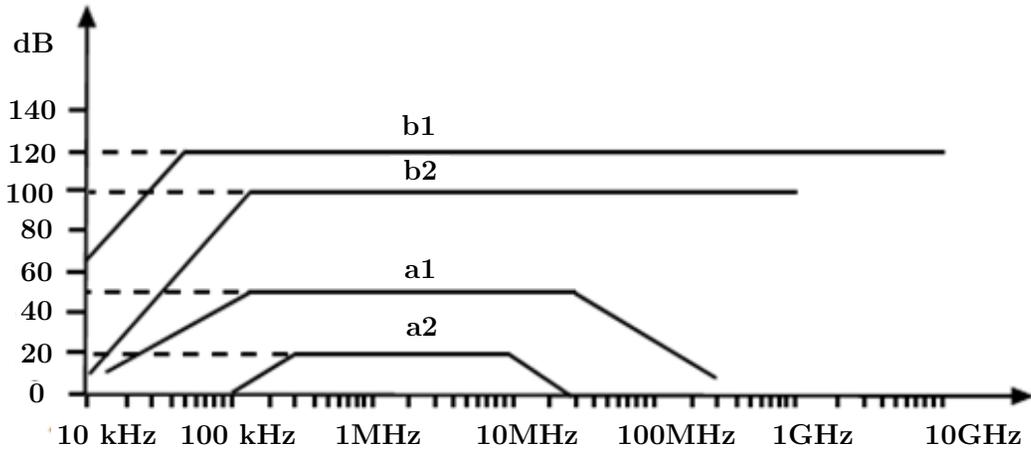
Algunos filtros específicos atenúan de mejor manera los efectos de la CEM, y se caracterizan por estar sometidos a potencias mucho mayores que los filtros convencionales, dado que por ejemplo, las líneas de energía tienen filtros más grandes en tamaño y potencia, pudiendo ser la causante de una respuesta no lineal como resultado de la saturación.

Por otro lado, en algunos casos el espectro de energía de la perturbación es mucho más amplio que el espectro de energía de la señal de potencia, o de control. Debiéndose hacer un filtrado en varias etapas, cada una adaptada a una banda diferente. Por su parte, el diseño de filtros de comunicaciones está basado en la adaptación de impedancias, la cual permite la selectividad de frecuencias. En las líneas de energía, en particular, esto no es posible, dado que las líneas eléctricas están diseñadas para ser eficaces únicamente en la frecuencia de alimentación. Por lo tanto, al no coincidir las impedancias puede desencadenar una reducción drástica de la eficiencia del filtro o de lo que se espera del mismo, dando lugar a fenómenos como el ringing (Oscilaciones indeseadas de la señal). Entre los principales aspectos técnicos se encuentran:

- ◆ Tensión nominal: En el mercado se encuentran disponibles una amplia variedad de filtros para tensiones diferentes a la tensión nominal de alimentación, tales como 125 V, 250 V, 380 V o 440 V, así como en el mercado de los circuitos telefónicos, circuitos analógicos y digitales, líneas de control, líneas coaxiales, etc. Algunos fabricantes también suelen especificar condiciones permisibles de sobretensión para un período de tiempo limitado.
- ◆ Rango de corriente: Para el caso de líneas de alimentación, se dispone de una amplia oferta de filtros, con una amplia gama de valores de corriente, para diferentes aplicaciones. Por ejemplo filtrado de equipos, filtrado de habitaciones y armarios blindados, protección de la red eléctrica de la instalación, etc. Así mismo, los valores de corriente nominal de uso frecuente son: 1 A, 2 A, 4 A, 6 A, 10 A, 30 A, 100 A, aunque no se descartan otros valores. Para el caso de filtros para aplicaciones en las líneas de telecomunicaciones y control generalmente se diseñan filtros con un rango de corriente de cientos de mA.
- ◆ Ciclo de trabajo y condiciones de sobrecarga de operación: Estas características se aplican principalmente a los filtros de potencia y con un funcionamiento intermitente, debido a sobrecarga y las posibles condiciones de falla en el sistema eléctrico. Las condiciones de sobrecarga son definidas por algunos fabricantes como el exceso de

corriente relacionada con una duración especificada, por ejemplo 10 veces la corriente nominal durante 1s, 5 veces la corriente nominal durante 5s, y así sucesivamente.

- ◆ Caída de tensión y la pérdida de señal: Los filtros de líneas de alimentación se caracterizan por una caída de tensión en función de la condición de carga. En corriente nominal esta caída de tensión es generalmente del orden de 1% de la tensión nominal o menos. La caída de tensión del filtro hace referencia a la corriente nominal y potencia de alimentación, e incluye la caída a través de las líneas del circuito de alimentación. Algunos filtros para líneas de telecomunicaciones y control pueden producir pérdidas de señal. Para valores por debajo de 1 dB, se requiere de una condición de línea de terminación es decir una impedancia adecuada, por lo general es especificada por los fabricantes en el ancho de banda de la señal.
- ◆ Rango de temperatura ambiente: Varias categorías de temperatura se definen en la referencia [52]. Con frecuencia los fabricantes especifican un rango de temperatura de trabajo entre -25 C° a 85 C° . Para los filtros en líneas de potencia puede presentarse un aumento de la temperatura en la carcasa debido a su disipación de potencia. Esta temperatura puede estar por ejemplo, hasta en 10 C° . El rango de temperatura, debe tenerse en cuenta en los diseños puesto que esta temperatura puede afectar los componentes adyacentes.
- ◆ Pérdida de inserción y atenuación: La pérdida de inserción y la atenuación de las perturbaciones de modo común (línea-a-tierra) y de modo diferencial (línea a línea), son dependientes de la frecuencia y las condiciones de funcionamiento. Los filtros disponibles en el mercado, presentan una amplia gama de prestaciones y aplicaciones. Los filtros de aplicación general proporcionan un rendimiento limitado, por ejemplo en el orden de 20 dB a 50 dB para las perturbaciones de modo común y modo diferencial en el rango de frecuencia 0,1 MHz a 100 MHz.



- ◆ a1, a2: Filtros de bajo costo para aplicaciones generales
- ◆ b1, b2: Filtros de bajo costo para aplicaciones generales

Figura 59. Ejemplos de pérdidas de inserción características en filtros de potencia a.c/d.c

Fuente: [49]

En la Figura 59, se puede presentar niveles más altos de pérdidas de inserción en filtros para habitaciones y armarios blindados, y con un rendimiento de 80 dB a 120 dB en el rango de frecuencia de algunas decenas o cientos de kHz a 1 GHz o más. Los filtros son diseñados con una pérdida de inserción típica y se mide con la entrada y la salida para una impedancia de 50 Ω . En este caso, la pérdida de inserción del filtro puede ser desde 80 dB a 120 dB. Sin embargo, en la instalación real de la impedancia de la línea puede desviarse 50 Ω con una degradación acompañada en las pérdidas de inserción especificadas.

- ◆ Tensión admisible: Los filtros deben ser seleccionados con una tensión soportable que le corresponda a las características de la línea. Los filtros para líneas de potencia se caracterizan generalmente por diferentes valores de tensión soportable de línea a línea y de línea a tierra, dc o ac. Estos valores se encuentran a partir del 1000 Vdc y son generalmente especificados por el fabricante. Prueba de tensión en filtros de líneas de energía con perturbaciones HF son presentados en la referencia [52]. Por ejemplo, para los filtros de línea de potencia con una tensión nominal de 125 V o más, se recomienda un aislamiento de tierra de 2000 V (DPS) o más; en cambio para filtros de telecomunicaciones o de la línea de control por lo general presentan menores tensiones soportables. Cuando el filtrado de potencia o de señales es afectado por sobretensiones transitorias, se debe prestar atención a la capacidad de soportabilidad en modo común y modo diferencial. La implementación de descargadores de sobretensión puede ser necesario para proteger el filtro y la línea.
- ◆ Atenuación de perturbaciones transitorias de alta frecuencia: La atenuación de perturbaciones transitorias (sobretensiones, transitorios oscilatorios amortiguado,

transitorios rápidos, etc.), dependen de: su contenido de frecuencia, la impedancia equivalente de la línea en la frecuencia de interés y la impedancia de la carga. La atenuación de sobretensiones de alta energía, incluyendo sobretensiones unidireccionales, es generalmente baja o insignificante. Es mucho mejor la atenuación de los transitorios rápidos u oscilaciones en el rango de los MHz, generalmente del orden de unas pocas decenas de dB. Estos niveles de atenuación generalmente no están especificados por los fabricantes de filtros. Para poder filtrar líneas de señales sometidas a sobretensiones de alta energía, se utilizan a menudo filtros específicos con dispositivos internos para la supresión de transitorios. También se utilizan filtros estándar complementados con equipos de protección contra sobretensiones adecuada.

- ◆ Corriente de fuga de conductor de protección de puesta a tierra: Los condensadores en derivación de los filtros de potencia, pueden causar una corriente de fuga en estado estacionario en el conductor de protección puesta a tierra. Esta corriente, junto con la corriente que aporta el aparato protegido, no puede exceder los límites de seguridad establecidas para las diferentes aplicaciones. Por ejemplo, la referencia [53] especifica los límites actuales de los equipos electrodomésticos en el rango de 0,5 mA a 5 mA. Con el fin de permitir la aplicación de las normas de seguridad para los equipos e instalaciones, la corriente de fuga de los diferentes filtros se debe tomar en consideración, de conformidad con los requisitos de instalación eléctrica. Filtros permanentemente conectados a recintos blindados, poseen valores de corriente de fuga del orden de un pequeño porcentaje de la corriente nominal. Estos valores implican una conexión dedicada de baja impedancia a tierra, para evitar tensiones peligrosas.
- ◆ Corriente reactiva admisible: La corriente reactiva de filtros de línea de energía para gabinetes blindados, armarios, redes, etc., pueden ser una parte importante de la corriente nominal. Esta consideración es aplicable especialmente a los filtros que incorporan altos valores de capacitancia, como en el caso de los filtros de las habitaciones y armarios blindados, para lo cual debe ser posible tomar en consideración el desequilibrio de corriente reactiva. La corriente reactiva está relacionada con la tensión de línea y no depende de la condición de carga, sino que debe ser considerada en el diseño de la red de suministro de energía, con especial cuidado para casos especiales, tales como el uso de sistemas de alimentación ininterrumpida.

4.1.3.3 Aspectos económicos

Hay muchas alternativas para la eliminación o mitigación de las perturbaciones. La decisión acerca de la toma de las medidas más razonables debe basarse en la máxima relación de costo-beneficio, teniendo en cuenta que el beneficio, sea lo más adecuado y

eficiente posible. No hay una regla específica, puesto que depende de las circunstancias del sistema en particular de estudio y su ambiente electromagnético.

El filtrado es una de estas soluciones y en muchas ocasiones es la más económica. En este orden de ideas los filtros son generalmente el medio preferido para eliminar perturbaciones de modo diferencial. La introducción de un filtro cerca de la fuente puede ahorrar una posible separación del cableado que puede llegar a ser costosa, esto si se refiere a perturbaciones de tipo conducido.

4.1.4 Instalación de filtros

4.1.4.1 Información general.

Una instalación adecuada del filtro es esencial para lograr buenos resultados, puesto que las técnicas de montaje se convierten en críticas a altas frecuencias, una separación en la conexión puede generar capacitancias parasitas y posteriores descargas de corrientes sobre el equipo, al igual que grandes impedancias en las conexiones a alta frecuencia. Con respecto a esto, está disponible una amplia gama de soluciones prácticas para los filtros de potencia, entre las que se encuentran:

- ◆ Integrar en el conector, el porta-fusibles y el interruptor principal, eliminando posibles sobretensiones entre estos.
- ◆ Utilizar cajas metálicas para establecer un blindaje de los circuitos impresos, de forma que se prevengan las tensiones inducidas; la incorporación de conexiones o tornillos con toma a tierra a bordo del montaje, de forma que permitan drenar de manera rápida corrientes parasitas y posteriores sobre tensiones sobre el equipo.
- ◆ Instalar los filtros sobre una placa de metal en gabinetes o cubículos. Se aconseja precaución en la preparación de las superficies antes de la instalación de filtros para la buena conexión eléctrica, equipotencialización y para evitar la corrosión.
- ◆ Ubicar los filtros, particularmente para las perturbaciones de alta frecuencia, lo más cerca posible del aparato que es la fuente o de la víctima, de forma que se pueda minimizar la impedancia de la conexión. Estos pueden ser encerrados una unidad dedicada instalada en su proximidad. La instalación del filtro debe ser coherente con la topología del blindaje de la instalación general

4.1.4.2 Instalación y técnicas de montaje

Si los circuitos del filtro consisten de componentes individuales, tales como condensadores, bobinas y resistencias, se deben considerar las siguientes reglas de instalación:

- ◆ Los componentes deben estar dispuestos a lo largo de una línea, para evitar el acoplamiento capacitivo e inductivo entre los componentes y entre las entradas y salidas del filtro.

- ◆ Los filtros deben estar seleccionados adecuadamente de acuerdo a los criterios de selección planteados en el numeral **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para evitar el acoplamiento entre las entradas y salidas de filtro.
- ◆ Como consideración de seguridad, se deben tener en cuenta condensadores para proporcionar un desacople a tierra. Estos no deben cortocircuitarse cuando están averiados.
- ◆ Los filtros que se van a instalar con un espacio disponible limitado deben ser estar en consonancia con la topología de blindaje existente.
- ◆ La atenuación del filtro en el intervalo de frecuencia del orden de los MHz, siempre está determinada principalmente por los condensadores conectados a tierra. Los cables de conexión de los condensadores debe ser tan cortos como sea posible.
- ◆ En los casos en donde existan componentes metálicos en los filtros se deberán tener superficies que no se corroan con el fin de garantizar una baja resistencia de contacto de la caja con el aparato víctima a lo largo de un extenso período de tiempo.
- ◆ Algunos filtros se utilizan como una combinación de varios filtros para formar uno solo que podría ser sometido a niveles de perturbación diferentes, o pueden estar destinados a aparatos con diferentes niveles de inmunidad. Por lo tanto, estos filtros son diseñados también para diferentes grados de atenuación. Estos filtros debe ser desacoplados uno del otro por medio de blindajes

4.1.4.3 Cableado

La separación física de líneas de entrada y de salida se ve facilitada por la técnica de montaje de los filtros. Las entradas y salidas de estos deben disponerse lo más lejos posible una de la otra. La ubicación de estas, no puede estar en el mismo lugar. Pueden ser utilizadas conexiones mediante cables coaxiales con conexiones roscadas y accesorios (coaxial screw-type connections) para las entradas y salidas del mismo.

El montaje de un filtro a menudo es más importante que el tipo de filtro, un buen o mal montaje producirá un buen o mal filtrado. Es por esto que la impedancia de la conexión a tierra debe ser tan baja como sea posible para evitar la generación de nuevas perturbaciones que de otro modo se aplican en modo común para el aparato a ser protegido. (Figura 60 y la Figura 61)

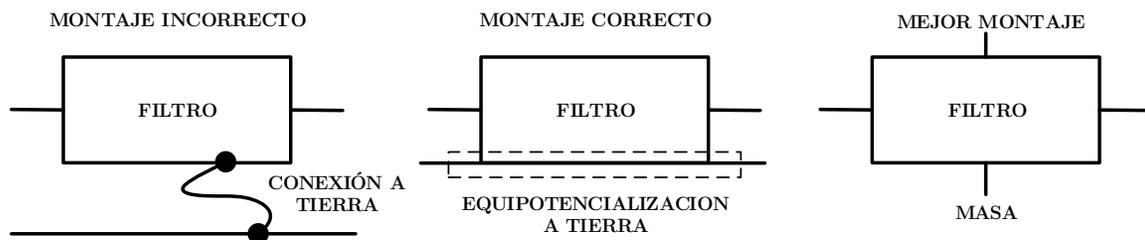


Figura 60. Montaje de filtros

Fuente: [49]

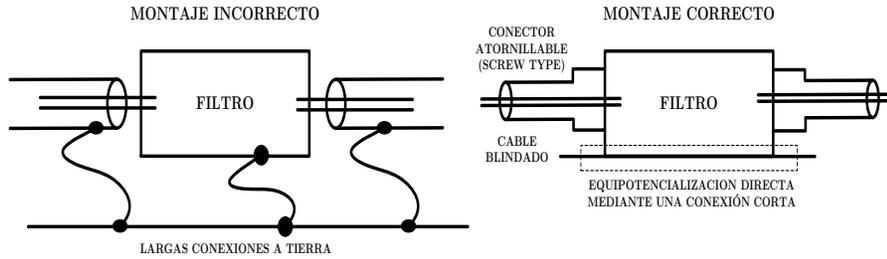


Figura 61. Conexión de cables blindados

Fuente: [49]

4.1.4.4 Instalación de filtros en gabinetes

Cuando una instalación incluye el suministro de armarios o cabinas, en las que se tienen varios aparatos individuales, pasan a ser responsabilidad del instalador, en contraste cuando la situación en la que el fabricante suministra el gabinete completo. En estas ocasiones puede existir la necesidad del uso de filtros en las zonas de cableado de la instalación del gabinete o armario. La Figura 62 ilustra la integración de filtros dentro de un cubículo, mientras la Figura 63 muestra una disposición con una unidad independiente para un filtro instalado adyacente a un armario para equipo.

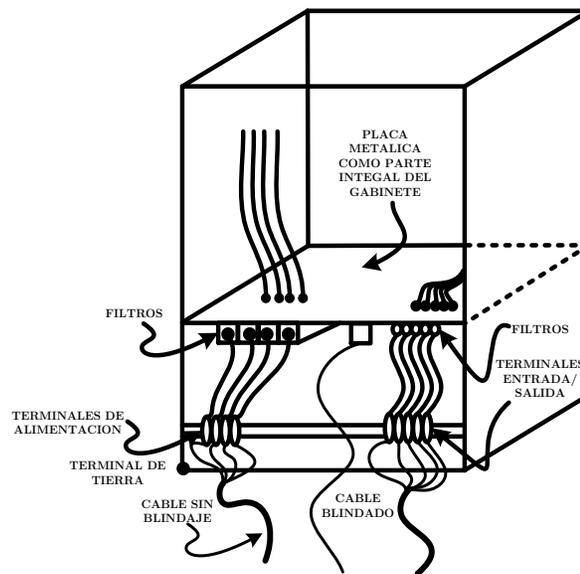


Figura 62. Ejemplo de integración de filtros sobre equipos en gabinetes

Fuente: [49]

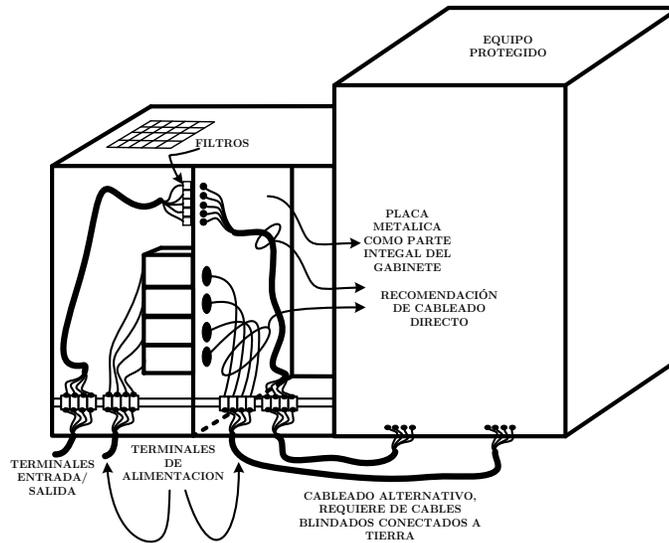


Figura 63. Ejemplo de filtro montado en una unidad dedicada

Fuente: [49]

4.1.5 Pruebas básicas en filtros

4.1.5.1 Consideraciones generales

En esta sección se examinan los procedimientos de prueba para las instalaciones que incluyen filtros, pero no se contemplan pruebas asociadas con la recepción o la verificación del rendimiento de los mismos como componentes desagregados. En consecuencia, los procedimientos de prueba para los parámetros de tensión y corriente, ciclo de trabajo y condiciones de sobrecarga, caída de tensión (línea de alimentación-filtros), pérdida de señal (filtros de telecomunicaciones y control) y condiciones climáticas, vitales como pre-requisitos para un diseño exitoso del sistema de filtrado, no serán discutidos aquí, puesto que corresponden a pruebas de rutina sobre los equipos en este caso los filtros y no sobre las instalaciones.

Por otra parte, el rendimiento de los filtros también debe ser verificado después de que se instalan en el entorno para el que están destinados. La eficacia de la conexión a tierra debe ser evaluada mediante la medición de ella por una prueba de conducción HF. Así mismo se debe comprobar la correcta instalación y conexión de los filtros en operación, para comprobar la ausencia de cualquier tipo de perturbación. Las pruebas de atenuación de perturbaciones transitorias deberán realizarse sobre los filtros instalados, tal como se describe en 4.1.5.4.

4.1.5.2 Aislamiento a tierra y tensión admisible de los filtros instalados

En caso de una prueba de aislamiento (por ejemplo en el caso de espacios libres reducidos), es aconsejable el procedimiento de ensayo especificado en la referencia [54], orientado a probar la resistencia de aislamiento y rigidez dieléctrica, para los filtros de potencia, filtros de telecomunicaciones y de control. En cuanto a la prueba de

sobretensión 1,2/50 μ s: el generador de prueba y procedimiento de ensayo especificado en la referencia [55], se deben utilizar las impedancias internas apropiadas de forma que se pueda obtener la onda de prueba (1,2/50 μ s a 8/20 μ s) adecuada. Esta prueba debe realizarse bajo condición sin carga, y no debe estar conectado a la fuente de alimentación o fuentes de señal. El generador de prueba por lo tanto, se puede conectar directamente al filtro bajo prueba sin utilizar ningún acoplamiento/desacoplamiento de la red. Los terminales de salida del filtro bajo prueba se deben mantenerse abierto y aislados de la tierra.

No se debe permitir ninguna señal de cortocircuito o descarga, cualquier alteración brusca en la forma de onda observada en el terminal de entrada del filtro debe revisarse. Así mismo durante las pruebas deben tenerse las siguientes reglas de seguridad:

- ◆ Todas las cargas del equipo deben estar desconectadas
- ◆ Todos en el lugar de las pruebas, deben ser advertidos e instruidos acerca de los procedimientos de seguridad
- ◆ Se deben tomar precauciones para que los transitorios no se inyecten accidentalmente en circuitos que no están bajo prueba.

4.1.5.3 Pérdida de inserción

Con respecto a las pruebas relacionadas con las pérdidas de inserción se debe revisar lo descrito en la referencia [56] para un procedimiento detallado de este tipo de pruebas.

4.1.5.4 Atenuación de perturbaciones transitorias de alta frecuencia

Los procedimientos de ensayo que se describen a continuación se aplican a los filtros de potencia, telecomunicaciones y de control. Las condiciones de trabajo deben ser simuladas durante el ensayo. La tensión y la corriente deben ser suministradas al filtro mediante el uso de un circuito auxiliar que incluye la fuente de alimentación y la carga. En un ensayo completo se deben utilizar las siguientes ondas sobre el filtro:

- ◆ Transitorios eléctricos rápidos/ráfagas del generador
- ◆ Generador de onda combinada 1,2/50 a 8/20, con una impedancia interna eficaz de 2 Ω , 12 Ω y 40 Ω
- ◆ Generador de onda de anillo, con impedancia interna eficaz de 12 Ω
- ◆ Generador de onda oscilatoria amortiguada.

Las características y prestaciones de los generadores de las pruebas se especifican en las referencias [57], [55] y [58]. El nivel máximo de la prueba se seleccionará de entre los valores preferidos especificados en las normas, pero nunca debe exceder la tensión admisible o nominal del filtro. Se debe establecer primero, la tensión de prueba en el generador de prueba bajo condiciones sin carga y luego, la tensión de prueba se aplica a los terminales de entrada del filtro bajo prueba y se registra. Durante la prueba, no se debe observar ningún mal funcionamiento del sistema. Se debe registrar alternativamente la tensión residual en los terminales de salida, comprobando la

atenuación del filtro instalado tanto en las condiciones de ensayo en modo común y modo diferencial.

4.2 Implementación de dispositivos de desacoplamiento [49]

4.2.1 Información general.

Los dispositivos de desacoplamiento (Decoupling devices), tienen como función actuar como una interfaz de aislamiento³² entre la red de distribución y las cargas, evitando que las corrientes armónicas provenientes del exterior lleguen finalmente a los equipos sensibles en el interior de dicha instalación. Esto a su vez disminuye la posibilidad de un mal funcionamiento de las protecciones eléctricas y en general, permiten aumentar la compatibilidad electromagnética de la instalación. Esta práctica a menudo presenta buenos resultados cuando el origen de la distorsión armónica es debido a cargas externas a la instalación. Si por el contrario, la contaminación armónica tiene su fuente en los equipos presentes dentro de la instalación, es necesario aplicar otras prácticas que complementen la mitigación, como es el caso de la aplicación de filtros sobre los equipos que producen dichas emisiones.

La aplicación de los dispositivos de desacoplamiento, se enfocará en dos clasificaciones: Por un lado, los dispositivos estáticos y por otro, los dispositivos dinámicos. Los primeros son fabricados a partir de elementos de electrónica de potencia y bancos de baterías, por ejemplo las UPS (Uninterruptible Power Supplies); mientras que los sistemas dinámicos, están constituidos principalmente por aparatos mecánicos, como volantes de inercia, motores y un generador eléctrico, (el caso de una planta de emergencia).

Entre los principales dispositivos de desacoplamiento, se tiene:

- ◆ Transformadores de aislamiento
- ◆ Conjunto motor-generador³³.
- ◆ Moto-generador³⁴.
- ◆ Sistema de alimentación ininterrumpida (UPS).

³² Interfaces de aislamiento “Isolating interfaces” en inglés.

³³ “Motor-Generator Sets” en inglés.

³⁴ “Engine Generators” en inglés.

4.2.2 Aplicación del transformador de aislamiento

4.2.2.1 Mitigación de sobretensiones

Los transformadores de aislamiento son dispositivos útiles para romper la continuidad de un circuito, manteniendo el paso de las señales de modo diferencial (en este caso, "señales" son entendidas como señales de operación normales de comunicación o alimentación CA/CC). Dependiendo de las señales que se pasan a través del mismo, las gamas de frecuencia de paso de banda corresponden a unos pocos kHz. Incluso, en frecuencias más altas (decenas de kHz), algunos transformadores de aislamiento son capaces de dejar pasar una parte sustancial de la tensión diferencial del devanado primario al bobinado secundario.

Un error común es creer que el "aislamiento" de los transformadores permite atenuar todas las sobretensiones transitorias, sin reconocer que en la mayoría de los casos, esta atenuación se limita a las perturbaciones conducidas de modo común.

La Figura 64 ilustra una medición de laboratorio a través de un transformador de propósito general el cual permite el paso de una sobretensión de modo diferencial del devanado primario al devanado secundario sin ningún tipo de atenuación. La atenuación que se debe esperar es la correspondiente a la caída de tensión asociada con la impedancia equivalente en serie del transformador. En algunos casos es incluso peor, cuando algunas configuraciones dan lugar a resonancias que pueden incrementar la tensión a través del secundario.

La Figura 65 muestra cómo un transformador construido con un apantallamiento a través de un inter-devanado puede producir una tensión más alta en el secundario si no se aplica con un desacoplamiento de modo diferencial.

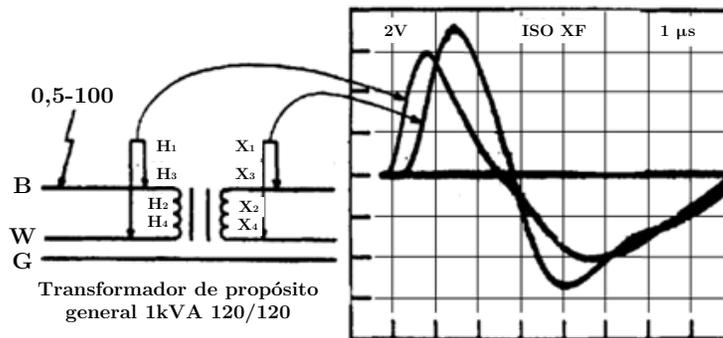


Figura 64. Propagación de una onda de anillo de 0,5 μs a 100 kHz, aplicada en modo diferencial, a través de un transformador de aislamiento ordinario

Fuente: [49]

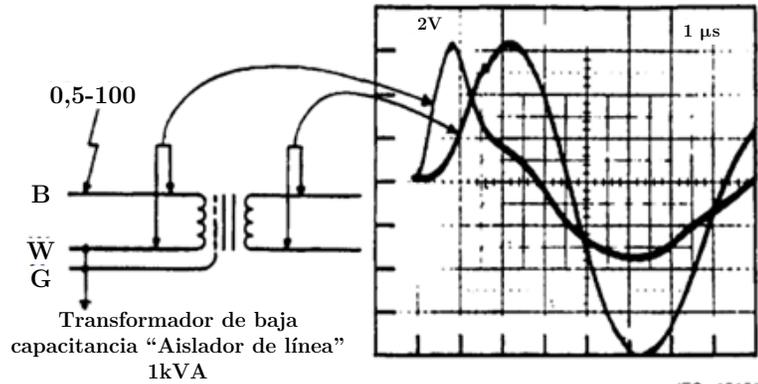


Figura 65. Propagación de una onda de anillo 0,5 μ S a 100 kHz operando en modo diferencial sobre un transformador de aislamiento de línea.

Fuente: [49]

La medición, ilustra el error de todos los transformadores de aislamiento al desacoplar sobretensiones: sólo es cierto para el modo común, y sólo hasta cierta frecuencia por encima de la cual, la capacitancia del devanado llega a ser significativa y degrada el efecto de desacoplamiento. Nótese que en la Figura 64, el secundario no se ha unido al sistema de puesta a tierra, esta disposición es permitida generalmente sólo cuando el transformador es parte de un equipo. Cuando el transformador es parte del cableado, el secundario está generalmente dispuesto por los códigos nacionales, como se muestra en la Figura 65.

El propósito de la aplicación de un transformador de aislamiento por lo tanto, se limita a romper un circuito de modo común en las frecuencias bajas. En este role, el transformador de aislamiento ha encontrado muchas aplicaciones para los circuitos de potencia, así como circuitos de comunicación, especialmente cuando se vinculan los sistemas que no tienen un acuerdo de puesta a tierra común. Por supuesto, el nivel de aislamiento entre el primario y el secundario debe tener en cuenta la magnitud de las sobretensiones que pueden producirse en cada aplicación específica.

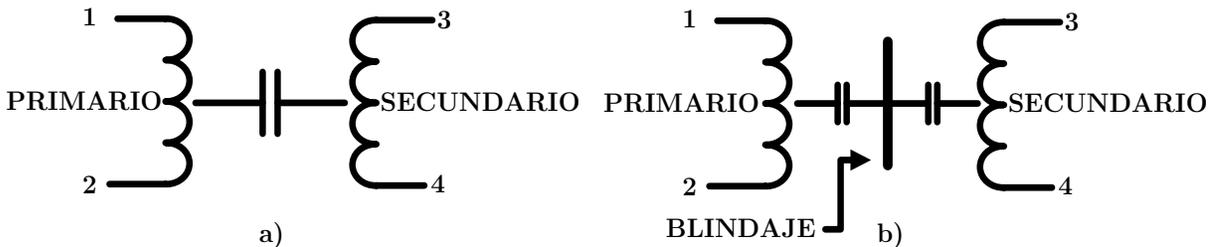


Figura 66. Interdevanado de acoplamiento en un transformador de aislamiento

Fuente: [49]

La capacitancia parásita entre primario y secundario del transformador de aislamiento, se puede reducir mediante la interposición de una pantalla. La corriente a

través de la capacitancia del inter-devanado es a menudo de modo común entre los terminales 1 - 2 y 3 - 4 mostrados en la Figura 66 a.

En la Figura 66 b. se presenta una conexión de apantallamiento, en donde el beneficio principal de este es proporcionar un camino para las corrientes de modo común alrededor de la bobina secundaria.

Además, este camino debería tener una baja impedancia. Por lo tanto, el apantallamiento y también el núcleo del transformador se deben conectar al sistema de puesta a tierra común a través de la conexión más corta, tal como se muestra en Figura 65. Si el sistema de puesta a tierra común no está presente, el apantallamiento y el núcleo deben ser conectados a tierra en el secundario o en el lado de baja tensión (3-4).

Si el transformador contiene más de un apantallamiento, por lo menos uno de estos debe estar conectado como se mencionó anteriormente. Los apantallamientos adicionales, son a menudo diseñados para reducir la alta frecuencia capacitiva en modo diferencial a modo diferencial (DM-DM), cross-talk. La puesta a tierra depende en gran medida de la disposición real y el diseño. El cross-talk inductivo DM-DM (Figura 64 y Figura 65), no puede ser reducido por pantallas adicionales. Para este fin, se utilizan los filtros o DPS. Hay una variedad de dispositivos disponibles para el acondicionamiento de señales de potencia que puede proporcionar diferentes niveles de desacoplamiento. Estos dispositivos se dividen en tres clasificaciones generales:

- ◆ Aislamiento de la línea
- ◆ Regulación de tensión
- ◆ La corrección del factor de potencia.

Muchos de los productos disponibles tienen alguna combinación de más de una de estas tres capacidades.

Los reguladores de tensión de línea pueden tomar una variedad de formas. Por ejemplo, algunos de la más antigua tecnología que utilizan algún tipo de reactor saturable o inductor. Estos dispositivos pueden cambiar la relación de fase de las líneas para ajustar la tensión de salida o ajustar la saturación de los núcleos magnéticos para regular la salida. Los dispositivos que utilizan estas tecnologías no suelen proporcionar un nivel significativo de desacoplamiento y puede generar componentes no lineales.

Otra forma de reguladores de tensión de línea son los que utilizan diversas configuraciones del transformador, por ejemplo, los transformadores ferro-resonantes y transformadores de taps. De estos dispositivos el transformador ferro-resonante proporciona una cierta cantidad de aislamiento en virtud de su principio de funcionamiento inherente. El transformador de tap puede o no, proporcionar el desacoplamiento de línea. Las capacidades de desacoplamiento de ambos tipos de transformadores se pueden mejorar mediante la aplicación de una o más apantallamientos por medio de inter-devanados, filtros y DPS.

Por último, cabe mencionar aquellas familias de reguladores que convierten la corriente alterna entrante en corriente continua y luego reconvierten la corriente continua de nuevo a una corriente alterna. Las tecnologías utilizadas para lograr esto pueden variar. El desacoplamiento proporcionado por esta clase de producto es generalmente muy alto si el dispositivo está correctamente instalado.

4.2.2.2 Filtrado de armónicos triple-n [27].

Por los devanados en delta de los transformadores circulan corrientes armónicas triple-n. Aunque esto es un problema para los fabricantes y diseñadores de transformadores, que deben valorar e incorporar la capacidad para soportar la carga adicional, también es una configuración que trae ciertos beneficios a las redes de suministro, pues su selección y disposición final, permite separar o se filtrar armónicos triple-n de la fuente de alimentación (Ver Figura 67). Adicionalmente, como se menciona en la sección 4.2.2.3, este transformador permite mitigar el ruido de modo común proveniente de las líneas de alimentación.

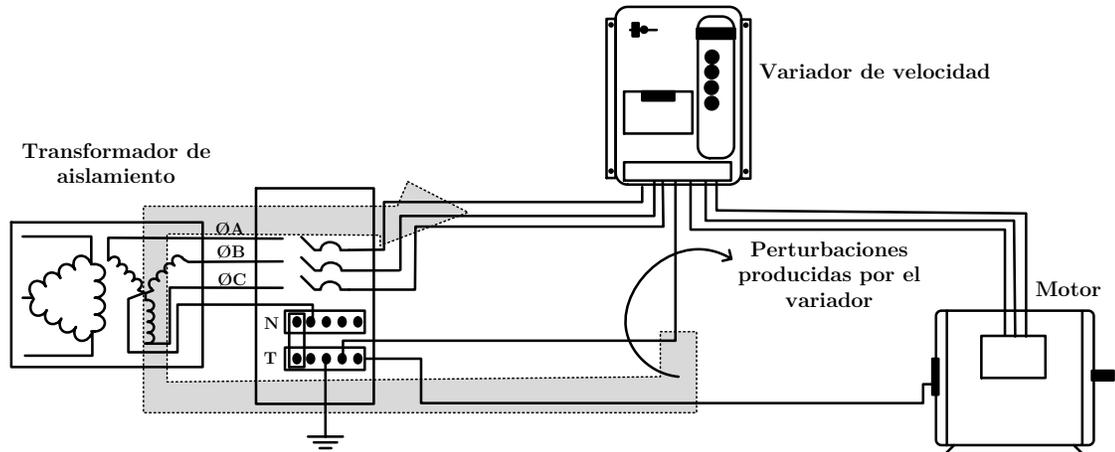


Figura 67. Filtrado de corrientes de tierra inducidas, el ruido de los variadores y armónicos triple n a través de transformadores de aislamiento.

Fuente: [59].

4.2.2.3 Reducción de perturbaciones de modo común en las líneas de alimentación.

Además de capturar los armónicos triples o armónicos triple-n (Ver referencias [27] y [60]), la aplicación de transformadores de aislamiento para crear un sistema derivado es una práctica recomendada para mitigar el ruido de modo común que proviene de las líneas de alimentación (Ver sección 2.1.8) [61]. Como lo indica la Figura 68, la construcción de este transformador incluye un marco cuyo acoplamiento capacitivo con el devanado primario, proporciona una trayectoria para desviar a tierra el ruido de modo común y adicionalmente un apantallamiento electrostático que evita que las corrientes de ruido se transmitan al secundario. Para que esta configuración sea efectiva, la pantalla

y el núcleo del transformador, además de los conductores puestos a tierra, deben estar unidos entre sí en un solo punto.

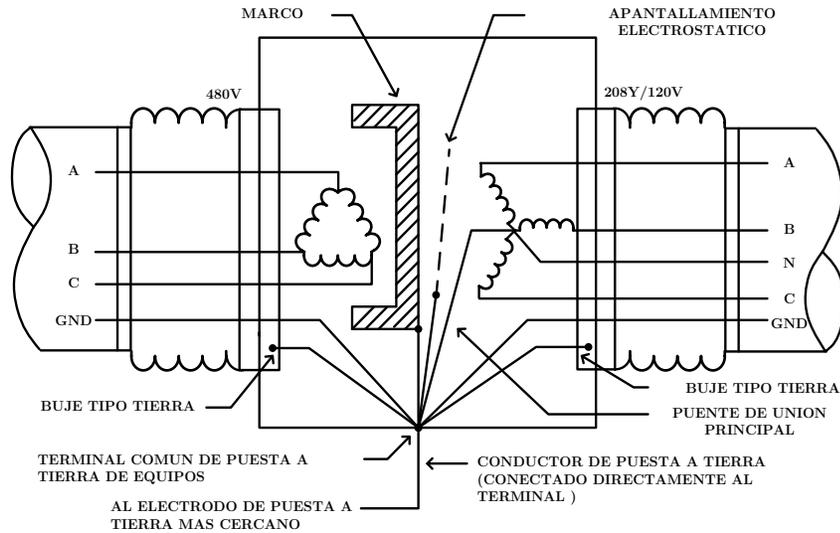


Figura 68. Requerimientos de puesta a tierra de un transformador de aislamiento

Fuente: [10].

4.2.3 Conjunto Moto-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 arreglo mecánico, en el que el motor generalmente de combustión gas o diésel (Grupo electrógeno) o eléctrico, impulsa el generador que a su vez alimenta la carga y por lo tanto, desacopla la conexión eléctrica entre el suministro y la carga. Con frecuencia el grupo electrógeno, se utiliza 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 moto-generador, por ejemplo para el caso de cargas que deben estar todo el tiempo conectadas, como comunicaciones, control y automatización. Si tal transición es deseable, entonces deben tomarse disposiciones para detectar cuando el servicio no es suministrado, de forma que el equipo pueda ponerse en marcha y las cargas cambien o conmuten el suministro. Cabe señalar que los grupos electrógenos requieren de una toma de aire para la combustión del motor y un desfogue de los gases producto de la combustión interna para su buen funcionamiento.

Para garantizar el desacoplamiento eléctrico entre el conjunto moto-generador, es necesario proporcionar un eje no conductor para la unión mecánica de las máquinas. Usualmente el conjunto moto-generador solo puede soportar las cargas durante un tiempo relativamente corto tras la suspensión de la energía de la red. Esto se debe a que en caso de presentarse un corte en la alimentación o un 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 de la señal, y así mismo evitando que los equipos eléctricos y electrónicos dentro de la instalación, no presenten fallas o pérdida de información debido a éstos fenómenos de corta duración, de igual forma para el caso de grupos electrógenos se cuentan con pocas reservas de combustible.

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 a un 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. Una variación podría ser el cambio del motor de corriente alterna por un motor de combustión, en donde la red de suministro correspondería para este caso al gas o diésel para la combustión interna del motor. En la Figura 69 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 70 se muestra un esquema referente a dicha configuración.

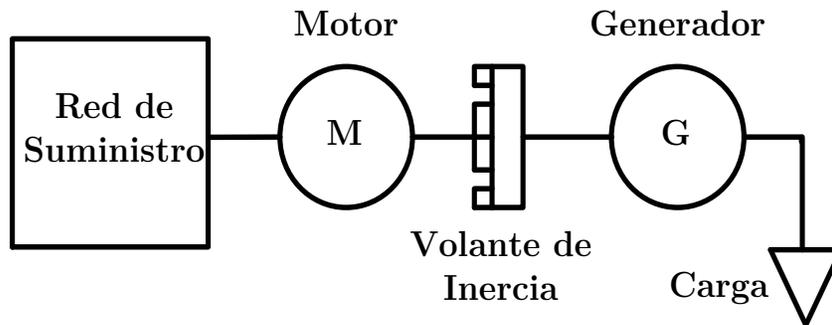


Figura 69. Dispositivo de desacoplamiento dinámico - Configuración básica.

Fuente: [62]

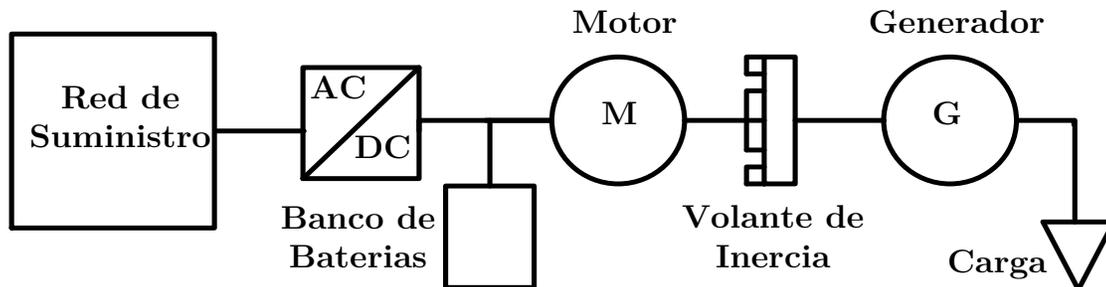


Figura 70. Dispositivo de desacoplamiento dinámico. Configuración con banco de baterías.

Fuente: [62]

4.2.4 Sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI o UPS³⁵)

La UPS, es un dispositivo estático, que usa 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 o 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. En la primera solo se alimenta al carga en condiciones de anormalidad, mientras que en la segunda todo el tiempo se alimenta la carga salvo por falla o mantenimiento de la misma. Estos dispositivos permiten el suministro de energía de la red eléctrica de calidad cuando el suministro no presenta ninguna anormalidad y lo que es más importante, carente de fallos. Es importante resaltar que las SAI's aseguran el suministro única y exclusivamente de los equipos críticos conectados a su salida, no protegiendo al resto de equipos conectados directamente a la red. Su uso a lo largo de los años ha sido muy amplio y extenso, propiciando el desarrollo de diversas topologías, cada una con sus propias características, ventajas e inconvenientes [63].

³⁵ “Uninterruptible Power Supply” en inglés.

5. Buenas prácticas de ingeniería orientadas a la mitigación de los fenómenos de compatibilidad electromagnética: Dimensionamiento de transformadores

A continuación se describe el método de desclasificación de transformadores de tipo seco e inmersos en líquido de acuerdo a lo expuesto por la referencia [12]. Con este procedimiento se evalúa la carga de los mismos al estar sometidos a condiciones armónicas. En el numeral 5.1 se presentan los cálculos para evaluar la capacidad de carga a partir del espectro armónico, mientras que en el ítem 5.2 se exponen los cálculos de la capacidad equivalente del transformador utilizando los datos de las pruebas de rutina.

5.1 Desclasificación: Cálculos para evaluar la capacidad de carga a partir del espectro armónico [12]

5.1.1 Cálculos típicos para transformadores tipo seco

El valor en por unidad de la corriente de carga no sinusoidal que hará que las pérdidas de carga sean iguales al valor de la mayor densidad de pérdidas posibles en condiciones nominales, es decir, el valor de las pérdidas máximo permitido para las cuales el transformador fue diseñado, está dado por la Ecuación 5-1 (Ver ejemplos 5.1.2 y 5.1.3.):

$$I_{\text{máx}}(\text{pu}) = \sqrt{\frac{P_{\text{LL-R}}(\text{pu})}{1 + (F_{\text{HL}} \times P_{\text{EC-R}}(\text{pu}))}} [\text{pu}]$$

Ecuación 5-1

En donde:

$I_{\text{máx}}(\text{pu})$ Es el valor eficaz de la corriente de carga máxima permitida bajo condiciones nominales.

- $P_{LL-R}(pu)$ Son las pérdidas bajo carga en por unidad para condiciones nominales.
 F_{HL} Es el factor armónico de pérdidas para las corrientes de eddy en los devanados.
 $P_{EC-R}(pu)$ Son las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados en por unidad a la corriente y frecuencia nominal.

5.1.2 Ejemplo

Dada una corriente de carga no sinusoidal con la distribución armónica mostrada en la Tabla 5, determinar la máxima corriente de carga no sinusoidal admitida para un transformador IEEE estándar, es decir que cumple con las referencias [31] y [64]. La corriente a plena carga es de 1200 A y las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados bajo condiciones nominales (P_{EC-R}) en el punto de mayor densidad de pérdidas, es el 15% de las pérdidas I^2R .

h	1	5	7	11	13	17	19
$\frac{I_h}{I_1}$	1,00	0,23	0,11	0,042	0,027	0,013	0,008

Tabla 5. Espectro armónico para la corriente de carga máxima para el Ejemplo en 5.1.2.

Fuente: [12]

En dónde:

- h Es el orden del armónico, 1, 2, 3, etc.
 I_h Es el valor eficaz de la corriente del h -ésimo armónico.
 I_1 Es el valor eficaz de la corriente armónica fundamental.

Las pérdidas de carga en por unidad $P_{LL-R}(pu)$ para las condiciones de corriente y frecuencia nominal se calculan de acuerdo con:

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R}(pu)$$

Ecuación 5-2

$P_{OSL-R}(pu)$ Son otras pérdidas por dispersión bajo carga en por unidad para condiciones nominales.

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + 0,15 = 1,15 [pu]$$

El factor armónico de pérdidas para las corrientes de eddy en los devanados (F_{HL}) viene dado por la Ecuación 5-3, cuyos variables se calculan y se tabulan en la Tabla 6. F_{HL} , será igual a la sumatoria de la quinta columna dividida por el resultado de la sumatoria de la tercera columna, así:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2}$$

Ecuación 5-3

$$= \frac{3,324}{1,068} = 3,11$$

h	$\frac{I_h}{I_1}$	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2$	h²	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2 h^2$
1	1,00	1,00	1	1,00
5	0,23	0,053	25	1,32
7	0,11	0,012	49	0,59
11	0,042	0,0018	121	0,21
13	0,027	0,00073	169	0,12
17	0,013	0,00017	289	0,049
19	0,008	0,000064	361	0,023
Σ		1,068		3,324

Tabla 6. Cálculos del factor armónico de pérdidas para el Ejemplo en 5.1.2.

Fuente: [12]

Una vez calculado el factor armónico de pérdidas para las corrientes de eddy en los devanados, se verifica que las pérdidas de carga en por unidad, para la corriente de carga no sinusoidal P_{LL} (pu), sean menores que las pérdidas de carga en por unidad P_{LL-R} (pu) para las condiciones de corriente y frecuencia nominal:

$$P_{LL}(\text{pu}) = I(\text{pu})^2 \times (1 + F_{HL} \times P_{EC-R}(\text{pu}))$$

Ecuación 5-4

$$P_{LL}(\text{pu}) = 1,07 \times (1 + 3,11 \times 0,15) = 1,57 \text{ [pu]}$$

Al realizar la comparación se encuentra que las pérdidas P_{LL} (pu) son mayores que las pérdidas P_{LL-R} (pu). Esto indica que se debe calcular la máxima corriente de carga, para la cual considerando la composición armónica dada, las pérdidas P_{LL} (pu) no superen las pérdidas P_{LL-R} (pu) .

La Ecuación 5-5 permite calcular la corriente máxima deseada, así:

$$I_{\text{máx}}(\text{pu}) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(\text{pu})}{1 + (F_{HL} \times P_{EC-R}(\text{pu}))}}$$

Ecuación 5-5

$$= \sqrt{\frac{1,15}{1 + (3,11 \times 0,15)}} = 0,89[\text{pu}]$$

La corriente máxima de carga no sinusoidal admitida para la composición armónica dada es entonces: $I_{\text{máx}} = 0,89 \times 1200 = 1068 \text{ [A]}$

Por lo tanto, la capacidad de carga del transformador resulta un 89% de su capacidad de corriente sin contenido armónico, o simplemente 1068 A.

5.1.3 Ejemplo

La Tabla 7 muestra la distribución armónica de una corriente de carga con un fuerte contenido en el tercer armónico.

h	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
$\frac{I_h}{I_1}$	0,97	0,37	0,35	0,10	0,028	0,11	0,071	0,026	0,057	0,047

Tabla 7. Distribución armónica para la corriente de carga máxima Ejemplo en 5.1.3.

Fuente: [12]

Dónde:

h Es el orden del armónico, 1, 2, 3, etc.

I_h Es el valor eficaz de la corriente del h-ésimo armónico.

I_1 Es el valor eficaz de la corriente armónica fundamental.

Determinar la corriente de carga máxima admitida por un transformador de 225 kVA, con una corriente de carga nominal en el secundario de 624,5 A y cuyo promedio de pérdidas por corrientes de eddy en los devanados bajo condiciones nominales (P_{EC-R}) en el punto de mayor densidad de pérdidas es el 12% de las pérdidas locales I^2R .

Las pérdidas de carga en por unidad P_{LL-R} (pu) para las condiciones como se muestra a continuación:

$$P_{LL-R}(\text{pu}) = 1 + P_{EC-R}(\text{pu}) + P_{OSL-R}(\text{pu})$$

Ecuación 5-6

$$P_{LL-R}(\text{pu}) = 1 + 0,12 = 1,12 [\text{pu}]$$

El factor armónico de pérdidas para las corrientes de eddy en los devanados (F_{HL}) viene dado por la Ecuación 5-3, cuyas variables fueron calculados y se tabulados en la Tabla 8. F_{HL} será igual a la sumatoria de la quinta columna dividida por el resultado de la sumatoria de la tercera columna, así:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2} = \frac{10,0}{1,23} = 8,13$$

h	$\frac{I_h}{I_1}$	$\left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2$	h²	$\left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2$
1	0,97	0,94	1	0,94
3	0,37	0,14	9	1,3
5	0,35	0,12	25	3,0

7	0,10	0,010	49	0,49
9	0,028	0,00078	81	0,063
11	0,11	0,012	121	1,5
13	0,071	0,0050	169	0,85
15	0,026	0,00068	225	0,15
17	0,057	0,0032	289	0,92
19	0,047	0,0022	361	0,79
Σ		1,23		10,0

Tabla 8. Cálculos del factor armónico de pérdidas para el Ejemplo en 5.1.3.

Fuente: [12]

La densidad de pérdidas para la corriente de carga no sinusoidal según la Ecuación 5-7 como sigue:

$$P_{LL}(\text{pu}) = I(\text{pu})^2 \times (1 + (F_{HL} \times P_{EC-R}(\text{pu})))$$

Ecuación 5-7

$$P_{LL}(\text{pu}) = 1,23 \times (1 + (8,13 \times 0,12)) = 2,43 \text{ [pu]}$$

Dado que las pérdidas $P_{LL}(\text{pu})$ son mayores que las pérdidas $P_{LL-R}(\text{pu})$, se debe calcular la máxima corriente de carga en por unidad admitida, con la composición armónica dada, a partir de la Ecuación 5-8:

$$I_{\text{máx}}(\text{pu}) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(\text{pu})}{1 + (F_{HL} \times P_{EC-R}(\text{pu}))}}$$

Ecuación 5-8

$$= \sqrt{\frac{1,12}{1 + (8,13 \times 0,12)}} = 0,75 \text{ [pu]}$$

Por lo tanto la máxima corriente de carga admitida para la composición armónica dada, se puede calcular:

$$I_{\text{máx}} = 0,75 \times 624 = 468 \text{ [A]}$$

La capacidad de carga del transformador resulta un 75% de su capacidad de corriente sin contenido armónico, o simplemente 468 A.

5.1.4 Cálculos típicos para transformadores inmersos en líquido

Los cálculos para los transformadores inmersos en líquido son similares a los de transformadores tipo seco en cuanto a su formulación, excepto que se debe considerar el efecto de las pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos, etc. Como lo establece la referencia [64], para un transformador autorefrigerado tipo ONAN³⁶, la elevación de temperatura de la capa superior del aceite respecto al ambiente es proporcional a las

³⁶ ONAN: Refrigeración de aceite natural (ON)-Refrigeración de aire natural, Radiadores (AN)

pérdidas armónicas elevadas a la 0,8 potencia y se puede estimar para pérdidas armónicas, tomando como base la carga nominal y las pérdidas nominales, como se muestra en la Ecuación 5-9 y la Ecuación 5-10.

$$\theta_{TO} = \theta_{TO-R} \times \left(\frac{P_{LL} + P_{NL}}{P_{LL-R} + P_{NL}} \right)^{0,8} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Ecuación 5-9

En donde:

- θ_{TO} Es la elevación de temperatura de la capa superior del aceite.
- θ_{TO-R} Es la elevación de temperatura de la capa superior del aceite para las condiciones nominales.
- P_{NL} Son las pérdidas en vacío o ajenas a la carga.
- P_{LL} Las pérdidas bajo carga.
- P_{LL-R} Son las pérdidas bajo carga para las condiciones nominales.

$$P_{LL} = I^2R + (F_{HL} \times P_{EC}) + (F_{HL-STR} \times P_{OSL})$$

Ecuación 5-10

Que corresponde a:

- I^2R Las pérdidas debidas a la corriente de carga y a la resistencia en c.c de los devanados.
- F_{HL} El Factor armónico de pérdidas para las corrientes de eddy en los devanados.
- P_{EC} Las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados.
- F_{HL-STR} El factor armónico para las pérdidas por dispersión.
- P_{OSL} Las otras pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos, etc.

La elevación de temperatura del punto caliente de los devanados también es proporcional a las pérdidas de carga elevadas a la 0,8 potencia y puede ser calculada de acuerdo a la Ecuación 5-11.

Para variables:

- θ_g Es la máxima elevación de temperatura del punto caliente respecto a la capa superior del aceite.
- θ_{g-R} Es la máxima elevación de temperatura del punto caliente respecto a la capa superior del aceite para las condiciones nominales.

$$\theta_g = \theta_{g-R} \times \left(\frac{1 + (F_{HL} \times P_{EC-R}(pu))}{1 + P_{EC-R}(pu)} \right)^{0,8} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Ecuación 5-11

5.1.5 Ejemplo

Se tiene un transformador en aceite diseñado para un contenido armónico específico de corriente, para el cual la elevación media de temperatura de los devanados es 65°C y 80°C en el punto caliente de los devanados [5].

Después de la instalación se midieron las corrientes armónicas reales y estos valores se suministraron al fabricante con el objeto de verificar las elevaciones de temperatura. En condiciones de carga nominal y 60 Hz, las pérdidas medidas y las elevaciones de temperatura fueron las siguientes:

Perdidas nominales	Potencia [W]
Sin carga	4 072
I ² R	27 821
Pérdidas por corrientes de eddy y por dispersión	4 060
Pérdidas totales	35 953

Tabla 9. Pérdidas medidas en condiciones nominales

Fuente: [12]

Elevaciones de T° respecto a la temperatura ambiente	Temperatura [°C]
Elevación media en el lado de alta	48,1
Elevación media en el lado de baja	47,6
Elevación en la capa superior del aceite	47,2
Elevación de la zona caliente de los arrollamientos	55,3

Tabla 10 Elevaciones de temperatura respecto a la temperatura ambiente

Fuente: [12]

La distribución armónica de la carga fue aproximadamente el 100% de la magnitud de la corriente fundamental, se suministra en la Tabla 11.

h	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	23	25
$\frac{I_h}{I_1}$	1,00	0,35	0,17	0,12	0,092	0,071	0,051	0,043	0,040	0,039	0,032	0,029

Tabla 11. Distribución armónica de corriente de carga máxima para el Ejemplo en 5.1.5

Fuente: [12]

Dónde:

h Es el orden del armónico, 1, 2, 3, etc.

I_h Es el valor eficaz de la corriente del h-ésimo armónico.

I₁ Es el valor eficaz de la corriente armónica fundamental.

Los cálculos para determinar el factor armónico de pérdidas para corrientes de eddy y pérdidas por dispersión se muestran en la Tabla 12:

h	$\frac{I_h}{I_1}$	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2$	h²	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2 h^2$	h^{0,8}	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2 h^{0,8}$
1	1	1,00	1	1,00	1,00	1,00
3	0,35	0,12	9	1,08	2,41	0,29
5	0,17	0,029	25	0,73	3,62	0,11
7	0,12	0,014	49	0,69	4,74	0,066
9	0,092	0,0085	81	0,69	5,80	0,049
11	0,071	0,0050	121	0,61	6,81	0,034
13	0,051	0,0026	169	0,44	7,78	0,020
15	0,043	0,0018	225	0,41	8,73	0,016
17	0,04	0,0016	289	0,46	9,65	0,015
19	0,039	0,0015	361	0,54	10,54	0,016
23	0,032	0,0010	529	0,53	12,29	0,012
25	0,029	0,00084	625	0,53	13,13	0,011
Σ		1,19		7,71		1,64

Tabla 12. Cálculos del factor armónico de pérdidas para el Ejemplo en 5.1.5.

Fuente: [12]

El resultado de la sumatoria de la tercera columna es 1,19. La raíz cuadrada de este número es el valor eficaz de la corriente en por unidad es igual a 1,09 (Tabla 12). El factor armónico de pérdidas por corrientes de eddy en los devanados, según la Ecuación 5-12, está dado por la división de la sumatoria de la quinta columna entre la sumatoria de la tercera columna, dando como resultado 6,48.

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2} = \frac{7,71}{1,19} = 6,48$$

Ecuación 5-12

Y la división de la sumatoria de la séptima columna entre la sumatoria de la tercera columna, por la Ecuación 5-13, es el factor armónico para las pérdidas por dispersión igual a 1,38.

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2 h^{0,8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2} = \frac{1,64}{1,19} = 1,38$$

Ecuación 5-13

Una buena aproximación consiste en asumir que las pérdidas por dispersión son aproximadamente el 92% y las pérdidas por corrientes de eddy alrededor del 8%, así:

Perdidas por dispersión	Potencia [W]
Pérdidas de eddy en los devanados	316
Pérdidas por dispersión	3 744
Total pérdidas de eddy y por dispersión	4 060

Tabla 13 Pérdidas por dispersión

Fuente: [12]

Para determinar la elevación de temperatura de la capa superior del aceite, las pérdidas totales se deben corregir teniendo en cuenta el valor eficaz más alto de la corriente por encima de la corriente nominal, y también los efectos del contenido armónico.

$$P_{LL} (pu) = P_{LL-R}(pu) \times (1,09)^2$$

Ecuación 5-14

El cálculo de las pérdidas totales corregidas debido a la carga armónica utilizando la Ecuación 5-14, de donde se muestran los resultados a continuación en la Tabla 14.

La elevación de temperatura de la capa superior del aceite para las condiciones de carga especificadas se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\theta_{TO} = \theta_{TO-R} \times \left(\frac{P_{LL} + P_{NL}}{P_{LL-R} + P_{NL}} \right)^{0,8}$$

Ecuación 5-15

$$= 47,2 \times \left(\frac{45\ 671}{35\ 953} \right)^{0,8} = 57,2 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Tipo de Pérdida	Pérdidas nominales [W]	Pérdidas de carga [W]	Factor armónico	Pérdidas corregidas
P_{NL}	4 072	4 072		4 072
I^2R	27 821	33 034		33 034
P_{EC}	316	375	6,48	2 430
P_{OSL}	3 744	4 446	1,38	6 135
P_T	35 953	41 927		45 671

Tabla 14. Corrección de las pérdidas.

Fuente: [12]

Las pérdidas máximas en por unidad en los devanados ocurrieron en el devanado de alta tensión y se estiman en un promedio del 2% de las pérdidas óhmicas. Suponiendo que las máximas pérdidas por dispersión en los devanados en la zona correspondiente al punto más caliente son cuatro veces el promedio de las pérdidas por corrientes de eddy

en los devanados, estas resultan del 8% (Ver f en el numeral 5.2). La elevación de temperatura del punto más caliente respecto a la temperatura de la capa superior del aceite, puede ser calculada por la Ecuación 5-16:

$$\theta_g = \theta_{g-R} \times \left(\frac{1 + (F_{HL} \times P_{EC-R}(pu))}{1 + P_{EC-R}(pu)} \right)^{0,8}$$

Ecuación 5-16

$$= (55,3 - 47,2) \times \left(\frac{1 + (6,48 \times 0,08)}{1 + 0,08} \right)^{0,8} = 12,2 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

La elevación de temperatura en el punto más caliente del conductor respecto al ambiente es entonces:

$$57,2 + 12,2 = 69,4 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Finalmente, se debe verificar que las temperaturas calculadas (θ_g y θ_{TO}), no excedan los límites térmicos para los cuales el transformador fue diseñado.

5.2 Desclasificación: Cálculo de la capacidad equivalente del transformador utilizando los datos de las pruebas de rutina

Con el fin de realizar cálculos con datos limitados, es necesario hacer ciertas suposiciones que se consideran conservadoras. Estos supuestos pueden modificarse en función de la orientación proporcionada por el fabricante para un transformador en particular, de la siguiente manera [12]:

- a) El certificado de pruebas incluye todos los datos exigidos por las normas indicadas por las referencias [65] o [64].
- b) Una porción de las pérdidas por dispersión, determinada por los factores listados como 1) y 2) de este literal, y que se supone que son pérdidas por corrientes de eddy en los devanados. Esta es una hipótesis conservadora y no se debe utilizar en caso de contar con mejores datos:
 - 1) El 67% de las pérdidas totales por dispersión se supone que son pérdidas por corrientes de eddy en los devanados para los transformadores tipo seco.
 - 2) El 33% de las pérdidas totales por dispersión, se supone que son pérdidas por corrientes de eddy en los devanados para transformadores inmersos en líquido.
- c) Las pérdidas I^2R se supone que se distribuyen uniformemente en cada devanado.
- d) La división de las pérdidas por corrientes de eddy entre los devanados se supone así:

- 3) El 60% en el devanado interior y el 40% en el devanado exterior, para todos los transformadores auto-refrigerados con corriente nominal menor de 1000 A (independientemente de la relación de vueltas).
 - 4) El 60% en el devanado interior y el 40% en el devanado exterior para todos los transformadores que tiene una relación de vueltas de 4:1 o menos.
 - 5) El 70% en el devanado interior y el 30% en el devanado exterior, para todos los transformadores que tiene una relación de vueltas mayor de 4:1 y auto-refrigerados con corriente nominal mayor a 1000 A.
- e) La distribución de pérdidas por corrientes de eddy en los devanados se supone como no uniforme.
- f) Las máximas pérdidas por corrientes de eddy en los devanados, se supone que es en la región del punto más caliente del devanado y es igual al 400% de la densidad de pérdidas por corrientes de eddy en los devanados. Análisis de elementos finitos y datos empíricos indican que pequeñas clasificaciones puede mostrar una distribución uniforme de pérdidas por corrientes de eddy en los devanados [12].

Según lo establecido en las referencias [66] y [64] el componente de pérdidas por dispersión de las pérdidas de carga se calcula restando las pérdidas I^2R del transformador de las pérdidas de carga medidas como se muestra en la Ecuación 5-17³⁷:

$$P_{TSL-R} = P_{LL-R} - K \times [(I_{1-R}^2 \times R_1) + (I_{2-R}^2 \times R_2)] [W]$$

Ecuación 5-17

En donde:

P_{TSL-R} Son las pérdidas totales por dispersión bajo condiciones nominales.

I_{1-R} Es el valor eficaz de la corriente en el lado de alta (HV) bajo condiciones nominales de carga y de frecuencia.

I_{2-R} Es el valor eficaz de la corriente en el lado de baja (LV) bajo condiciones nominales de carga y de frecuencia.

R_1 Es la resistencia dc medida entre los terminales de alta.

R_2 Es la resistencia dc medida entre los terminales de baja.

K Es una constante que depende del número de fases.

1,0 para transformadores monofásicos.

1,5 para transformadores trifásicos.

Teniendo en cuenta el literal b), una porción de las pérdidas por dispersión se toma como pérdidas por corrientes de eddy en los devanados. Para transformadores tipo seco,

³⁷ Muchos informes de pruebas de transformadores trifásicos muestran la resistencia de las tres fases en serie. En estos casos, los valores para R_1 y R_2 se pueden calcular como sigue:

Conexión Delta: R_1 o $R_2 = 2/9$ de la resistencia trifásica.

Conexión Estrella: R_1 o $R_2 = 2/3$ de la resistencia trifásica.

las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados se asumen como se muestra en la Ecuación 5-18:

$$P_{EC-R} = P_{TSL-R} \times 0,67 \text{ [W]}$$

Ecuación 5-18

Para transformadores inmersos en líquido, las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados se asumen como se muestra en la Ecuación 5-19:

$$P_{EC-R} = P_{TSL-R} \times 0,33 \text{ [W]}$$

Ecuación 5-19

Las pérdidas por dispersión en las fijaciones, depósitos, etc. son calculadas como muestra la Ecuación 5-20:

$$P_{OSL-R} = P_{TSL-R} - P_{EC-R} \text{ [W]}$$

Ecuación 5-20

Las pérdidas por dispersión en los devanados de baja tensión se pueden calcular a partir del valor de P_{EC-R} determinado a partir de la Ecuación 5-18 o la Ecuación 5-19, ya sea como $0,6 \times P_{EC-R} \text{ [W]}$ o como $0,7 \times P_{EC-R} \text{ [W]}$ dependiendo del transformador, la relación de vueltas y la corriente nominal. Teniendo en cuenta el supuesto presentado en el literal c), las pérdidas I^2R se suponen que se distribuyen uniformemente dentro de la bobina, y con el inciso e), la máxima densidad de pérdidas por corrientes de eddy se supone que es el 400% del valor medio. Las máximas pérdidas por corrientes de eddy de los devanados en por unidad en términos de las pérdidas por corrientes de eddy y las pérdidas I^2R se pueden obtener utilizando la Ecuación 5-21 o la Ecuación 5-22:

$$\text{Máx } P_{EC-R}(\text{pu}) = \frac{0,6 \times 4 \times P_{EC-R}}{K \times (I_{2-R})^2 \times R_2} \text{ [pu]}$$

Ecuación 5-21

ó

$$\text{Máx } P_{EC-R}(\text{pu}) = \frac{0,7 \times 4 \times P_{EC-R}}{K \times (I_{2-R})^2 \times R_2} \text{ [pu]}$$

Ecuación 5-22

Las pérdidas por dispersión en los devanados de alta tensión pueden ser calculadas de forma similar. Para los transformadores inmersos en líquido, la Ecuación 5-11, se aplica como se muestra en la Ecuación 5-23 y Ecuación 5-24

$$\theta_{g1} = \theta_{g1-R} \times \left(\frac{1 + (2,4 \times F_{HL} \times P_{EC-R}(\text{pu}))}{1 + (2,4 \times P_{EC-R}(\text{pu}))} \right)^{0,8} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Ecuación 5-23

ó

$$\theta_{g1} = \theta_{g1-R} \times \left(\frac{1 + (2,8 \times F_{HL} \times P_{EC-R}(pu))}{1 + (2,8 \times P_{EC-R}(pu))} \right)^{0,8} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Ecuación 5-24

Siendo:

- θ_{g1} La máxima elevación de temperatura del punto más caliente de los devanados de alta tensión respecto a la capa superior del aceite.
- θ_{g1-R} La máxima elevación de temperatura del punto más caliente de los devanados de alta tensión respecto a la capa superior del aceite para condiciones nominales.

5.2.1 Cálculos típicos para transformadores de tipo seco

Los cálculos típicos para transformadores tipo seco se mostrarán a través del ejemplo relacionado a continuación.

5.2.2 Ejemplo

Para una corriente de carga no sinusoidal con una distribución armónica como la mostrada en la Tabla 15.

h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\frac{I_h}{I_1}$	1,00	0,044	0,092	0,022	0,41	0,018	0,20	0,010	0,018	0,015	0,046	0,010	0,048

Tabla 15. Distribución armónica para la corriente de carga máxima para el Ejemplo 5.2.2.

Fuente: [12]

Dónde:

- h Es el orden del armónico, 1, 2, 3, etc.
- I_h Es el valor eficaz de la corriente del h-ésimo armónico.
- I_1 Es el valor eficaz de la corriente armónica fundamental.

Determinar la corriente de carga máxima admitida por un transformador tipo seco, con las siguientes características tomadas del informe de prueba:

- Devanado de alta tensión
13 800 [V] conexión: Δ
Resistencia = 2,0679 [Ω] a 100 [$^\circ\text{C}$]³⁸
- Devanado de baja tensión
480 [V] conexión: Y
Resistencia = 0,000589 [Ω] a 100 [$^\circ\text{C}$]

³⁸ Estas resistencias corresponden a la suma de las tres fases en serie.

- Capacidad nominal
2 500 [kVA] -Trifásico
80°C de elevación
Refrigeración Tipo AA
- Pérdidas en vacío a 100 [°C]
15 723 [W]
- Los valores de R_1 y R_2 se pueden determinar utilizando la nota 37 en 5.2:
 $R_1 = 0,4595 [\Omega]$
 $R_2 = 0,000393[\Omega]$
- Los valores para I_{1-R} e I_{2-R} son calculados a partir de la potencia en kVA y la tensión como sigue:
 $I_{1-R} = 104,6 [A]$
 $I_{2-R} = 3 007 [A]$
- Las pérdidas totales por dispersión bajo condiciones nominales se pueden calcular de la Ecuación 5-17 así:
 $P_{TSL-R} = 15 723 - 1,5 \times [(104,6^2 \times 0,4595) + (3 007^2 \times 0,000393)]$
 $P_{TSL-R} = 15 723 - 1,5 \times [5 027 + 3 554]$
 $P_{TSL-R} = 15 723 - 12 872 = 2 851 [W]$
- Las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados se calculan teniendo en cuenta la suposición b) en 5.2 y la Ecuación 5-18:

$$P_{EC-R} = 2 851 \times 0,67 = 1 910 [W]$$

Dado que la relación de transformación del transformador es mayor que 4:1 y que la corriente secundaria es mayor de 1000 A, las pérdidas por corrientes de eddy en el devanado de baja tensión es 0,7 veces las P_{EC-R} y las $\text{Max } P_{EC-R}$ pueden ser calculadas a partir de la Ecuación 5-22 como sigue:

$$\text{Max } P_{EC-R}(\text{pu}) = \frac{0,7 \times 4 \times 1910}{1,5 \times 3554} = 1,00 [\text{pu}]$$

Como en el ejemplo anterior, los valores para $I_h(\text{pu})^2$, h^2 y $I_h(\text{pu})^2 h^2$ son necesarios para el cálculo de $P_{LL}(\text{pu})$. Estos valores se calculan y se tabulan en la Tabla 16.

En donde la raíz cuadrada de la sumatoria de la tercera columna da como resultado un valor eficaz de corriente de carga igual a 1,11(p.u.). La sumatoria de la quinta

columna dividida por la sumatoria de la tercera columna, da como resultado el factor armónico de pérdidas igual a 6,52.

h	$\frac{I_h}{I_1}$	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2$	h²	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2 h^2$
1	1,00	1,00	1	1,00
2	0,044	0,0019	4	0,0076
3	0,092	0,0085	9	0,077
4	0,022	0,00048	16	0,0077
5	0,41	0,17	25	4,25
6	0,018	0,00032	36	0,012
7	0,2	0,040	49	1,96
8	0,01	0,00010	64	0,0064
9	0,018	0,00032	81	0,026
10	0,015	0,00023	100	0,023
11	0,046	0,0021	121	0,25
12	0,01	0,00010	144	0,014
13	0,048	0,0023	169	0,39
Σ		1,23		8,02

Tabla 16. Cálculos del factor armónico de pérdidas para el Ejemplo 5.2.2.

Fuente: [12]

La densidad de pérdidas locales producidas por la corriente de carga no sinusoidal en la región de mayores pérdidas por corrientes de eddy en los devanados es como sigue:

$$P_{LL}(\text{pu}) = I(\text{pu})^2 \times (1 + (F_{HL} \times P_{EC-R}(\text{pu})))$$

Ecuación 5-25

$$P_{LL}(\text{pu}) = 1,23 \times (1 + (6,52 \times 1,00)) = 9,25 [\text{pu}]$$

Así, el valor RMS de la corriente de carga no sinusoidal máxima admisible con la composición armónica dada, se calcula con la Ecuación 5-8, como sigue:

$$I_{\max}(\text{pu}) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(\text{pu})}{1+(F_{HL} \times P_{EC-R}(\text{pu}))}} = \sqrt{\frac{2,00}{1+(6,52 \times 1,00)}} = 0,52[\text{pu}]$$

En este caso, la capacidad del transformador con la composición armónica de la corriente no sinusoidal dada, es aproximadamente el 52% de su capacidad corriente sinusoidal.

5.2.3 Cálculos típicos para transformadores inmersos en líquido

Los cálculos típicos para transformadores inmersos en líquido se mostrarán a través del ejemplo descrito en el numeral 5.2.4.

5.2.4 Ejemplo

El ejemplo ilustra los cálculos de la elevación de la temperatura para un transformador inmerso en líquido [65], con las siguientes características tomadas del informe de prueba:

- Devanado de alta tensión
34 500 [V] Conexión Delta
Resistencia = 18,207 [Ω] a 75 [$^{\circ}\text{C}$]³⁹
- Devanado de baja tensión
2 400 [V] Conexión Y
Resistencia = 0,02491 [Ω] a 75 [$^{\circ}\text{C}$]⁴⁰
- Capacidad nominal
2 500 [kVA]-Trifásico
55 [$^{\circ}\text{C}$] elevación promedio en los devanados
65 [$^{\circ}\text{C}$] elevación en el punto más caliente
Refrigeración tipo ONAN.
- Pérdidas en vacío
5 100 [W]
- Pérdidas en vacío a 75 [$^{\circ}\text{C}$]
21 941 [W]
- Los valores de R_1 y R_2 se pueden determinar utilizando la nota 37 en 5.2:
 $R_1 = 4,046$ [Ω]
 $R_2 = 0,01661$ [Ω]
- Los valores para I_{1-R} e I_{2-R} calculados a partir de la potencia en kVA y la tensión da como resultado:
 $I_{1-R} = 41,8$ [A]
 $I_{2-R} = 601,4$ [A]
- Las pérdidas totales por dispersión bajo condiciones nominales se puede calcular de la Ecuación 5-17 como sigue:
 $P_{TSL-R} = 21\,941 - 1,5 \times [(41,8)^2 \times 4,046 + (601,4)^2 \times 0,01661]$
 $P_{TSL-R} = 21\,941 - 1,5 \times [7\,069 + 6\,008]$
 $P_{TSL-R} = 21\,941 - 19\,615 = 2\,326$ [W]
- Las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados se calculan teniendo en cuenta la suposición b) en 5.2 y la Ecuación 5-19:
 $P_{EC-R} = 2\,326 \times 0,33 = 767$ [W]
- Por la Ecuación 5-20, las pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos, etc., son los siguientes:

³⁹ Estas resistencias corresponden la suma de las tres fases en serie.

⁴⁰ Estas resistencias corresponden la suma de las tres fases en serie.

$$P_{OSL-R} = 2\,326 - 767 = 1\,559[\text{W}]$$

A partir de los datos de la prueba se pueden obtener las siguientes tablas:

Perdidas medidas	Potencia [W]
Pérdidas sin carga	5 100
Pérdidas I^2R	19 615
Pérdidas por corrientes de eddy en los devanados	2 326
Pérdidas totales	27 041

Tabla 17. Pérdidas medidas Ejemplo 5.2.4

Fuente: [12]

Elevaciones de temperatura por encima de la temperatura ambiente	Temperatura [°C]
Elevación promedio en AT y BT	55
Elevación de la capa superior del aceite	55
Elevación en el punto más caliente del conductor	65

Tabla 18. Elevaciones de temperatura para el Ejemplo 5.2.4

Fuente: [12]

Perdidas por corrientes de eddy y por dispersión	Potencia [W]
Pérdidas por corrientes de eddy en los devanados	767
Pérdidas por dispersión	1 559
Pérdidas totales	2 326

Tabla 19. Pérdidas por corrientes de eddy y por dispersión para el Ejemplo 5.2.4

Fuente: [12]

La distribución armónica se determinó para una carga que era aproximadamente el 75% de la magnitud de la corriente fundamental. La distribución, normalizada a la fundamental se muestra en la Tabla 20

h	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
$\frac{I_h}{I_1}$	1,00	0,45	0,27	0,19	0,092	0,071	0,051	0,043	0,040	0,039

Tabla 20. Distribución armónica para corriente de carga máxima para el Ejemplo 5.2.4.

Fuente: [12]

Dónde:

h Es el orden del armónico, 1, 2, 3, etc.

I_h Es el valor eficaz de la corriente del h-ésimo armónico.

I_1 Es el valor eficaz de la corriente armónica fundamental.

Los cálculos para determinar el factor armónico de pérdidas y las pérdidas por dispersión se tabulan en la Tabla 21.

h	$\frac{I_h}{I_1}$	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2$	h²	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2 h^2$	h^{0,8}	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2 h^{0,8}$
1	1,00	1,00	1	1,00	1,00	1,00
3	0,45	0,20	9	1,80	2,41	0,48
5	0,27	0,073	25	1,83	3,62	0,26
7	0,19	0,036	49	1,76	4,74	0,17
9	0,092	0,0085	81	0,69	5,80	0,049
11	0,071	0,0050	121	0,61	6,81	0,034
13	0,051	0,0026	169	0,44	7,78	0,020
15	0,043	0,0018	225	0,41	8,73	0,016
17	0,040	0,0016	289	0,46	9,65	0,015
19	0,039	0,0015	361	0,54	10,54	0,016
Σ		1,33		9,54		2,06

Tabla 21. Cálculos del factor armónico de pérdidas para el Ejemplo en 5.2.4.

Fuente: [12]

La suma de la tercera columna es 1,33. La raíz cuadrada de esto resulta un valor eficaz de corriente de carga igual a 1,15 (p.u.). La sumatoria de la quinta columna dividida por la sumatoria de la tercera columna, da como resultado un factor armónico de pérdidas (para las pérdidas por corrientes eddy en los devanados) igual a 7,17. La sumatoria de la séptima columna dividida por la sumatoria de la tercera columna da como resultado un factor armónico de pérdidas por dispersión igual a 1,55. (Estos valores aparecen relacionados en la Tabla 22. Corrección de las pérdidas.)

Con el propósito de determinar la elevación de temperatura de la capa superior del aceite, las pérdidas totales se deben corregir para reflejar la menor corriente eficaz por debajo de la corriente nominal y también los efectos del contenido armónico. Se considera el 75% de la corriente de carga para determinar las pérdidas bajo las condiciones especificadas:

$$P_{LL} \text{ (pu)} = 1,15^2 \times 0,75^2 = 0,74$$

Los datos producto de la aplicación de la Ecuación 5-10 se relacionan en la Tabla 22.

Tipo de Pérdida	Pérdidas nominales [W]	Pérdidas de carga [W]	Factor armónico	Pérdidas corregidas
P_{NL}	5 100	5 100		5 100
I^2R	19 615	14 592		14 592

P_{EC}	767	571	7,17	4 094
P_{OSL}	15 59	1 160	1,55	1 798
P_T	27 041	21 423		25 584

Tabla 22. Corrección de las pérdidas.

Fuente: [12]

El aumento de la parte superior de aceite ahora se puede calcular con la Ecuación 5-15, como sigue:

$$\theta_{TO} = 55 \times \left(\frac{25584}{27041} \right)^{0,8} = 52,6 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Las pérdidas nominales en el interior o en el devanado de baja tensión, se pueden calcular de la siguiente manera:

$$I_{2-R}^2 R = 1,5 \times 601,4^2 \times 0,01661 = 9011 \text{ [W]}$$

Las pérdidas bajo las condiciones de carga especificadas son las siguientes:

$$I_{2-R}^2 R = 9011 \times (1,15 \times 0,75)^2 = 6704 \text{ [W]}$$

Por el supuesto propuesto en el literal d) en 5.2, debido a que las corrientes son menores de 1000 [A], se supone que el 60% de las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados ocurren en el devanado de baja tensión. Las pérdidas máximas por corrientes de eddy en la región del punto más caliente son cuatro veces el promedio de pérdidas por corrientes de eddy. La elevación de temperatura en el punto más caliente del conductor respecto a la temperatura de la capa superior del aceite puede ser calculada con las Ecuación 5-11 y Ecuación 5-16, utilizando watts en lugar de valores en por unidad.

$$\theta_g = (65 - 55) \times \left(\frac{6704 + 4060 \times 2,4}{9011 + 767 \times 2,4} \right)^{0,8} = 10 \times \left(\frac{6704 + 9744}{9011 + 1841} \right)^{0,8} = 13,9 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

La elevación de temperatura en el punto más caliente del conductor por encima de la temperatura ambiente, es como sigue:

$$52,6 + 13,9 = 66,5 \text{ [}^\circ\text{C]}:$$

Donde se aprecia que esta elevación de temperatura calculada excede el límite nominal de 65 [°C].

5.3 Comparación de la metodología “K-Factor” y el Factor armónico de pérdidas

5.3.1 Definición del K-factor (Underwriter Laboratories)

La definición de desclasificación del K- Factor para transformadores se especifica en las referencias [13] y [14], UL (Underwriter Laboratories) define un factor K de la siguiente manera:

- a) El K-Factor es una calificación opcionalmente aplicada a un transformador que indica su idoneidad para ser usado con corrientes de carga no sinusoidales.
- b) El K-Factor es igual a

$$K = \sum_{h=1}^{\infty} I_h(\text{pu})^2 h^2$$

Ecuación 5-26

Para variables dadas:

$I_h(\text{pu})$ Es el valor eficaz de la corriente del h-ésimo armónico, en por unidad.

h Es el orden del armónico, 1, 2, 3, etc.

- c) Los transformadores a los cuales se les asigna un factor K no deben ser considerados para su uso con cargas armónicas cuando el valor eficaz de cada armónica superior a la décima, es mayor que $1/h$ de la corriente eficaz de la fundamental.

De la definición del K-Factor se puede inferir que para una carga lineal pura se tendrá un K-Factor igual a la unidad. Un K-Factor mayor indica que las pérdidas por corrientes de eddy en el transformador serán K veces mayor que el valor a la frecuencia fundamental. Los transformadores con clasificación de K-Factor están diseñados, por lo tanto, para tener unas pérdidas por corrientes de eddy muy bajas a la frecuencia fundamental.

5.3.2 Relación entre el K- Factor y el Factor armónico de pérdidas

La definición del Factor-K de Underwriter Laboratories se basa en la utilización de la corriente nominal del transformador en el cálculo de la corriente en por unidad. La sustitución de la corriente nominal en la Ecuación para el K-Factor de UL produce la Ecuación 5-27:

$$K - \text{Factor} = \sum_{h=1}^{\infty} \left[\frac{I_h}{I_R} \right] h^2 = \frac{1}{I_R^2} \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 h^2$$

Ecuación 5-27

Dónde:

I_R : Es el valor eficaz de la corriente para condiciones nominales de frecuencia y carga.

El factor armónico de pérdidas, según lo definido por la referencia [12], está expresado por una Ecuación de la siguiente manera:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2}$$

Ecuación 5-28

I_1 : Es una constante y puede ser factorizada fuera de la sumatoria, de esta forma se cancela como se muestra en la Ecuación 5-29:

$$F_{HL} = \frac{\frac{1}{I_1^2} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2 h^2}{\frac{1}{I_1^2} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2}$$

Ecuación 5-29

Reorganizando la Ecuación 5-29, se tiene la Ecuación 5-30.

$$\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2 h^2 = F_{HL} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2$$

Ecuación 5-30

Sustituyendo la Ecuación 5-30 en la Ecuación 5-27 se obtiene la siguiente ecuación:

$$K - \text{Factor} = \left[\frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2}{I_R^2} \right] F_{HL}$$

Ecuación 5-31

La Ecuación 5-31 muestra la relación del factor armónico de pérdidas con el K-Factor de Underwriter Laboratories. El factor armónico de pérdidas es una función de la distribución de la corriente armónica y es independiente de la magnitud relativa. El K-Factor depende tanto de la magnitud como de la distribución armónica de la corriente. Para la medición de corrientes armónicas en instalaciones existentes, el valor numérico del K-Factor es diferente del valor numérico del factor armónico de pérdidas. Para un conjunto de mediciones de carga de corriente armónica, el cálculo del K-Factor de UL, depende de la corriente nominal en el secundario del transformador.

Para un transformador nuevo con corrientes armónicas especificadas en por unidad de la corriente nominal del secundario del transformador, el K-Factor y el factor armónico de pérdidas presentan los mismos valores numéricos. El valor numérico del K-Factor es igual al valor numérico del Factor armónico de pérdidas sólo cuando la raíz

cuadrada de la suma de las corrientes armónicas al cuadrado es igual a la corriente nominal del secundario del transformador.

Por otra parte el numeral 5.3.3 se muestra la forma de calcular el K-Factor y se realiza una comparación de los resultados contra el factor armónico de pérdidas F_{HL} .

5.3.3 Ejemplo

Suponer un transformador existente con una potencia de 2500 kVA, 480 V trifásico y tipo seco. La corriente de carga nominal I_R es igual a 3007 A. La distribución armónica y los cálculos del K-Factor se muestran en la Tabla 23 y cuya corriente nominal $I_R=3007.1$ A.

h	h²	I_h	$\frac{I_h}{I_R}$	$\left[\frac{I_h}{I_R}\right]^2$	$\left[\frac{I_h}{I_R}\right]^2 h^2$	$\left(\frac{1}{h}\right) I_1$
1	1	1 764	0,587	0,345	0,345	-
5	25	309	0,10	0,010	0,25	-
7	49	195	0,065	0,0042	0,21	-
11	121	79,4	0,026	0,00068	0,082	160,36
13	169	50,5	0,017	0,00029	0,049	135,69
17	289	27,1	0,0090	0,000081	0,023	103,76
19	361	17,7	0,0059	0,000035	0,013	92,84
Σ					0,97	

Tabla 23. Ejemplo de cálculo del K- Factor

Fuente: [12]

Dónde:

h Es el orden del armónico, 1, 2, 3, etc.

I_h Es el valor eficaz de la corriente del h-ésimo armónico.

I₁ Es el valor eficaz de la corriente armónica fundamental.

$$\Sigma \left[\frac{I_h}{I_R}\right]^2 h^2 = \text{K-Factor} = 0,97$$

En la Tabla 23 se observa que para los armónicos de rangos superiores a 10, el valor eficaz de las corrientes es menor que el que se obtiene multiplicando la inversa del armónico por el valor eficaz de la corriente fundamental. En consecuencia es aplicable el K- Factor.

Realizando los mismos cálculos para transformadores con otra potencia y se aplica la misma carga de corrientes armónicas, se concluye que para transformadores cuya potencia es menor de 1500 kVA, el valor eficaz de la corriente armónica excede el valor de la corriente nominal. En la Tabla 24 se muestran los resultados del cálculo del K-Factor y el Factor armónico de pérdidas para diferentes capacidades.

kVA	I _R	K	F _{HL}
1 500	1 804	2,73	2,73
2 000	2 406	1,53	2,73
2 500	3 007	0,97	2,73

Tabla 24. Comparación del K- Factor y el factor armónico de carga para diferentes cargas
Fuente: [12]

5.4 Otras metodologías de desclasificación de transformadores [33]

5.4.1 Método europeo “Factor k”

Un tercer método utilizado en Europa, consiste en estimar cuánto debe desclasificarse un transformador estándar, de modo que las pérdidas totales en la carga armónica no superen las pérdidas a frecuencia fundamental para la cual se han diseñado el transformador. Esta magnitud es lo que se conoce como “Factor k” y se calcula por la Ecuación 5-32, así:

$$k = \left[1 + \frac{e}{1 + e} \left(\frac{I_1}{I} \right)^2 \sum_{h=2}^{h_{\max}} \left(h^q \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 5-32

Siendo:

- e El cociente de las pérdidas por corrientes de eddy divididas por las pérdidas óhmicas, ambas a la temperatura de referencia.
- h El orden del armónico.
- I El valor eficaz de la corriente sinusoidal conteniendo a todos los armónicos.
- I_h El valor de la corriente del h-ésimo armónico.
- I₁ El valor de la corriente fundamental.
- q La constante exponencial que depende del tipo de arrollamiento y de la frecuencia.

Los valores típicos son 1,7 para transformadores con conductores de sección circular o rectangular en ambos devanados y 1,5 para transformadores con devanados de conductores de lámina en baja tensión.

5.4.2 El factor de pérdidas adicionales

Un cuarto método es el denominado **factor de pérdidas adicionales**. Un factor de resistencia, se define como se indica a continuación:

$$K_{\Delta R} = \frac{R_{AC}(f) - R_{DC}}{R_{AC}(f_1) - R_{DC}}$$

Ecuación 5-33

Para variables identificadas como:

$K_{\Delta R}$ Es el factor de resistencia.

R_{DC} Es la resistencia en serie equivalente en corriente continua.

R_{AC} Es la resistencia en corriente alterna.

R_{AC} depende de la frecuencia, debido en parte a la redistribución de la corriente en el arrollamiento, y está determinada para cada frecuencia armónica. El tipo de construcción y la disposición de los devanados tienen un importante efecto sobre la forma de la relación entre R_{AC} y la frecuencia.

Finalmente, el factor de pérdidas adicionales " $K_{\Delta P}$ " se determina como la suma de las pérdidas dependientes de la frecuencia para cada frecuencia originada en R_{AC} . Esto requiere conocer el espectro de corrientes armónicas de la carga.

$$K_{\Delta P} = \sum_{f > f_1} K_{\Delta R}(f) \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2$$

Ecuación 5-34

En donde:

$K_{\Delta P}$ Es el factor de pérdidas adicionales.

$K_{\Delta R}$ Es el factor de resistencia.

I_h Es el valor de la corriente del h-ésimo armónico.

I_R Es el valor de la corriente nominal.

6. Buenas prácticas de ingeniería orientadas a la mitigación de los fenómenos de compatibilidad electromagnética: Dimensionamiento de motores

Las prácticas presentadas continuación son basadas en lo expuesto en la referencia [15], en donde se propone una primera metodología para la desclasificación de motores de inducción (Ver sección 6.1), en donde se definen los factores de desclasificación de motores de inducción en presencia de armónicos (Ver numeral 6.1.1), así como el factor de ajuste aplicado a motores de inducción sometidos a tensiones desbalanceadas (Ver literal 6.1.3). Finalmente en el inciso 6.2, se presenta una segunda metodología para la desclasificación de motores aplicado a motores de diseño N

6.1 Metodología 1 para la desclasificación de motores de inducción

6.1.1 Factor de desclasificación en presencia de armónicos

Cuando un motor es operado en condiciones nominales y la tensión aplicada contiene componentes de frecuencia distintas a la nominal, la potencia nominal del motor debe ser corregida mediante un factor de reducción tal como el presentado en la Figura 71. Esta curva se define bajo el supuesto de que sólo los armónicos igual a múltiplos impares (excepto aquellos divisibles por tres, que son homopolares y solo circulan por el neutro), de la frecuencia fundamental están presentes. Se supone que cualquier desbalance de tensión o cualquier armónico par o ambos presentes en la tensión, son insignificantes. No es aplicable cuando el motor funciona a una frecuencia diferente a la nominal, ni cuando se opera a partir de un variador de tensión, variador de frecuencia o ambos.

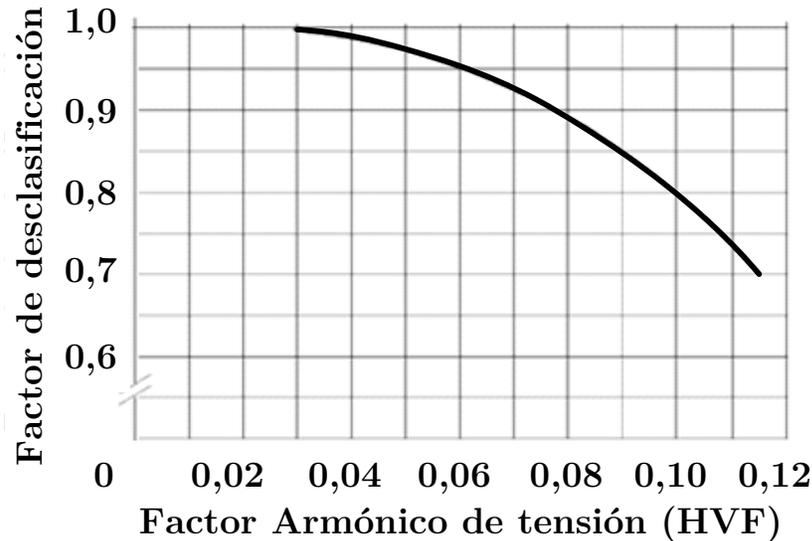


Figura 71. Curva de ajuste de potencia (HVF).

Fuente [15]

Para la aplicación del factor de desclasificación de la Figura 71 es necesario definir el factor de tensión armónica (HVF), el cual está en función de lo propuesto en la referencia [15] de la siguiente manera:

$$HVF = \sqrt{\sum_{n=5}^{n=\infty} \frac{V_n^2}{h}}$$

Ecuación 6-1

Siendo:

h El orden del armónico impar, sin incluir los divisibles por tres.

V_n La magnitud por unidad de la tensión del n-ésimo armónico.

6.1.2 Ejemplo

En este ejemplo, se calculará la reducción de potencia de un motor que opera con tensiones por unidad de 0,10; 0,7; 0,045 y 0,036 que ocurren en el 5, 7, 11 y 13 armónico respectivamente.

El valor del factor de tensión armónico utilizando la Ecuación 6-1 es:

$$HVF = \sqrt{\frac{0,10^2}{5} + \frac{0,7^2}{7} + \frac{0,045^2}{11} + \frac{0,036^2}{13}} = 0,0546$$

De esta forma, y según la Figura 71 la potencia nominal del motor deberá ser multiplicada por un factor igual a 0,96 para un Factor de Tensión Armónica (HVF) igual a 0,0546.

6.1.3 Factor de ajuste aplicado en presencia de tensiones desbalanceadas.

En la referencia [15], se establece que en caso de tensiones desbalanceadas, la potencia nominal del motor se debe multiplicar por el factor de desclasificación de la Figura 72, para reducir la posibilidad de daños en el motor. Advierte además, que no es recomendable el funcionamiento de motores con desbalances de tensión superiores al 5%.

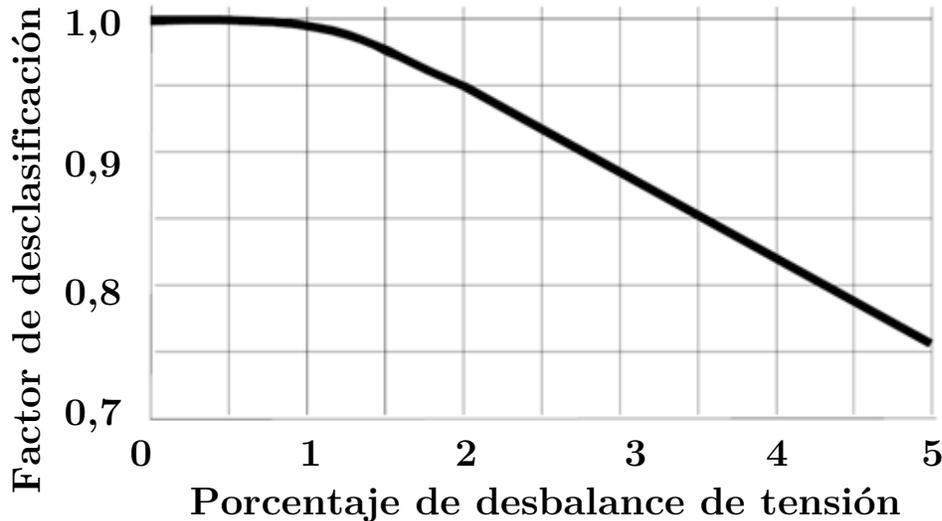


Figura 72. Curva de reducción de potencia.

Fuente [15]

Cabe resaltar que cuando la curva de reducción de potencia de la Figura 72 es aplicada para la operación con tensiones desbalanceadas, el ajuste y selección de la protección contra sobrecarga debe tener en cuenta la combinación del factor de reducción de potencia aplicada al motor y el aumento en la corriente resultante de las tensiones desbalanceadas. Este es un problema complejo que implica la variación en la corriente del motor como una función del desbalance de carga y tensión, además de las características de los dispositivos de sobrecarga en relación con la corriente máxima ($I_{\text{máxima}}$) o la corriente promedio (I_{average}).

Cuando no se tiene información específica, se recomienda que los dispositivos de sobrecarga sean seleccionados y/o ajustados al valor mínimo, para que no dé lugar a disparos de la protección para el factor de desclasificación aplicado. Cuando se prevén tensiones desbalanceadas, se recomienda que los dispositivos de sobrecarga se seleccionen de modo que estos sean sensibles a la corriente máxima ($I_{\text{máxima}}$), en lugar de dispositivos de sobrecarga que respondan a la corriente promedio (I_{average}).

6.1.4 Ejemplo

Aquí se muestra el cálculo del ajuste de potencia de un motor de inducción polifásico, alimentado con tensiones de 460, 467 y 450 [V]. Al mismo tiempo el porcentaje de desbalance de tensión en la referencia [15] es calculado como se muestra a continuación:

$$\text{Desbalance de tensión (\%)} = \frac{\text{Máxima desviación de tensión respecto a la tensión promedio}}{\text{Tensión Promedio}} \times 100$$

Ecuación 6-2

Se aplica esta expresión para el ejercicio, se tiene que:

$$\text{Tensión Promedio} = \frac{460 + 467 + 450}{3} = \frac{1377}{3} = 459[\text{V}]$$

Y la máxima desviación de la tensión respecto a la tensión promedio está dada por:

$$\text{máx}[|460 - 459|, |467 - 459|, |450 - 459|] = 9$$

$$\text{Entonces: Desbalance de tensión (\%)} = 100 \times \frac{9}{459} = 1,96 \%$$

Por lo tanto y teniendo en cuenta el factor de la Figura 72, la potencia nominal del motor debe ser multiplicada por 0,95. De esta forma se logra reducir la posibilidad de daño al motor.

6.1.5 Ejemplo

En este ejemplo, se calculará la reducción de la potencia de un motor tipo jaula de ardilla, alimentado con tensiones de 2 300, 2 220 y 2 185 [V].

$$\text{Tensión Promedio} = \frac{2\,300 + 2\,220 + 2\,185}{3} = \frac{6\,705}{3} = 2\,235[\text{V}]$$

La máxima desviación de la tensión respecto a la tensión promedio está dada por:

$$\text{máx}[|2\,300 - 2\,235|, |2\,220 - 2\,235|, |2\,185 - 2\,235|] = 65$$

$$\text{Entonces: Desbalance de tensión (\%)} = 100 \times \frac{65}{2\,235} = 2,9 \%$$

Así pues la potencia nominal del motor debe ser multiplicada por 0,88 de acuerdo con el factor de la Figura 72, desclasificándolo bajo condiciones de desbalance.

6.2 Metodología 2 para la desclasificación de motores de inducción tipo jaula de ardilla

Cuando un motor de corriente alterna, usado con una fuente de energía a frecuencia nominal, está conectado a un sistema de tensión trifásica con una componente de secuencia de fase negativa superior al 1% del componente de secuencia positiva de tensiones durante un largo período (por lo menos la constante de tiempo térmica de la

máquina), la potencia admisible del motor debe ser menor que la potencia nominal para reducir la posibilidad de daños en el motor.

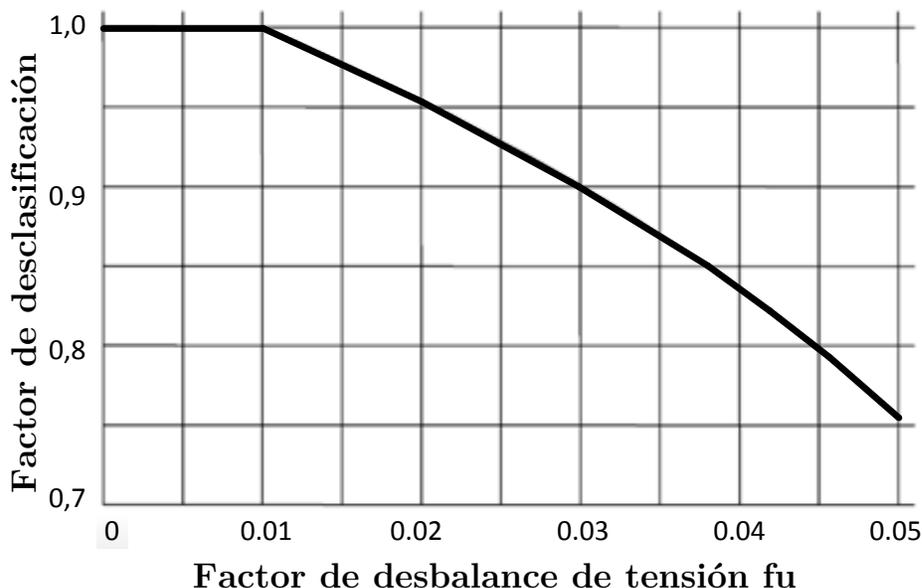


Figura 73. Valores típicos de reducción de potencia de motores diseño N⁴¹

Fuente: [16]

El factor de reducción típico para los motores de diseño N [67] de acuerdo con la Figura 73, supone que la componente de secuencia de fase positiva de la tensión de alimentación, es cercana a la tensión nominal. No se recomienda el funcionamiento del motor por encima de una condición de desequilibrio de tensión del 5%.

El factor de desequilibrio f_u en la Figura 73, se define como:

$$f_u = U_n / U_p$$

Ecuación 6-3

Donde

U_n Es el valor eficaz de la componente de secuencia negativa de la tensión de alimentación.

U_p Es el valor eficaz de la componente de secuencia positiva de la tensión de alimentación.

6.2.1 Ejemplo

Se tiene un motor con las siguientes tensiones fase:

$$V_a = 110\langle 0^\circ, V_b = 112,7\langle 240^\circ \text{ y } V_c = 125\langle 120^\circ$$

⁴¹ Motores diseño N: Son motores de par de arranque normal, corriente en el arranque normal y de bajo deslizamiento. Constituyen la mayoría de los motores encontrados en el mercado y son aptos para ser utilizados para el accionamiento de cargas normales como por ejemplo bombas, máquinas rotatorias y ventiladores, entre otros.

En este caso la tensión nominal es 220 V.

El valor eficaz de la componente de secuencia negativa y de la componente de la secuencia positiva puede ser calculado de la siguiente forma:

$$U_n = \frac{V_{ab} + a \cdot V_{bc} + a^2 \cdot V_{ca}}{3} = \frac{192,9 \angle 30,4^\circ + a \cdot 205,9 \angle -88,3^\circ + a^2 \cdot 203,7 \angle 147,9^\circ}{3} = 200,75 \angle 30^\circ$$

$$U_p = \frac{V_{ab} + a^2 \cdot V_{bc} + a \cdot V_{ca}}{3} = \frac{192,9 \angle 30,4^\circ + a^2 \cdot 205,9 \angle -88,3^\circ + a \cdot 203,7 \angle 147,9^\circ}{3} = 7,98 \angle 200,3^\circ$$

Donde $a = -0,5 + j0,866$ y $a^2 = -0,5 - j0,866$

Se toma la amplitud de las componentes de tensión de secuencia positiva U_p y de secuencia negativa U_n y se aplica la Ecuación 6-3 obteniéndose:

$$f_u = U_n / U_p = 7,98 / 200,75 = 0,04$$

Por lo tanto, la potencia nominal del motor debe ser multiplicada por 0,84 a partir del factor de la Figura 73.

7. Buenas prácticas de ingeniería orientadas a la mitigación de los fenómenos de compatibilidad electromagnética: Dimensionamiento de conductores

A lo largo de este capítulo se presentan algunas estrategias relacionadas con la aplicación de factores de corrección sobre conductores que llevan corrientes armónicas.

En la primera sección se aborda la metodología propuesta por la referencia [68], con presencia de corrientes armónicas en el conductor neutro en un sistema trifásico tetrafililar (Ver sección 7.1). Así mismo en la Sección 7.2, se presenta la metodología propuesta por la referencia [28], para la corrección de los problemas relacionados con el efecto piel o superficial, sobre conductores con contenido armónico.

7.1 Factores de reducción para las corrientes armónicas en cables en sistemas trifásicos tetrafilares.

Cuando existe un flujo de corriente por el neutro en un sistema trifásico tetrafililar equilibrado, generalmente se debe a la presencia de corrientes armónicas que no se anulan al sumarse en el neutro. El armónico más significativo que no se anula en el conductor del neutro es el tercer armónico. En algunas ocasiones la presencia del tercer armónico en un conductor neutro, puede hacer que la corriente medida en el conductor del neutro sea incluso mayor que la corriente medida en las fases. En este caso la corriente en el neutro tiene un efecto significativo sobre la capacidad de corriente de los demás conductores en el circuito particular, puesto que una mayor corriente en el neutro puede conllevar a un aumento de temperatura, lo que a su vez desencadena una reducción de la capacidad de carga de los demás conductores por causa del calentamiento mutuo.

Para ello la referencia [69] en el inciso 524.2 propone algunos escenarios donde la sección del conductor del neutro debe tener al menos la misma sección que los conductores de fase, de forma que se compense en parte los efectos de sobrecarga y

posterior sobrecalentamiento del conductor neutro estos escenarios son citados a continuación:

- En circuitos monofásicos de dos conductores sea cual fuere la sección de estos.
- En circuitos monofásicos y circuitos polifásicos cuyos conductores tengan una sección máxima de 16 mm^2 para cobre o 25 mm^2 para aluminio.

Por otra parte en el numeral 524.3 (también en la referencia [69]), establece para circuitos polifásicos que el conductor puede tener una menor sección transversal, siempre y cuando se cumplan al mismo tiempo todas las siguientes condiciones:

- La corriente máxima prevista en la que se incluye los armónicos que puedan existir y que sea susceptible de recorrer el conductor del neutro durante el funcionamiento normal, no debe ser superior a la capacidad de corriente correspondiente a la sección del conductor neutro en un escenario normal.
- El conductor del neutro está protegido contra las sobrecorrientes según las reglas del apartado 473.3.2 de la norma UNE 20460-4-473 [70], relacionado con la posición de dispositivos de protección contra sobrecorrientes.
- La sección del neutro debe ser como mínimo de 16 mm^2 en cobre o 25 mm^2 en aluminio.

Sin embargo, para poder aplicar estas condiciones es necesario conocer el número y tipo de cargas que estarán presentes en la instalación (condiciones iniciales) para realizar un adecuado diseño. Lamentablemente esto en la mayoría de los casos nunca está disponible, en el mejor de los casos se puede realizar algunas aproximaciones cuando se tiene certeza de algunas cargas que van presente en la instalación, por ejemplo en el caso de ordenadores en donde la corriente en el neutro puede ser de 1,61 veces la corriente de línea y llegar hasta 1,73 veces la corriente de línea en condiciones extremas en rectificadores controlados, con grandes ángulos de control, por ejemplo para tensiones bajas de corriente continua ($\alpha \geq 60^\circ$) [60]

Sin embargo, para resolver el problema del desconocimiento de las condiciones iniciales de la instalación se ha optado por aplicar coeficientes de corrección para la capacidad de corriente de los conductores de forma que se asemeje a la situación real de la instalación considerada, para lo cual se han tomado las siguientes condiciones del sistema como supuestas:

- El sistema es trifásico tetrafililar equilibrado.
- El único armónico importante que no se cancela en el neutro es el tercero (Es decir que los otros armónicos triple n, tienen magnitudes relativamente bajas y otros están casi equilibrados y suman cero)
- El cable tiene de 4 a 5 conductores, con el neutro del mismo material y la misma sección que los conductores de fase.

De esta forma si un conductor neutro en un sistema trifásico tetrafililar equilibrado que transporta una corriente, sin el factor de ajuste correspondiente a la carga de los conductores de fase, el conductor neutro debe ser tenido en cuenta para la corriente asignada para el circuito bajo el supuesto de la existencia de corrientes armónicas significativas en los circuitos trifásicos tetrafilares. Si el valor del contenido de armónico sobrepasa el 10% [69] y/o el 15% [68] de la corriente de línea fundamental, el conductor neutro no debe presentar una sección inferior que la de los conductores de fase.

La situación puede ser algo más complicada cuando tan solo dos conductores de los tres conductores de fase del sistema trifásico transportan corriente, puesto que aparte que el conductor del neutro transporta corrientes armónicas, también transportara corrientes en desequilibrio. Esto puede desencadenar una sobrecarga en el conductor del neutro.

Para ello el estándar descrito en la referencia [68], propone los siguientes factores de corrección presentados en la Tabla 25, aplicables solo a los cables con cuatro conductores, cuyo neutro es del mismo material y sección que los conductores de fase. Estos factores de reducción han sido calculados basándose en las corrientes armónicas de orden tres. Si son más importantes los armónicos de orden más elevado, 9, 12, etc. (por ejemplo más del 10% [69] y/o el 15% [68]) y/o si existe un desequilibrio entre fases superior al 50% pueden aplicarse factores de reducción más pequeños bajo el criterio del diseñador.

De acuerdo con la Tabla 25, para una tasa de distorsión armónica de hasta un 15%, el estándar descrito por la referencia [68], no propone ningún aumento en la sección del conductor del neutro, de esta forma la corriente podría llegar hasta un 45% de la corriente de línea ($3 \times 15\%$) con un aumento de la generación de calor del 6% comparado con el valor nominal del cable en condiciones normales [69]. Este exceso es relativamente tolerable salvo en condiciones donde no se tiene la suficiente ventilación y en donde existen otras fuentes de calor, es estas circunstancias puede ser conveniente el empleo de un margen de seguridad adicional.

Por otra parte, para corrientes de fase que contengan entre un 15%-33% de contenido del tercer armónico, la corriente en el neutro podría ser similar a la corriente de línea, por lo que la selección del conductor del neutro debe hacer con base en la corriente de línea, de forma que debe reducirse la capacidad de corriente del conductor seleccionado para las fases como medida de prevención en un factor de 0,86; por lo tanto si se tiene una corriente en el sistema de 20 A, debe dimensionarse un conductor con esta capacidad de corriente en el que se haya incluido el ajuste propuesto, es decir que se debe elegir un conductor con una capacidad de corriente de 24 A, de forma que después del ajuste ($24 \times 0,86 = 20 \text{ A}$), se obtenga la capacidad de corriente requerida de 20 A.

Por otro lado, cuando la componente de armónicos de tercer orden supera el 33% y es menor del 45%, la capacidad de corriente de los conductores de fase debe

dimensionarse con base en la corriente que recorre el conductor del neutro, pero reducida en un factor de 0,86.

Es decir que con un contenido armónico triple n no mayor al 45%, la corriente de las fases viene determinada por la corriente del neutro, la cual una vez ajustada se supone del 135% ($45\% \times 3$) de la corriente de línea ajustada en un factor de 0,86. (Para más claridad ver el ejemplo propuesto en el numeral 7.1.1)

Finalmente para componentes mayores a 45%, la sección del cable está terminada por la corriente en el neutro, pero no hay necesidad de aplicar factores de corrección por que los conductores de fase están sobredimensionados.

Contenido de tercer armónico en la corriente de línea [%]	Factor de Reducción	
	Selección basada en la corriente de línea	Selección basada en la corriente del neutro
0-15	1	-
15-33	0,86	-
33-45	-	0,86
>45	-	1

Tabla 25. Factores de reducción para corrientes armónicas en cables con cuatro o cinco conductores
Fuente: [68]

Cuando se aplican los factores de la Tabla 25, a las corrientes admisibles de un cable con tres conductores cargados, darán como resultado la corriente admisible de un cable con cuatro conductores cargados si la corriente en el cuarto es debida a los armónicos. Los factores de corrección tienen en cuenta los efectos del calor de la corriente armónica en los conductores de fase.

En el caso donde se usan cables unipolares, la determinación de la sección del conductor neutro y de las fases, se realizan independientemente. [60]

Si la corriente en el conductor neutro se espera que sea más elevada que la corriente de línea, entonces es importante elegir la sección de los conductores de acuerdo a la corriente del neutro. Si en cambio la elección de la sección del cable se basa en la corriente del neutro, con corriente no significativamente superior a la corriente de línea, es necesario reducir el valor de la tabla de capacidad de corriente al correspondiente a tres conductores cargados. (Consultar tablas de capacidad de corriente para dos y tres conductores en el Anexo A de la norma UNE 20460-5-523:2004 [69]).

Si la corriente en el neutro es superior al 135% de la fase y si la elección del cable se elige basándose en la corriente de neutro, entonces los tres conductores de fase no estarán

totalmente cargados. La reducción del calor generado por los conductores de fase anula el generado por el conductor neutro y no es necesario aplicar factor de reducción a la intensidad admisible para tres conductores cargados.

En la referencia [60], se presentan las tablas 2 a la 5, en donde se muestran como los valores de capacidad de corriente cambian con y sin corrientes de tercer armónico, estos valores fueron calculados con base en la metodología propuesta por la referencia [69]

7.1.1 Ejemplo

Se tiene un circuito trifásico con una carga de diseño de 39 A (corriente de línea) a instalar mediante un cable aislado con PVC de cuatro conductores, fijado a una pared, método de instalación C. [68]

A partir de la Tabla B52.4 en la referencia [68], un cable de 6 mm² con conductores de cobre tiene una capacidad de corriente de 41 A y es apropiado en caso menor a 15% de armónicos en el circuito o en ausencia de los mismos.

En el caso de presencia de un 20% del tercer armónico, el dimensionamiento del conductor debe realizarse de acuerdo a la corriente de línea y se debe aplicar un factor de reducción de 0,86 a la capacidad de corriente del conductor seleccionado, o de forma similar dividiendo la corriente proyectada o que va circular por la línea sobre este factor. De manera que los cálculos son los siguientes:

1. Primer método: De la Tabla B.52-4, de la IEC 60364-5-52 [68], se tiene que el cable de 3 conductores cargados, con aislamiento en PVC y con método de instalación C. El conductor de 6 mm² tiene una capacidad de corriente de 41 A, aplicando el factor de corrección $41 \times 0,86 = 35,26$ A, el cual NO tiene la capacidad para la corriente de diseño de 39 A.
El conductor de 10 mm² tiene una capacidad de corriente de 57 A, aplicando el factor de corrección $57 \times 0,86 = 49,02$ A, el cual SI tiene la capacidad para la corriente de diseño de 39 A.
2. Segundo método: Con una corriente de diseño o de línea de 39A se aplica el factor de 0,86; $39/0,86 = 45A$, de forma que para esta corriente, no es adecuado un cable de 6 mm² (41 A), pero si uno de 10 mm² (57 A).

En el caso, en donde existe un 40% del tercer armónico en la corriente de línea, la elección se basa en la corriente que se espera en el neutro, para lo cual se aplica el factor de reducción de 0,86, (Ver Tabla 25). Para calcular la corriente por el neutro se analiza solo la corriente debida los a los armónicos de tercer orden que es la que circulara por este conductor, de forma que se tiene: $39 \times 0,4 \times 3 = 46,8$ A. De igual forma se puede dimensionar el conductor de dos formas:

1. Primer método: De la Tabla B.52-4, de la IEC 60364-5-52 [68], se tiene que el cable de 3 conductores cargados con aislamiento en PVC de 6 mm² tiene una

capacidad de corriente de 41 A, aplicando el factor de corrección 41 Ax0,86=35,26 A, el cual NO tiene la capacidad para la corriente del conductor del neutro de 46,8 A.

El conductor de 10 mm² tiene una capacidad de corriente de 57 A, aplicando el factor de corrección 57 Ax0,86=49,02 A, el cual SI tiene la capacidad para la corriente de diseño de 39 A.

2. De igual forma, una corriente por el neutro de 46,8 A, se aplica el factor de 0,86; 46,8 A /0,86= 54,42 A, de forma que para esta corriente, no es adecuado un cable de 6 mm² (41 A), pero si uno de 10 mm² (57 A).

En el caso de una presencia de un 50% de tercer armónico, la elección de basa de nuevo en la corriente de neutro que es: 39 Ax0,5x3=58,5 A, para este caso el factor de reducción es 1, de forma que es adecuada una sección de 16 mm² (76 A) (Ver Tabla B.52-4, de la IEC 60364-5-52 [68]).

7.2 Factor de efecto superficial o efecto piel

El factor de efecto piel (K) depende de la profundidad superficial, que es un indicador de la penetración de la corriente en un conductor. La profundidad superficial (δ) es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia:

$$\delta = S / \sqrt{f}$$

Ecuación 7-1

En dónde:

S : es una constante de proporcionalidad sobre la base de las características físicas del cable y su permeabilidad magnética.

f : es la frecuencia de la corriente que atraviesa el conductor (Frecuencia fundamental y frecuencias armónicas).

Si R_{dc} es la resistencia de corriente continua del cable, entonces la resistencia de corriente alterna a la frecuencia f , está dada por:

$$R_{ac} = K * R_{dc}$$

Ecuación 7-2

El valor de K se determina a partir de la Tabla 26 de acuerdo con el valor de X, que se calcula como lo indica Ecuación 7-3:

$$X = 0,0636 * \sqrt{\frac{f * \mu}{R_{dc}}}$$

Ecuación 7-3

Donde 0,0636 es una constante para conductores de cobre⁴², f es la frecuencia, μ es la permeabilidad magnética del material del conductor y el Rdc es la resistencia de corriente continua por milla del conductor.

La permeabilidad magnética de un material no magnético tal como el cobre es aproximadamente igual a 1,0. Tablas o gráficos que contienen valores de X y K son puestos a disposición por los fabricantes de cable.

X	K	X	K	X	K
0	1,000000	1,4	1,019690	2,700000	1,227530
0,1	1,000000	1,5	1,02558	2,8	1,2662
0,2	1,000000	1,6	1,03323	2,9	1,28644
0,3	1,000040	1,7	1,04205	3	1,31809
0,5	1,000320	1,8	1,0524	3,1	1,35102
0,6	1,000670	1,9	1,0644	3,1	1,38504
0,7	1,001240	2	1,07816	3,3	1,41999
0,8	1,002120	2,1	1,09375	3,4	1,4577
0,9	1,003400	2,1	1,11126	3,5	1,49202
1	1,00519	2,3	1,13069	3,6	1,52879
1,1	1,00758	2,4	1,15207	3,7	1,56587
1,2	1,01071	2,5	1,17538	3,8	1,60312
1,3	1,0147	2,6	1,20056	3,9	1,64051

Tabla 26. Factor de Efecto Piel para cualquier tipo de conductor

Fuente: [28]

7.2.1 Ejemplo

Encontrar la resistencia que presenta un conductor de 107,2 mm² (4/0AWG) a la frecuencia de 60 Hz, y a su 3^a, 5^a y 7^a armónicas [28]

Solución: De las tablas del fabricante Rdc = 0,276 Ω /milla

Calcular el valor de X con la expresión

$$X = 0,0636 * \sqrt{f * \mu / Rdc}$$

Ecuación 7-4

Una vez calculado el valor de X, se relaciona con el valor de K a partir de la Tabla 26.

$$X_{60} = 0,0636 * \sqrt{60 * 1/(0,276)} = 0,938 \quad K_{60} = 1,00400$$

$$X_{180} = 0,0636 * \sqrt{180 * 1/(0,276)} = 1,624 \quad K_{180} = 1,03580$$

⁴² El efecto piel sobre los conductores de aluminio es menor porque el aluminio tiene una alta resistividad.

$$X_{300} = 0,0636 * \sqrt{300 * 1/(0,276)} = 2,097 \quad K_{300} = 1,09370$$

$$X_{420} = 0,0636 * \sqrt{420 * 1/(0,276)} = 2,481 \quad K_{420} = 1,17100$$

El valor de la resistencia del conductor para cada frecuencia es el siguiente:

$$R_{60} = K_{60} * Rdc = 1,00004 * (0,276) = 0,2771 \Omega /milla$$

$$R_{180} = K_{180} * Rdc = 1,03580 * (0,276) = 0,285 \Omega /milla$$

$$R_{300} = K_{300} * Rdc = 1,09370 * (0,276) = 0,3019 \Omega /milla$$

$$R_{420} = K_{420} * Rdc = 1,17100 * (0,276) = 0,3232 \Omega /milla$$

La relación de la resistencia del cable a una frecuencia dada con respecto a su resistencia a 60 Hz se define como la relación de efecto piel (E).

De acuerdo con esta definición:

$$E_n = \frac{R_n}{R_1}$$

Ecuación 7-5

E2=resistencia en segunda frecuencia armónica ÷ resistencia a la frecuencia fundamental
= R120 ÷ R60

E3=resistencia en tercera frecuencia armónica ÷ resistencia a la frecuencia fundamental
= R180 ÷ R60

La expresión de la forma general para las distorsiones armónicas individuales In, es igual al valor RMS de la corriente armónica enésima dividida por el valor eficaz de la corriente fundamental:

$$I_n = \frac{I_n}{R_1}$$

Ecuación 7-6

Por lo tanto puede formularse una expresión para el factor corrección para conductores. El factor de valoración actual (q) es equivalente del cable a corriente a frecuencia fundamental a la que el cable debe ser corregido para el transporte de cargas no lineales que contienen componentes de frecuencia armónica, esta expresión es presentada a partir de la Ecuación 7-7:

$$q = I_1^2 * E_1 + I_2^2 * E_2 + I_3^2 * E_3 + I_n^2 * E_n$$

Ecuación 7-7

Donde I1, I2, I3 son las relaciones entre las corrientes de frecuencia armónica con respecto a la corriente fundamental y E1, E2, E3 son las relaciones en efecto piel.

7.2.2 Ejemplo

Determinar el factor de corrección de un conductor de cobre de 300 kcmil necesario para llevar una carga no lineal con el siguiente contenido armónico [28]:

Fundamental = 250A, Tercer armónico = 25A, Quinto armónico = 60A, Séptimo armónico = 45A, Onceavo armónico = 45A.

La Rdc del cable 300kcmil = 0,17 Ω /milla

De nuevo utilizando la Ecuación 7-4 y siguiendo el mismo procedimiento del ejemplo en la sección 7.2.1 se tiene:

$$X = 0,0636 * \sqrt{f * \mu / Rdc}$$

$$X_{60} = 0,0636 * \sqrt{60 * 1/0,17} = 1,195; K_{60} = 1,0106$$

$$X_{180} = 0,0636 * \sqrt{180 * 1/0,17} = 2,069; K_{180} = 1,089$$

$$X_{300} = 0,0636 * \sqrt{300 * 1/0,17} = 2,672; K_{300} = 1,220$$

$$X_{420} = 0,0636 * \sqrt{420 * 1/0,17} = 3,161; K_{420} = 1,372$$

$$X_{660} = 0,0636 * \sqrt{660 * 1/0,17} = 3,963; K_{660} = 1,664$$

$$R_{60} = 1,0106 * 0,17 = 0,1718 \frac{\Omega}{milla}$$

$$R_{180} = 1,089 * 0,17 = 0,1851 \frac{\Omega}{milla}$$

$$R_{300} = 1,220 * 0,17 = 0,2074 \frac{\Omega}{milla}$$

$$R_{420} = 1,372 * 0,17 = 0,2332 \frac{\Omega}{milla}$$

$$R_{660} = 1,664 * 0,17 = 0,2829 \frac{\Omega}{milla}$$

Calculando los factores de efecto piel con la Ecuación 7-5:

$$E_1 = 1; E_3 = 1,077; E_5 = 1,207; E_7 = 1,357; E_{11} = 1,647$$

Los factores de distorsión armónica individual (Ecuación 7-6):

$$I_1 = 1; I_3 = \frac{25}{250} = 0,1; I_5 = \frac{60}{250} = 0,24; I_7 = 0,18; I_{11} = \frac{20}{250} = 0,08$$

El factor de corrección de la corriente esta dado a partir de la Ecuación 7-7

$$q = I_1^2 * E_1 + I_3^2 * E_3 + I_5^2 * E_5 + I_n^2 * E_n$$

$$q = 1^2 * 1 + 0,1^2 * 1,077 + 0,24^2 * 1,207 + 0,18^2 * 1,357 + 0,08^2 * 1,647$$

$$q = 1,135$$

De esta forma el conductor se comportara como si circulara una corriente 11,35% superior al medido o calculado para una corriente eficaz.

La corriente eficaz que circula por el conductor es:

$$I_{RMS} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2};$$

Ecuación 7-8

De la Ecuación 7-8, se tiene:

$$I_{RMS} = \sqrt{250^2 + 25^2 + 60^2 + 45^2 + 20^2};$$

$$I_{RMS} = 262,96A;$$

La corriente eficaz corregida será la siguiente:

$$I_{RMS \text{ CORREGIDA}} = I_{RMS} * q$$

$$I_{RMS \text{ CORREGIDA}} = I_{RMS} * 1,135;$$

$$I_{RMS \text{ CORREGIDA}} = 298,464A$$

8. Buenas prácticas de ingeniería orientadas a la mitigación de los fenómenos de compatibilidad electromagnética: Dimensionamiento de canalizaciones

A lo largo de una instalación eléctrica de uso final, se puede presentar el tendido de cables de potencia muy cercanos a los cables de datos, generalmente alojados en la misma bandeja portacables. La elección y uso de estas últimas pueden contribuir enormemente en la obtención de una buena Compatibilidad electromagnética, minimizando los efectos de los campos electromagnéticos sobre el cable de datos, es decir, reduciendo la intensidad del acoplamiento.

Las bandejas portacables a menudo no son tenidas en cuenta por los estándares y reglamentos, puesto que son elementos pasivos que no generan perturbaciones electromagnéticas y su funcionamiento no se ve afectado por las mismas [71]. En este sentido la norma descrita por la referencia [72], aun no proporciona detalles del papel de las bandejas portacables en la mitigación de perturbaciones electromagnéticas, puesto que aun este tema se encuentra en fase de estudio a nivel internacional.

Por otra parte, una de las principales falencias radica en que muchos fabricantes aun no proporcionan información precisa basada en ensayos fiables, de forma que se indique la metodología para utilizar las bandejas portacables en la que se favorezca la CEM de la instalación.

Estos fabricantes a menudo se limitan a sugerir el uso de tabiques separadores y demás accesorios, así como la separación de diferentes tipos de conductores, sin especificar medidas concretas.

De esta forma en la referencia [71], se han analizado dos escenarios:

En el primero, se ha dispuesto un cable de datos UTP CAT 5, primero sin canalización y luego con una canalización tipo malla sin tapa y con tapa y otra de lámina conectadas con y sin tapa, en una celda GTEM (Gigahertz trasverse electromagnetic),

aislada de cualquier tipo de perturbación externa, y se le somete a un campo electromagnético uniforme de 30 V/m.

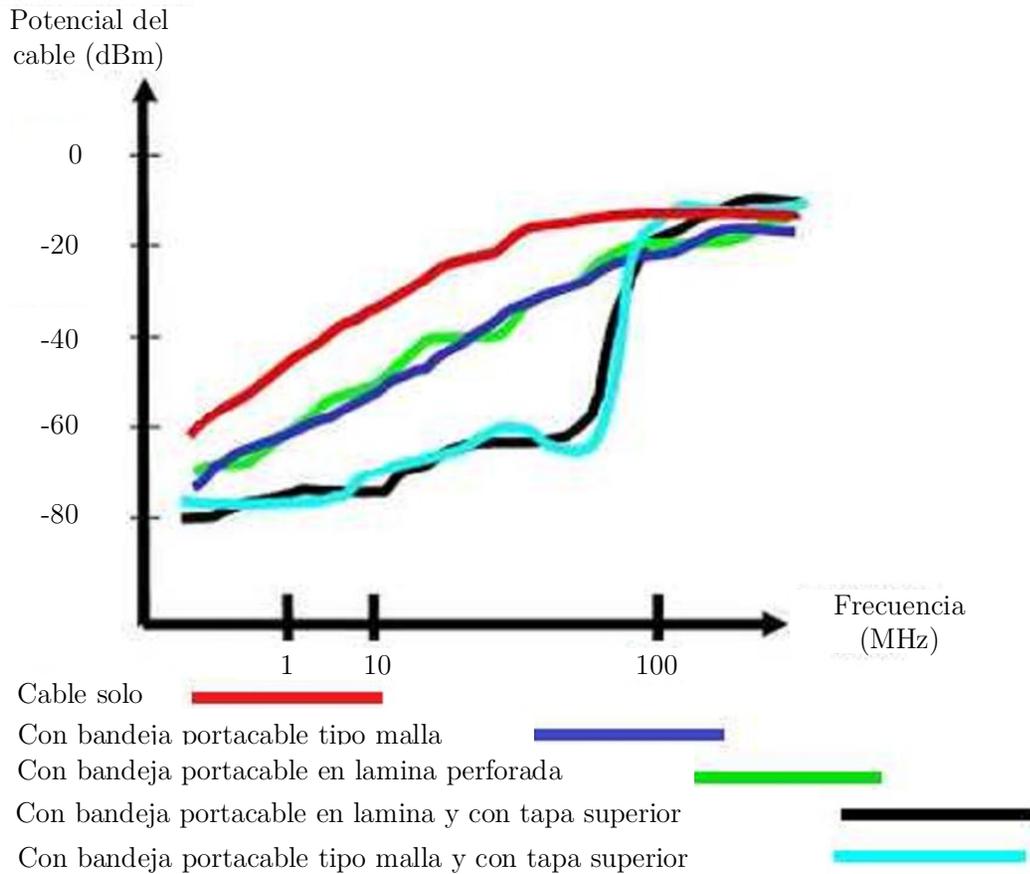


Figura 74. Diferentes tipos de canalizaciones sometidas a un campo EM uniforme de 30 V/m

Fuente: [71]

Como se puede ver en la Figura 74, las configuraciones de bandeja portacables en lámina y tipo malla ambas con tapa, ofrecen mejores resultados frente a la atenuación de perturbaciones hasta una frecuencia de 100 MHz, gracias a su efecto tipo jaula de Faraday. Así mismo a pesar que el comportamiento de las bandejas tipo malla y lámina sin tapa no es óptimo, ofrece un mejor comportamiento que en el caso en el cual el cable se haya tendido sin ningún tipo de canalización.

En el segundo escenario se analizan los efectos de un cable de potencia sobre un cable de datos UTP CAT 6, montados en paralelo y en distintos tipos de bandejas portacables. Para realizar este ensayo, se colocaron los dos cables en el interior de una cámara anecoica⁴³[4] con el objetivo de evitar el acceso de cualquier perturbación externa.

⁴³ Recinto con blindaje metálico en sus paredes, a manera de una jaula de Faraday y cubierta con materiales absorbentes de radiofrecuencia en su interior, de modo tal que aisle de la interferencia externa y simule condiciones de espacio libre en el interior del recinto.

A continuación se probaron 118 configuraciones distintas: primero, los cables solos, sin canalización, y luego con bandeja portacables tipo malla y de lámina, con y sin tapa; con y sin conexión a tierra; con y sin tabique separador, colocando los cables a una distancia entre sí de 0, 10, 0 y 30 cm, en la misma bandeja portacables y en bandeja portacables separadas, etc.

En cada una de estas configuraciones se midió la diafonía producida por el cable de potencia sobre el cable de datos, de manera que puede apreciarse el efecto atenuador que se consigue con cada una de las configuraciones mencionadas, a partir de estos ensayos se citan las siguientes prácticas recomendadas:

1. En todos los casos las bandejas portacables deben conectarse a tierra, de acuerdo a lo sugerido por la referencia [72] puesto que se presenta una mayor atenuación de las perturbaciones electromagnéticas; en el caso donde la bandeja no está conectada a tierra el efecto perturbador es máximo.
2. La implementación de bandejas portacables tipo malla en comparación con las de tipo lamina no es tema decisivo en cuanto a la mitigación de perturbaciones CEM, puesto que ambos tipos ofrecen un comportamiento similar.
3. Se debe garantizar la continuidad eléctrica de los tramos continuos de bandeja portacables metálicas, a fin de que la conducción a tierra del ruido que circule a través de ellas se realice correctamente, esta práctica es un factor importante en el comportamiento de la canalización.
4. Durante el tendido de cable de potencia y de datos, sobre una bandeja portacables y en el evento en donde no se cuente con un tabique separador, la distancia entre cables no debe ser menor de 20 cm, esto debido a que la perturbación sobre el cable de datos decrece a medida que aumenta la distancia entre los dos tipos de cables. (Ver Figura 75)



**Distancia de 20cm mínima entre cables (sin separador),
preferiblemente en bandejas portacables independientes**

Figura 75. Distancia de separación recomendada entre bandejas portacables

Fuente: [71]

5. Siempre que sea posible deben colocar los cables de potencia y de datos en bandejas portacables independientes, de igual forma se debe garantizar conexión a tierra (Ver Figura 76) y la continuidad de las mismas (Ver Figura 77). Esto presenta mejores resultados en la atenuación de perturbaciones por cuenta del efecto Faraday. Cuando se utiliza un tabique separador metálico, este ejerce una acción de blindaje de las perturbaciones, de tal manera que la distancia de separación entre cables puede reducirse hasta 10 cm, a partir de esta distancia el efecto atenuador de los tabiques separadores metálicos es aproximadamente el mismo.

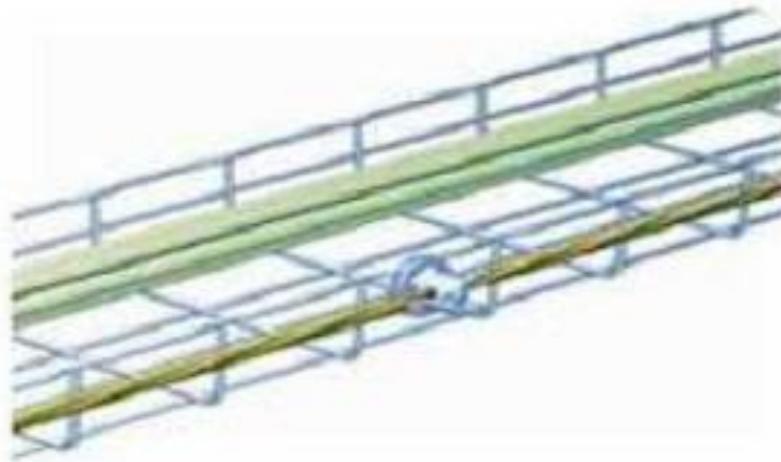
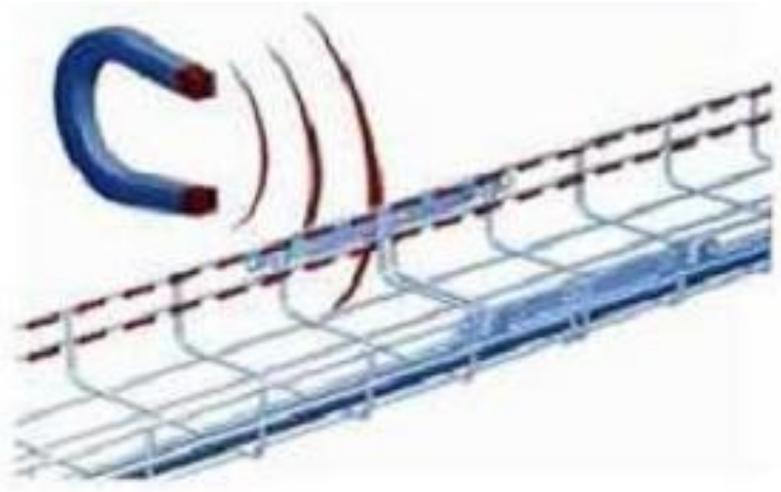


Figura 76. Puestas a tierra en bandejas portacables.

Fuente: [71]



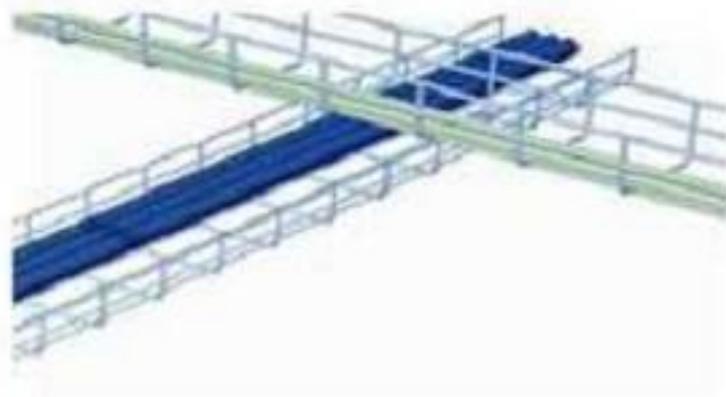
Buena conductividad eléctrica

Figura 77. Conductividad eléctrica en bandejas portacables

Fuente: [71]

6. En el evento en donde se haga necesario un cruce de bandejas portacables, con distintos tipos de cables, estas deben colocarse perpendicularmente lo más cercanas

a un ángulo de 90 grados entre cada uno de los ejes, esto favorece enormemente la mitigación de los efectos causados por la perturbaciones.



Cruce de distintos tipos de cables en ángulos cercanos a los 90 grados

Figura 78. Cruce de distintos tipos de cable en diferentes bandejas portacables

Fuente: [71]

7. La utilización de una bandeja portacables tipo malla hasta una frecuencia de 30 MHz, ofrece un blindaje de hasta 15 dBm (decibelios referidos a un mili vatio) por encima al evento donde se tienen cables sin bandeja portacables metálicas, para la misma distancia entre cables.

9. Buenas prácticas de ingeniería orientadas a la mitigación de los fenómenos de compatibilidad electromagnética: Sistemas de puesta a tierra.

A lo largo de este capítulo, se abordarán las buenas prácticas de diseño de los SPT orientadas a la atenuación de las perturbaciones que generan incompatibilidad electromagnética en los equipos sensibles. En la Sección 9.1, se abordan algunas configuraciones de conexión del sistema de puesta a tierra y estructuras de referencia enfocadas en equipo sensible. De igual modo en la sección 9.2, se abordan algunas prácticas relacionadas con el diseño de sistemas de puesta a tierra para cargas sensibles. Por otro lado en la sección 9.3, se aborda brevemente algunas buenas prácticas para el diseño de sistemas de puesta a tierra en sistemas de protección contrarayos, orientadas a la mitigación de los efectos relacionados con la incompatibilidad electromagnética producto del impulso electromagnético del rayo, durante una descarga atmosférica. Finalmente en el numeral 9.4, se abordan algunas prácticas para el diseño de sistemas de puesta a tierra y cableado en circuitos de potencia. Estas prácticas son ampliamente utilizadas en instalaciones donde existe abundante equipo sensible y han sido identificadas a partir de los estándares como los indicados en las referencias [10], [11] y [38], entre otros.

9.1 Prácticas en la configuración de la conexión y estructuras de referencia para equipo sensible.

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

- Conexión a tierra exclusiva para equipos electrónicos SPG (Single Point Grounding)
- Configuración en árbol TREE

- Estructuras de referencia de señal SRS⁴⁴.

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

La Tabla 28 resume las perturbaciones electromagnéticas mencionadas en este capítulo, y las prácticas en el diseño de los SPT para mitigar su impacto en los equipos electrónicos.

Problema	Sección	Práctica Recomendada	Sección
Perturbaciones conducidas con frecuencias hasta 300 kHz.	2.1.5	Único punto de conexión a tierra SPG	9.1.1
		Configuración tipo ÁRBOL (TREE)	9.1.2
Perturbaciones conducidas con frecuencias que están por encima de 300 kHz.	2.1.5	Estructuras de referencia de señal SRS	9.1.3
Altos valores de inductancia en caminos compuestos por los conductores del SPT.	2.1.7	Estructuras de referencia de señal SRS	9.1.3

Tabla 27. Problemas de compatibilidad de electromagnética y buenas prácticas en la configuración de la conexión y estructuras de referencia para equipo sensible

Fuente: Autores

9.1.1 Conexión a tierra exclusiva para equipos electrónicos SPG.

La configuración Single Point Grounding o SPG, tiene el propósito de minimizar los problemas causados por la circulación de corrientes parásitas a través de lazos formados por el SPT, que causan interferencia afectando las señales y en general la operación de los equipos electrónicos. Para tal fin, es necesario mantener el SPT de los equipos electrónicos separados del resto de elementos puestos a tierra de la instalación, solamente deben interconectarse estas tierras en único punto, tal como lo describe el RETIE [1], en el numeral 15,1 inciso e, por ejemplo la interconexión con la tierra de potencia en donde el neutro y la tierra se conectan; o bien en el panel o tablero principal de alimentación o en el secundario de un sistema derivado independiente (transformador de aislamiento) [10] [18]. Esta configuración se describe en la Figura 81; así mismo en la

⁴⁴SRS (Signal Reference Structures): Estructuras de referencia de señal.

Sección 1: Prácticas en la configuración de la conexión y estructuras de referencia para equipo sensible

Figura 79 y Figura 80, se presenta la conexión a tierra de un pequeño sistema de control y un sistema más robusto respectivamente.

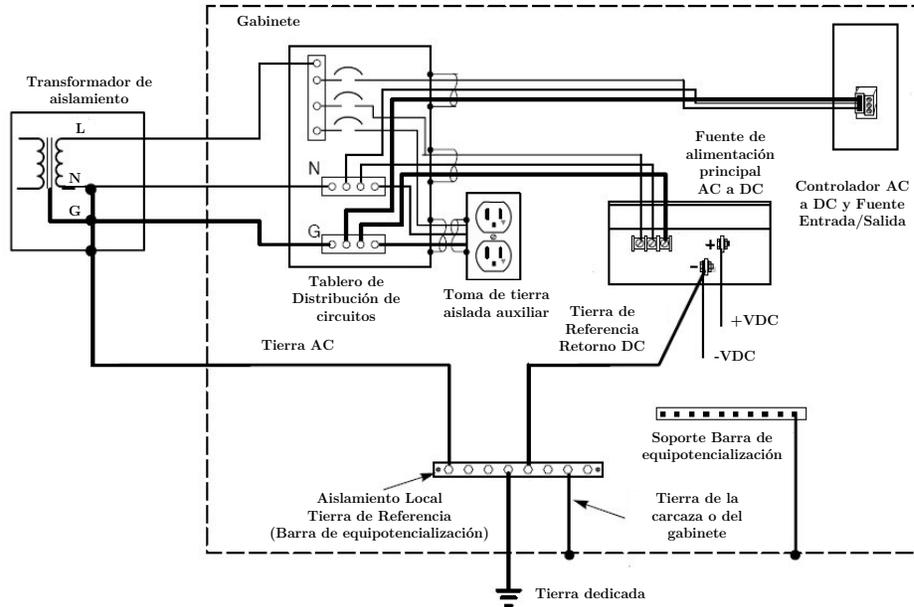
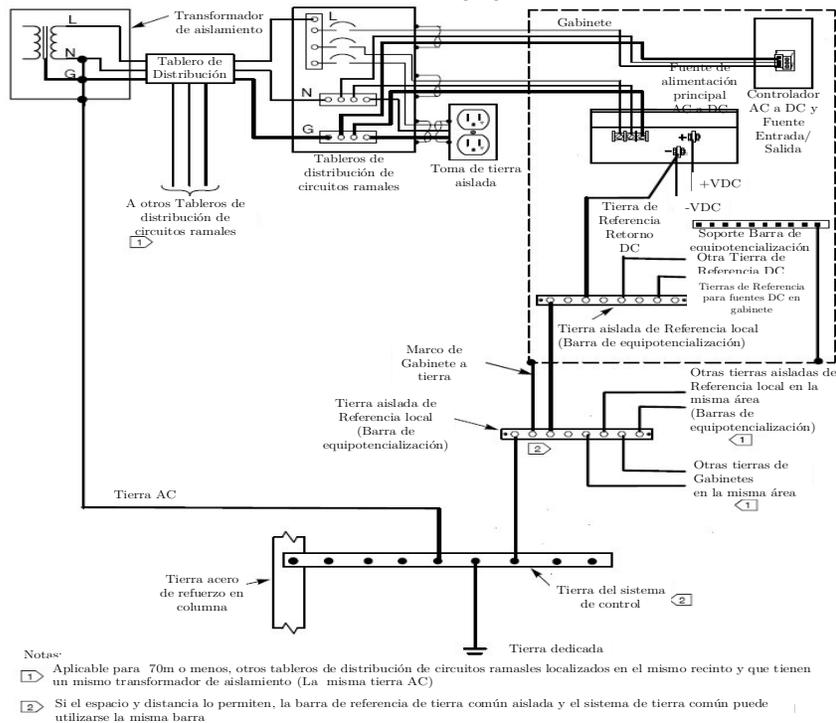


Figura 79. Conexión a tierra exclusiva para equipos electrónicos en un sistema de control alojado en un gabinete

Fuente: [73]



- Notas:
- ① Aplicable para 70m o menos, otros tableros de distribución de circuitos ramales localizados en el mismo recinto y que tienen un mismo transformador de aislamiento (La misma tierra AC)
 - ② Si el espacio y distancia lo permiten, la barra de referencia de tierra común aislada y el sistema de tierra común puede utilizarse la misma barra

Figura 80. Conexión a tierra exclusiva para equipos electrónicos en un sistema de control alojado en múltiples gabinetes

Fuente: [73]

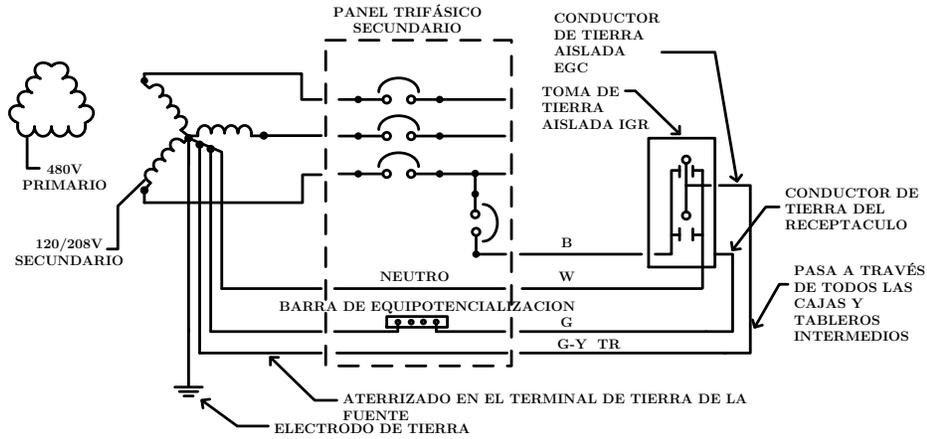


Figura 81. Conductor de puesta a tierra aislada para toma de equipos sensibles.

Fuente: [11].

En la conexión a tierra exclusiva para equipos electrónicos, se utiliza un conductor de tierra aislada EGC (Equipment Grounding Conductor), se recomienda que el color del aislamiento sea verde con una franja amarilla, este conductor tiene como fin controlar en donde se hacen las conexiones con el SPT requeridas. Este conductor parte de una toma especial, cuya tierra se encuentra aislada de la tierra del receptáculo (tierra del sistema de equipotencialización). Este tipo de toma es llamado toma de tierra aislada o IGR “Insulated Grounding Receptacle” (Ver Figura 82).

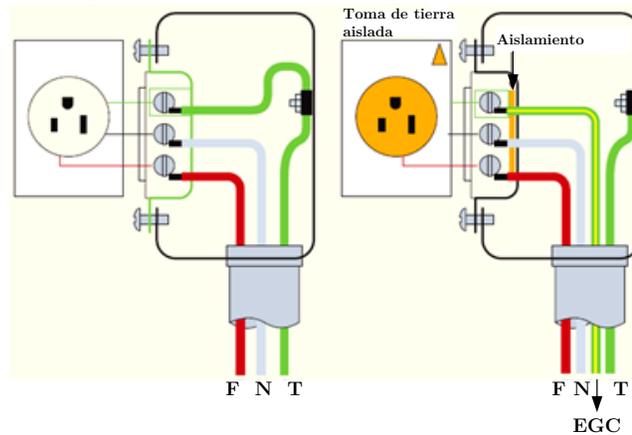


Figura 82. Toma convencional y toma de tierra aislado IGR.

Fuente: [74]

Algunas veces el término “tierra aislada” es interpretado de tal manera que el tomacorriente no debe conectarse al SPT de la instalación y parte de la literatura de los fabricantes, especifican una tierra aislada como una tierra separada para los equipos electrónicos, no equipotencializada con los demás sistemas de puesta tierra de la instalación. Para eliminar esta confusión, se define una “tierra aislada” IG⁴⁵, como una tierra para equipos electrónicos, equipotencializada con las demás sistemas de puesta a

⁴⁵ IG (Isolated ground), hace referencia a una tierra aislada en inglés.

tierra de la edificación y el concepto de una toma de tierra aislada IGR⁴⁶, como aquella toma utilizada para equipo electrónico sensible, que es implementada en sistemas en donde existe una tierra aislada. Si la tierra de la señal por ejemplo de un sistema de control, está conectada a la cubierta metálica del equipo en lugar de estar conectada a la tierra aislada, entonces todas las cubiertas de los componentes o partes que conforman tal equipo deben ser aisladas de la tierra o de un suelo conductor en el cual están soportadas. Esta disposición donde la tierra de señal y la tierra de seguridad es común, pero crea una situación de inseguridad y no se recomienda. De otra forma si la tierra de referencia para señal de los equipos electrónicos (en este ejemplo del sistema de control), está aislada de la cubierta del equipo, entonces no es conveniente o necesario aislar la cubierta del suelo.

9.1.2 Configuración tipo ÁRBOL (TREE)

La configuración tipo árbol corresponde a una variación de la configuración SPG⁴⁷ descrita anteriormente (Sección 9.1.1). Se utiliza cuando un sistema de equipos electrónicos está compuesto por varias tomas, donde el conductor de tierra aislada o equipment-grounding conductor (EGC) debe ser enviado a un punto de unión común dentro de la instalación.

De esta manera se toman varios puntos de conexión de tierra para equipos electrónicos (SPG) en común y se reúnen en un centro de conexión a tierra, asemejándose a un árbol con ramas (Ver Figura 77)

Finalmente, este punto de unión común, se conecta a la tierra aislada o de referencia y esta a su vez con la tierra de la instalación. La unión de estas tierras individuales debe hacerse de forma similar al de un sistema de distribución radial, sin ningún tipo de camino paralelo a tierra. Este es un diseño común en las edificaciones donde existen múltiples pisos y zonas, las cuales contienen grupos separados de equipos en los que existe la necesidad de ser referenciados a un único y central punto de tierra (Tierra aislada o de referencia). La configuración de árbol es típicamente encontrada en instalaciones de telecomunicaciones, donde se emplean grandes plantas de alimentación DC y sistemas de conmutación de telefonía [10], [11].

La aplicación de estas configuraciones se ve limitada en general por sus dimensiones, y en especial por la frecuencia de operación de los equipos aterrizados, pues cualquier sistema de puesta a tierra que utilice conductores largos, presentará mayores impedancias a frecuencias más altas (Ver sección 2.1.5), lo cual es totalmente indeseable.

⁴⁶ IGR (Insulated Grounding Receptacle): Toma de tierra aislada.

⁴⁷ SPG. (Single Point Grounding): Único punto de conexión a tierra.

La impedancia de los caminos de conexión a tierra no es controlable y para una configuración SPG como la mostrada en la Figura 84 en general, se hace muy alta a frecuencias superiores a unos pocos kHz.

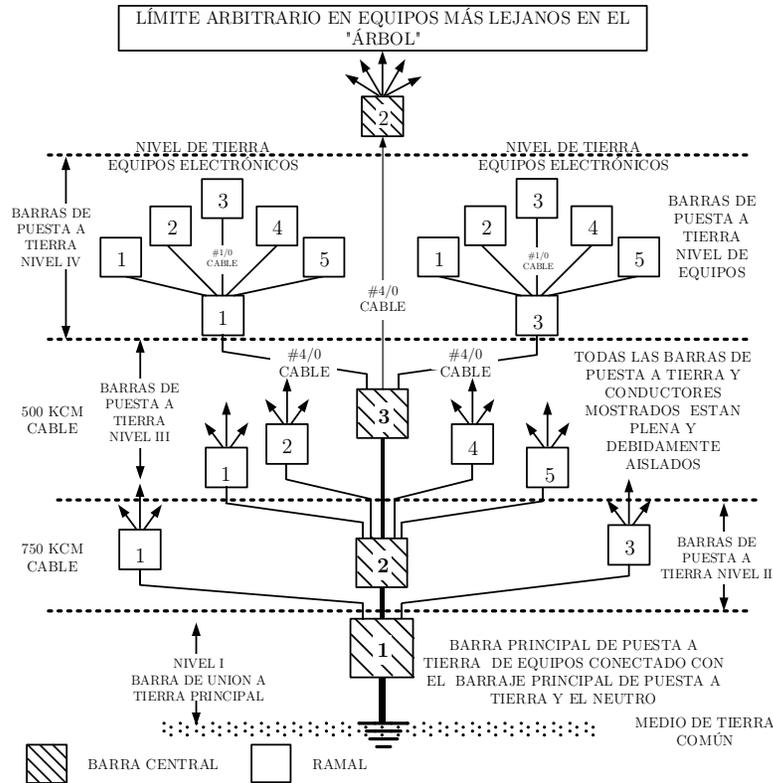


Figura 83. Esquema configuración tipo árbol "TREE".

Fuente: [10].

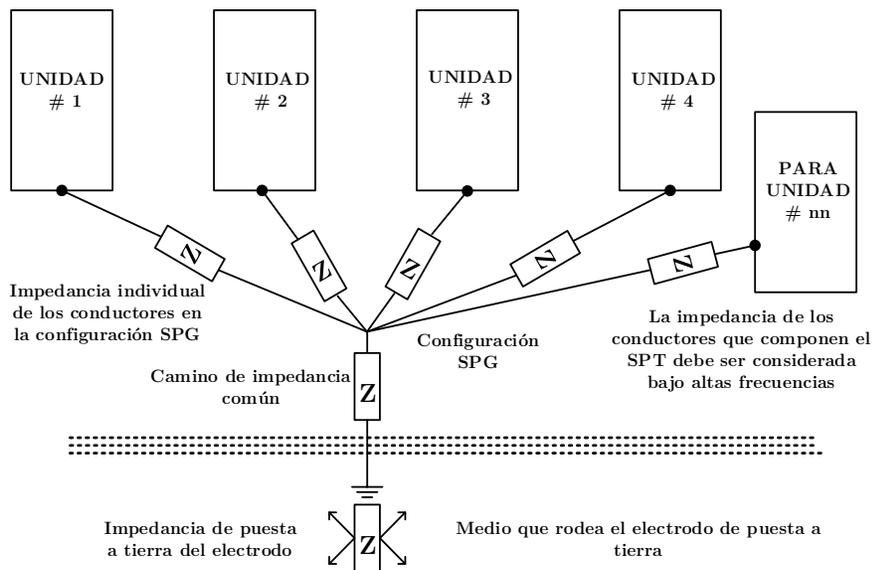


Figura 84. Impedancia de los conductores de puesta a tierra en la configuración SPG.

Fuente: [10]

En general, los diseños de SPG y ÁRBOL, son conocidos por ser útiles para aterrizar equipos que operan con señales analógicas continuas de baja frecuencia y un estrecho ancho de banda, es decir, señales de niveles bajos con rangos de frecuencia desde DC hasta aproximadamente 30 kHz o un poco más altos.

Sin embargo, si las dimensiones eléctricas de las configuraciones SPG o ÁRBOL se mantienen en un diseño compacto, pueden ser efectivas en rangos de frecuencia de hasta 300 kHz puesto que ésta frecuencia aún es relativamente baja con respecto a los tiempos de transición en las señales típicas y los anchos de banda presentes en circuitos de señal como los encontrados en los sistemas de lógica digital, a distancias superiores y frecuencias más altas, las configuraciones SPG y ÁRBOL se vuelven totalmente inadecuadas para su uso y se debe optar por otras configuraciones como las estructuras de referencia descrita a continuación.

9.1.3 Estructuras de referencia de señal SRS⁴⁸.

Para frecuencias por encima de los 300 KHz, se requiere la existencia de una estructura de tierra que imite un plano de tierra equipotencial, interconectando todos los electrodos del sistema de tierra, de forma que todo el sistema este al mismo potencial, esto se logra asegurando una impedancia baja dentro de un amplio espectro de frecuencias de interés (a menudo desde DC a varias decenas de mega Hertz).

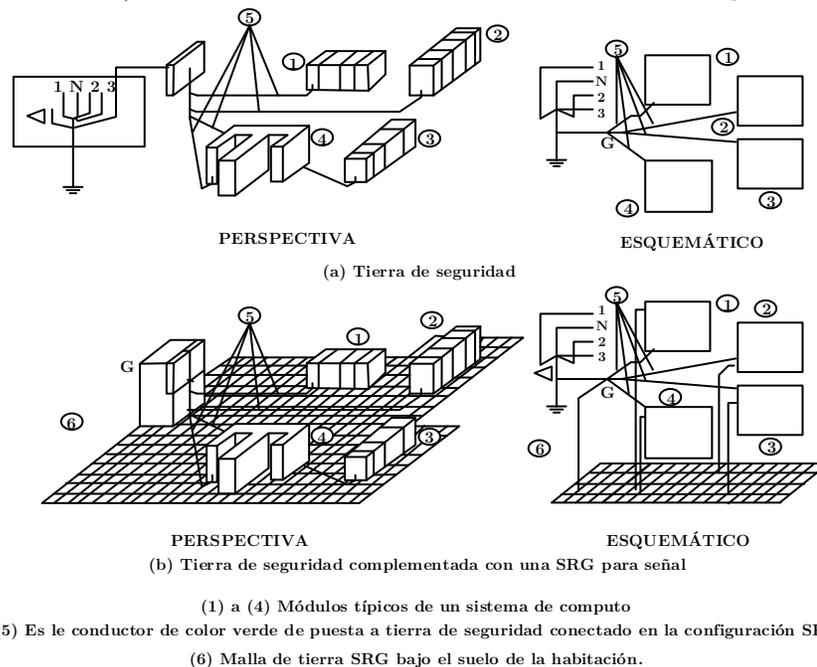


Figura 85. Unidades de electrónica conectadas usando las configuraciones SPG y SRS

Fuente: [11].

⁴⁸ SRS (Signal Reference Structures): Estructura de referencia de la señal.

Para asegurar una baja impedancia para frecuencias por encima de los 300 kHz, se recomienda complementar los conductores EGC⁴⁹, conectados en un solo punto SPG⁵⁰, con la instalación de una estructura de referencia de señal (SRS), la cual está conformada por una malla o plano de referencia de señal bajo toda la habitación y una red de conductores usados para interconectar entre sí: marcos, gabinetes, carcasas o terminales de referencia comunes dentro de un sistema de alimentación de equipos electrónicos (Ver Figura 85).

La aplicación de las SRS puede ser en forma de un plano de referencia de señal (SRP-Signal Reference Plane) o una malla de referencia de señal (SRG-Signal Reference Grid), conectando idealmente por medios directos (Se deben conectar de forma atornillada los equipos a la SRS sin la intervención de un conductor), los correspondientes equipos eléctricos y electrónicos a tierra. Aunque en la práctica es más probable realizar las conexiones mediante múltiples bandas de unión de longitud corta y baja inductancia.

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

- a) Mejorar la fiabilidad de la transferencia de señal entre los elementos interconectados del sistema en la instalación, mediante la reducción del ruido en modo común entre unidades, bajo un amplio rango de frecuencias.
- b) Prevenir daños a los circuitos de señal entre las unidades, proporcionando una inductancia baja y por tanto una referencia de tierra eficaz para todo el sistema exterior de alimentación AC y DC.

Es decir, para el caso de los DPS's, los sistemas de telecomunicaciones y en general circuitos que trabajan a estos niveles de señal.

- c) Evitar o minimizar el daño a nivel de señal entre las unidades cuando ocurre un evento de falla a tierra en el sistema de alimentación.
- d) Disminuir la interferencia electromagnética en y entre los equipos, provocada por campos eléctricos y magnéticos cercanos.

El resultado típico, es un sistema de puesta a tierra de banda ancha (Ver Figura 86) con un buen rendimiento práctico perfectamente compatible con los equipos de telecomunicaciones modernos y otros equipos electrónicos, tales como computadores y equipos de tecnologías de la información. Adicionalmente, este es un diseño de un SPT que no genera conflictos de seguridad con los requerimientos de las normas indicadas por las referencias [18] y [17].

⁴⁹ EGC (Equipment Grounding Conductor): Conductor de puesta a tierra de equipos.

⁵⁰ SPG (Single Point Grounding): Único punto de conexión a tierra.

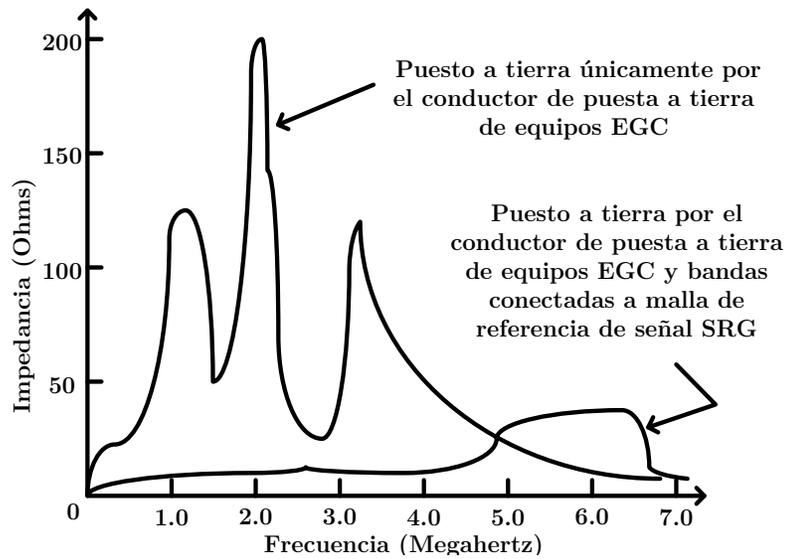


Figura 86. Impedancia de los conductores de puesta a tierra para un centro de cómputo
Fuente: [11].

Planos de referencia de señal SRP.

Una SRP (Signal Reference Plane) corresponde a una masa o masas de material conductor, que conectadas proveen una impedancia baja y uniforme al flujo de corriente para un amplio rango de frecuencias. Estas estructuras se pueden describir mediante una impedancia por unidad de área, considerando una superficie conformada por impedancias dispuestas en ángulos rectos formando cuadrados. De esta manera, las corrientes en que circulan en el Plano de referencia de señal (SRP), son rápidamente dispersadas (y reducidas a corrientes del orden de los mili y micro Amperes), a través de los numerosos cruces y caminos (con resistencias del orden de los mili Ω), desde un punto de inyección hasta el punto de retorno (Ver Figura 87).

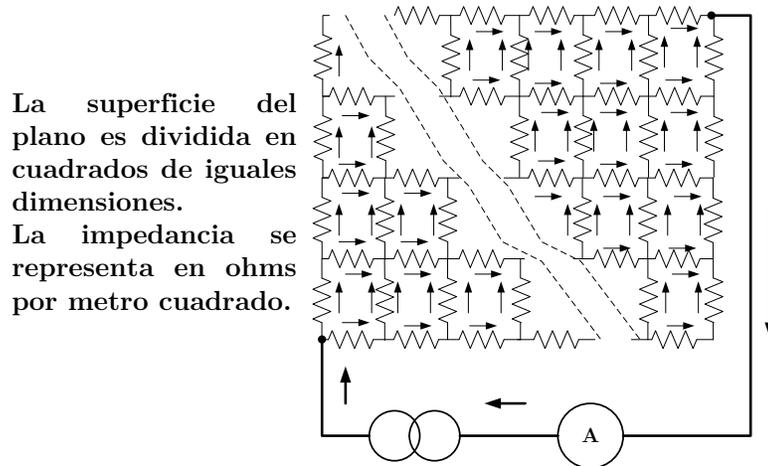


Figura 87. Modelo del flujo de corriente a través de un SRP considerando el modelo de impedancia por metro cuadrado.

Fuente: [10]

Además de minimizar la caída de tensión, la dispersión de la corriente a lo largo del área del Plano de referencia de señal (SRP) reduce los efectos de los campos magnéticos cercanos, relacionados directamente con la amplitud de la corriente, reduciendo de manera significativa la interferencia electromagnética en los equipos conectados.

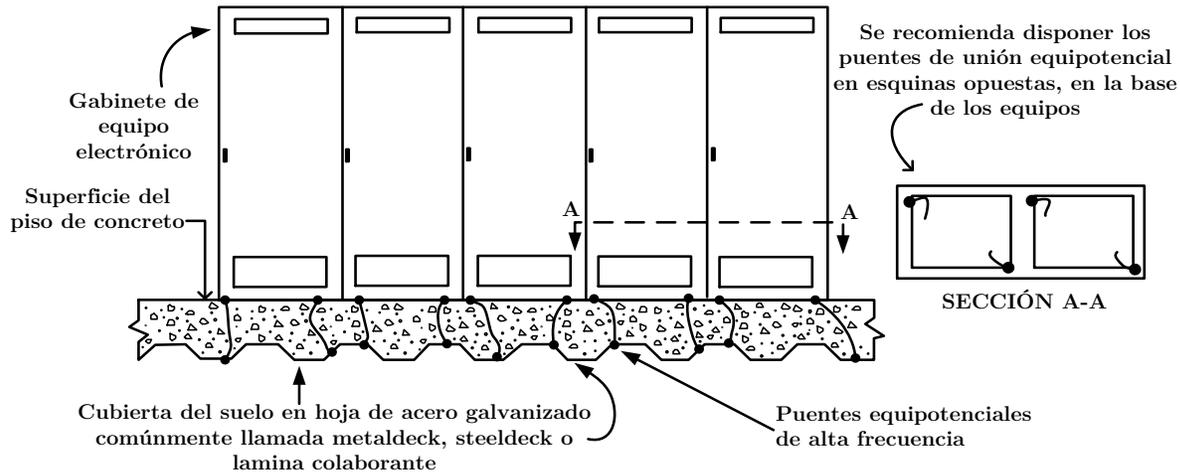


Figura 88. Construcción de una SRP utilizando hojas en acero galvanizado Steel Deck.

Fuente: [10]

Para considerar estas estructuras como un plano equipotencial el área de cobertura debe ser definida de manera cuidadosa, como parte de un circuito de dimensiones eléctricas pequeñas⁵¹. Debido a esta restricción en el tamaño del circuito, el plano equipotencial se encuentra más comúnmente como un componente de un circuito eléctricamente pequeño; tal como el plano de tierra para niveles lógicos, típico de un circuito impreso.

Cuando se consideran estructuras física y eléctricamente grandes, tales como habitaciones completas, suplidas por un plano o una malla de referencia dedicada para el subsistema de tierra de señal, las características de los SRP⁵² no son totalmente extensibles. Sin embargo, esto no quiere decir que los planos y mallas de referencia no sean útiles en estas aplicaciones, pues algunas veces son la única manera de obtener buenos resultados a la hora de diseñar un SPT efectivo dentro de un amplio rango de frecuencias. Como lo indica la Figura 88, un Plano de referencia de la señal típicamente se construye empleando cubiertas metálicas en acero galvanizado, que se conectan a los gabinetes de los equipos mediante uniones o puentes de conexión equipotencial de longitudes aleatorias (ver sección 9.2.3).

⁵¹ Se considera que es un pequeño circuito, solamente cuando la longitud del lazo de corriente es mucho menor que la longitud de onda de la señal sinusoidal de más alta frecuencia presente en el circuito.

⁵² SRP (Signal Reference Plane): Plano de referencia de la señal.

Mallas de referencia de señal SRG⁵³.

Las mallas de referencia de señal pueden considerarse como un Plano de referencia de la señal (SRP) con pequeños espacios cuadrados en su superficie, el perímetro de los agujeros y la longitud de los conductores en este perímetro definen la frecuencia de corte a partir de la cual la SRG rápidamente empieza a perder su efectividad en comparación con una SRP. Mientras la frecuencia se mantenga por debajo de la frecuencia de corte, las Mallas de referencia de señal (SRG) se comportan de una forma muy similar a los Plano de referencia de la señal (SRP) brindando una alternativa económica y práctica para instalaciones eléctricas que involucren equipos electrónicos dispuestos en áreas como habitaciones o salas. Típicamente, una SRG se construye mediante módulos de conductores con intersecciones de aproximadamente 0,6 m x 0,6 m. Esta configuración proporciona una banda de paso efectiva para frecuencias que van desde DC hasta aproximadamente 25 a 30 MHz, lo cual es útil en la mayoría de las aplicaciones. Estas estructuras pueden ser prefabricadas o construidas en el sitio y generalmente no requieren mantenimiento de rutina.

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

- a. Láminas de cobre unidas por soldadura exotérmica, dispuestas sobre el concreto estructural por debajo de alfombras o revestimientos de suelo similares, sin ser apreciablemente perceptibles.
- b. Mallas en alambre de cobre o aluminio.
- c. Mallas en lámina o conductor de cobre, dispuestas sobre el concreto estructural o suspendidas mediante el uso de pedestales (Ver Figura 89) en una subestructura de piso elevado. Un ejemplo de esta configuración es mostrada en la Figura 90. La separación de 0.6 m x 0.6 m es ideal para esta práctica puesto que concuerda con las dimensiones estandarizadas de los pisos elevados.

Separaciones más grandes entre los conductores SRG no son recomendables, pues el límite superior de frecuencia de tales diseños, se degrada rápidamente a medida que aumenta el espaciamento. Por otra parte, arreglos con separaciones más pequeñas pueden utilizarse para mejorar el rendimiento de las Mallas de referencia de señal (SRG), de acuerdo con las necesidades de la instalación. Sin embargo, el uso de un módulo más pequeño implica que la SRG no se instale como una malla suspendida, justo debajo del nivel de la baldosa en un sistema de piso elevado, dificultando el acceso a los cables y otros elementos de soporte situados debajo del piso.

⁵³ SRG (Signal Reference Grid): Malla de referencia de la señal.

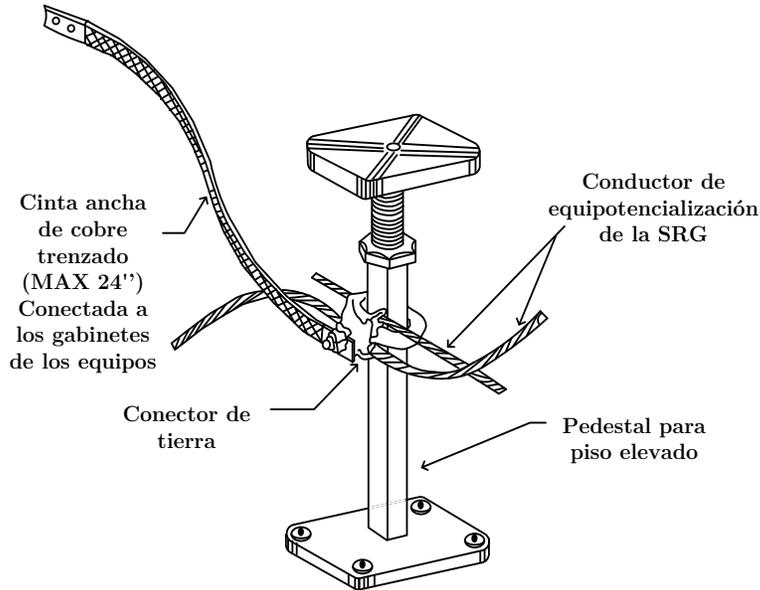


Figura 89. Pedestal para subestructura de piso elevado y conductores que componen la SRG.

Fuente: [10]

Cuando no es práctico o posible la utilización de los métodos mencionados (específicamente, cuando el equipo se encuentra en áreas fuera de las salas de equipos), otras alternativas de construcción de una Mallas de referencia de señal (SRG) implican el uso de mallas electro-soldadas, tales como las usadas en el hormigón de refuerzo (Ver Figura 91), así como entrepiso en acero galvanizado entre otras alternativas. (Ver Anexo E: Recomendaciones para la construcción de las mallas de referencia de señal SRG)

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

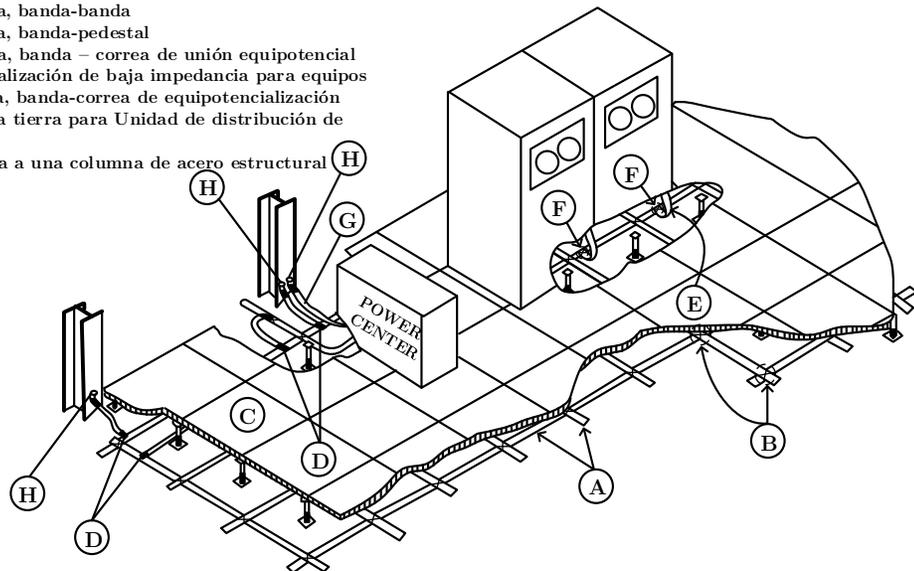


Figura 90. Esquema de conexiones de una SRG utilizando una estructura con piso elevado.

Fuente: [10]

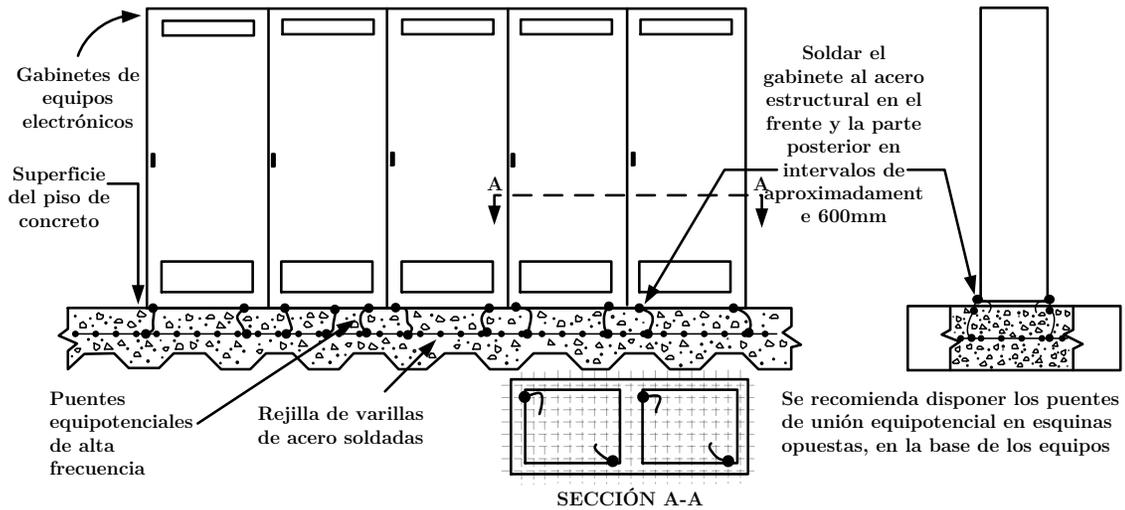


Figura 91. Uso de varillas de acero estructural como alternativa para una SRG.

Fuente: [10]

9.2 Prácticas en el diseño de SPT para equipos sensibles.

Los múltiples conductores de interconexión entre Estructuras de referencia de señal SRS⁵⁴ y los equipos, y en general los conductores de equipotencialización también se ven sometidos a corrientes y tensiones dentro de un amplio rango de frecuencias.

Problema	Sección	Práctica Recomendada	Sección
Altas impedancias en las conexiones a tierra bajo altas frecuencias.	2.1.5	Conductores delgados y anchos con long. Inferiores a $\lambda/20$.	9.2.1
Autoresonancia en los conductores del SPT	2.1.6	Conductores con long. que difieren en un 20 %	9.2.2
Altos valores de inductancia en caminos compuestos por los conductores del SPT.	2.1.7	Juntar y atornillar directamente las carcasas de los equipos	9.2.3

Tabla 28. Problemas de compatibilidad de electromagnética y buenas prácticas en el diseño de los SPT de equipos sensibles

Fuente: Autores

⁵⁴ Se aclara que las estructuras de referencia de señal son aplicables únicamente en edificaciones individuales, que cuenten con un sistema de alimentación derivado independiente.

El objetivo en el dimensionamiento de estos conductores es que en conjunto, formen un camino útil de baja impedancia para el flujo de corriente a través de ellos para todas las frecuencias de interés. Si este dimensionamiento se realiza adecuadamente, puede utilizarse con éxito para limitar el desarrollo de potenciales no deseados a través de los extremos de estas uniones.

La Tabla 28 resume las perturbaciones electromagnéticas mencionadas en este capítulo, y las prácticas en el diseño de los SPT para mitigar su impacto en los equipos electrónicos.

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

Para minimizar la impedancia expuestas a altas frecuencias de las interconexiones entre las SRP's o SRG's y los equipos, se recomienda utilizar conductores tipo lámina o con una geometría similar. Adicionalmente, se requiere que la longitud eléctrica⁵⁵ de estos conductores sea una fracción de la longitud de onda λ de la señal sinusoidal de mayor valor de frecuencia presente en el circuito, sin exceder ($\lambda / 20$) para la frecuencia más alta esperada. Aunque esta es una restricción adecuada para la mayoría de las aplicaciones comerciales, las aplicaciones más críticas⁵⁶ pueden requerir límites de aproximadamente ($\lambda / 50$) o menos.

Adicionalmente, de acuerdo con el estándar indicado en la referencia [10], se recomienda que las conexiones se realicen preferiblemente mediante soldadura exotérmica, esto permite minimizar su impedancia bajo altas frecuencias. En este sentido se recomienda utilizar bandas en cobre, aluminio o acero (no crear par galvánico cuando esta soldado a gabinetes del mismo material).

9.2.2 Dimensionamiento de los conductores de equipotencialización para mitigar fenómenos de autoresonancia.

Teniendo en cuenta el problema descrito en la sección 2.1.6, la relación entre los múltiplos enteros de $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda y las condiciones de longitud de resonancia del conductor de equipotencialización se determina por la siguiente expresión.

⁵⁵ Se considera que es un pequeño circuito, solamente cuando la longitud del lazo de corriente es mucho menor que la longitud de onda de la señal sinusoidal de más alta frecuencia presente en el circuito.

⁵⁶ Para este caso se consideran aplicaciones con frecuencias de operación los 25 MHz.

$$L_{\text{resonancia}} = \frac{cn}{4 f_{\text{resonancia}}}$$

Ecuación 9-1

Dónde:

$L_{\text{resonancia}}$: Es la longitud de resonancia del conductor [m].

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

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

$f_{\text{resonancia}}$: Es la frecuencia de excitación en el conductor [Hz].

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

De esta manera, para evitar la resonancia se recomienda emplear múltiples conductores de equipotencialización de longitudes diferentes. Así, mientras que una ruta puede ser sometida a las condiciones de resonancia, las otras no. Por lo general, una diferencia del 20% en las longitudes de los conductores será suficiente para que no exista resonancia. Adicionalmente, para minimizar los efectos indeseables del acoplamiento mutuo (debido a los campos cercanos, principalmente inductivo), la mejor práctica es instalar los conductores de conexión a tierra en esquinas opuestas de los armarios de equipamiento. Así, los conductores de puesta a tierra tendrán rutas inductivas relativamente independientes de corriente y dado que están en paralelo, se presentará una impedancia más baja a través de esta conexión.

9.2.3 Dimensionamiento de los conductores del SPT para minimizar inductancia y capacitancia parasitas.

Como se describió en la sección 2.1.7, los caminos y conexiones típicas del sistema de puesta a tierra poseen una inductancia y capacitancia parasita que no debe ser ignorada. La mejor alternativa para reducir las perturbaciones electromagnéticas asociadas a estos parámetros, consiste en juntar y atornillar directamente la superficie de las carcasas de unidades electrónicas cercanas, con el fin de eliminar la necesidad de usar conductores de equipotencialización discretos. Esta acción aborda el problema, reduciendo al mínimo la capacitancia parásita entre las unidades y de igual forma elimina virtualmente la inductancia a través del camino/unión de tierra, dando como resultado, incluso para altos picos de corrientes transitorias, una tensión desarrollada baja. De esta manera, los circuitos de señal que interconectan dos equipos no estarán sometidos a altos valores de perturbación de modo común (Ver Anexo C sección 0).

9.3 Prácticas en el diseño de SPT para sistemas de protección contra rayos

A continuación, se resume mediante la Tabla 29, las perturbaciones electromagnéticas mencionadas en este capítulo y las prácticas en el diseño de los SPT, para mitigar su impacto en los sistemas de protección contra rayos.

Problema	Sección	Práctica Recomendada	Sección
Diferencias de potencial.	2.2.1	Integración de los elementos metálicos de la estructura en una RE.	3.1
Acumulación de carga estática	2.2.1		
Problemas de referencia en los equipos al interior de la edificación.	2.2.1		
Campos magnéticos	2.2.3		3.2
Sobretensiones	2.2.2	Posicionamiento óptimo de los conductores de puesta a tierra.	9.3.2
Altas impedancias presentadas por los elementos que componen el SPT.	2.2.4	Consideraciones en el dimensionamiento de los conductores bajantes.	9.3.3
		Tratamiento químico del terreno	9.3.3

Tabla 29. Problemas de compatibilidad de electromagnética y buenas prácticas en el diseño de los SPT de SIPRA para su mitigación

Fuente: Autores.

9.3.1 Integración de los elementos metálicos de la estructura en una red de equipotencialización RE.

La norma internacional que se identifica como la referencia [38], requiere que todos los elementos de un SPT estén conectados entre sí formando una red de equipotencial RE. Teniendo en cuenta que, tanto la cimentación como las columnas de grandes estructuras y plantas industriales utilizan concreto reforzado, las varillas de refuerzo en los cimientos, paredes y losas de cimentación pueden integrarse a la red equipotencial. Adicionalmente, el acero estructural puede ser conectado directamente al sistema de captación (Ver sección 3.1), de tal forma que actúen como bajantes naturales complementando los conductores bajantes del Sistema de protección contra rayos. Por su parte, las varillas de refuerzo pueden ser empleadas como un excelente electrodo de

puesta a tierra⁵⁷. Esta configuración logra una efectiva puesta a tierra a un costo mínimo. Además, la estructura de acero de la construcción, puede ser utilizada de manera efectiva para referenciar el sistema de suministro de energía eléctrica, telecomunicaciones e instalaciones electrónicas de la construcción [4].

Cuando se establecen uniones equipotenciales en los sistemas al interior de una ZPR, las corrientes parciales del rayo pueden fluir dentro de estos sistemas. Por lo tanto, este efecto debe ser considerado en el diseño de las zonas de protección, la coordinación de DPS y la ubicación de los equipos al interior del edificio (blindaje espacial), dentro de un “volumen de seguridad”⁵⁸ definido (Ver sección 3.3 Buenas prácticas mediante la definición de Zonas de protección y sistema coordinado de DPS).

9.3.2 Posicionamiento de los conductores de puesta a tierra y conexión con la estructura de la edificación [20].

Teniendo en cuenta que en edificios de gran altura se recomienda integrar la estructura metálica de refuerzo del edificio como conductores bajantes (Ver sección 9.3), cuando un edificio es golpeado por un rayo se producen altas sobretensiones entre los conductores de puesta a tierra al interior de la construcción y la estructura del edificio (ver sección 2.2.2).

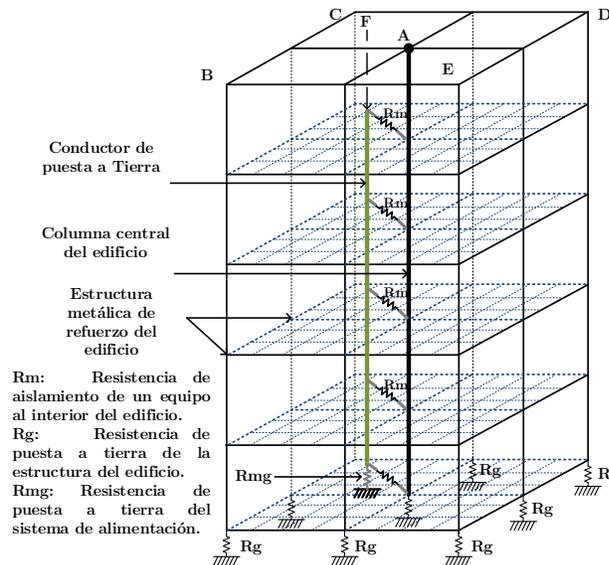


Figura 92. Modelo de la estructura de refuerzo y los conductores de puesta a tierra.

Fuente: [20]

Bajo las condiciones presentadas en el párrafo anterior, la corriente de rayo que fluye en las columnas exteriores es mayor que en la columna central, esto debido al efecto piel (Ver Figura 92). A partir de esto, el método de conexión a tierra de los electrodos y la

⁵⁷ Siempre y cuando se cumplan los requerimientos de [4] sección 5.4.

⁵⁸ Más detalles sobre la ubicación de equipos, consulte el ANEXO A en la referencia [38].

forma como se disponen los conductores de puesta a tierra al interior del edificio, toma gran importancia.

Como lo indica la Figura 93, investigaciones han mostrado una relación logarítmica entre las sobretensiones entre los conductores de puesta a tierra y la columna central del edificio, respecto a la distancia entre los mismos (Ver Figura 94), independientemente de la simetría de la construcción. Igualmente, indica que al instalar los conductores de puesta a tierra de los equipos lo más cerca posible de la columna central del edificio, se reduce de manera significativa (hasta un 40%) las sobretensiones debidas a las descargas atmosféricas.

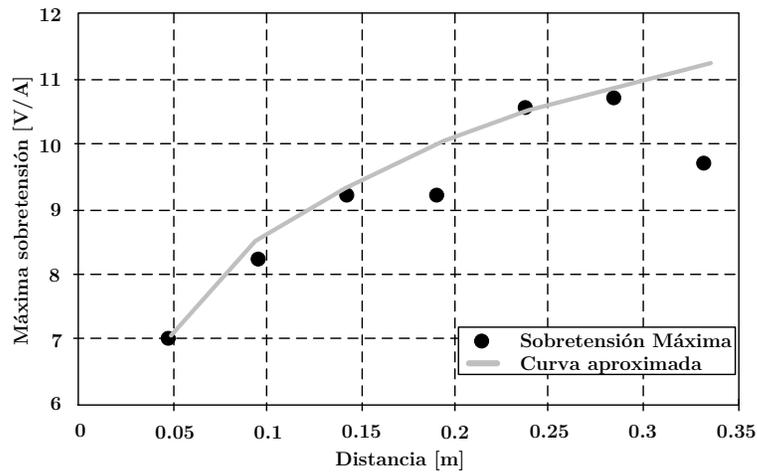


Figura 93. Máxima sobretensión presentada entre el conductor de puesta a tierra y la estructura vs distancia entre ellos.

Fuente: [20].

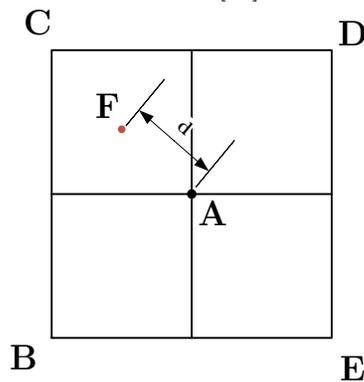


Figura 94. Distancia entre el conductor del SPT y la columna central de la construcción.

Fuente: [20].

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

como el método de “conexión a tierra común”. Entre estos dos métodos, se recomienda la aplicación del método de “conexión a tierra común” respecto al de “conexión a tierra independiente”, pues este reduce las sobretensiones hasta en un 54% [20].

9.3.3 Dimensionamiento de componentes del SPT de los SIPRA.

La efectividad del SIPRA depende de forma significativa de la disposición y el dimensionamiento de los conductores del SPT [41]. Por esta razón, el diseñador debe tener consideraciones especiales para garantizar que la respuesta del sistema contribuya a mitigar los problemas de compatibilidad electromagnética.

9.3.3.1 Dimensionamiento de los electrodos de puesta a tierra en los SIPRA.

La instalación de contrapesos de longitudes considerables, es una práctica común para reducir la resistencia de puesta a tierra de un sistema de electrodos [75]. Sin embargo, la impedancia de puesta a tierra de estos arreglos bajo altas frecuencias es mayor que la de un electrodo de menor longitud, aunque la resistencia de tierra en estado estacionario medida por un instrumento convencional indique lo contrario. De esta manera, una baja resistencia de puesta a tierra en estado estacionario, no siempre representa una tierra de baja impedancia para altas frecuencias, puesto que la efectividad de los sistemas de puesta a tierra a alta frecuencia está principalmente influenciada por las caídas de tensión inductivas [76].

Por lo tanto, la aplicación de electrodos de grandes longitudes no permite reducir la impedancia de puesta a tierra, luego la aplicación no es adecuada para la protección contra rayos y sobretensiones (Ver sección 2.3.2).

9.3.3.2 Consideraciones en el dimensionamiento de conductores bajantes [4].

Para cada elemento de captación, deben disponerse al menos dos conductores bajantes y deben ser distribuidos alrededor del perímetro de la estructura a ser protegida con separaciones iguales, sujeto a restricciones arquitectónicas y prácticas. La Tabla 30, indica valores típicos de la distancia entre bajantes y entre los conductores de anillo de acuerdo con el nivel de protección contra rayos (NPR).

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

Tabla 30. Valores típicos de distancia entre conductores bajantes.

Fuente: [4]

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

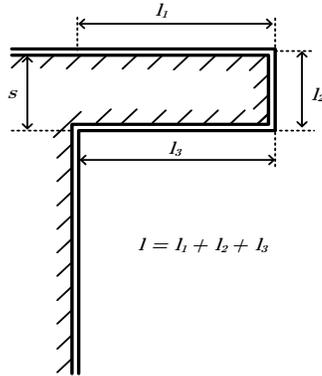


Figura 95. Bucle en un conductor bajante.

Fuente: [4]

La formación de bucles debe evitarse, pero cuando no es posible la distancia s indicada en la Figura 95, debe ser mayor al valor obtenido a partir de la siguiente expresión y considerando los coeficientes de la Tabla 31, Tabla 32 y Tabla 33:

$$s = k_i \frac{k_c}{k_m} l$$

Ecuación 9-2

- k_i Depende de la clase de SIPRA seleccionado.
- k_c Depende de la corriente eléctrica que circula por los conductores bajantes.
- k_m Depende del material del aislamiento eléctrico.
- l Es la longitud, en metros del conductor bajante, desde el punto donde la distancia de separación debe ser considerada, hasta el punto más cercano de compensación de potencial.

Nivel de protección contra rayos NPR	k_i
I	0,08
II	0,06
III	0,04
IV	0,04

Tabla 31. Aislamiento entre elementos del SIPRA externo – Valores de coeficientes k_i

Fuente: [4]

Número de Conductores bajantes n	k_c
1	1
2	1 ... 0,5
4 y más	1 ... 1/n

Tabla 32. Aislamiento entre elementos del SIPRA externo – Valores de coeficientes k_c

Fuente: [4]

Material	k_m
Aire	1
Concreto, ladrillos	0,5
NOTA 1: Cuando hay varios materiales aislantes en serie, es una buena práctica utilizar el valor más bajo para k_m NOTA 2: El uso de otros materiales de aislamiento está bajo consideración.	

Tabla 33. Aislamiento entre elementos del SIPRA externo – Valores de coeficientes k_m

Fuente: [4]

9.3.3.3 Tratamiento del terreno.

Teniendo en cuenta que la impedancia de puesta a tierra se desarrolla en gran medida en la zona circundante al punto de inyección del terreno, donde igualmente se encuentra el electrodo de puesta a tierra, es un concepto razonable tratar dicha región para disminuir su resistividad, puesto que los impulsos de frente rápido son dispersados más efectivamente en suelos con baja resistividad cerca del punto de inyección de corriente. Se recomienda tratar el terreno mediante la adición de tierra de alta conductividad y agentes reductores a la hora de diseñar el sistema de puesta a tierra para sistemas de protección contra rayos [22].

9.4 Prácticas en el diseño del SPT y cableado en circuitos de potencia.

Un sistema eléctrico puede ser puesto a tierra a través de varios métodos (Ver Anexo D: Métodos de conexión a tierra):

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

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

A su vez, los componentes de un sistema de puesta a tierra se pueden dividir en dos bloques: Puesta a tierra o electrodo de puesta a tierra (bajo el nivel del piso), y la red de equipotencialización (sobre el nivel del piso) [9].

El adecuado dimensionamiento y diseño de estos componentes garantiza la seguridad y la mitigación los problemas de compatibilidad electromagnética, permitiendo al sistema operar de manera óptima.

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

Problema	Sección	Práctica recomendada	Sección
Perturbaciones causadas por malas prácticas de cableado y conexión a tierra.	2.2.1	Buenas prácticas de conexión a tierra y cableado de circuitos de potencia.	9.4.3
Contenido de armónicos en la red.	2.2.2	Transformador de aislamiento	4.2.2
		Separación de circuitos	9.4.4
Carga Estática	2.2.3	Buenas prácticas de conexión a tierra y cableado de circuitos de potencia.	9.4.3
Problemas causados por altas impedancias de puesta a tierra.	2.1.4	Buenas prácticas para disminuir la impedancia de puesta a tierra	9.4.1

Tabla 34. Problemas de compatibilidad de electromagnética y buenas prácticas en el diseño de los SPT de potencia para su mitigación.

Fuente: Autores

9.4.1 Disminución de la impedancia de puesta a tierra y mejoramiento de la distribución de potencial en el terreno.

Los electrodos de puesta a tierra son los elementos encargados de distribuir la corriente eléctrica en el terreno. Dependiendo de la distribución espacial y las dimensiones, se originarán en el terreno los perfiles de tensión que definirán si el diseño de una puesta a tierra cumple con los valores máximos tolerables de tensión de paso y contacto [9]. El arreglo de electrodos de puesta a tierra puede estar conformado por uno o varios de los siguientes tipos de elementos: Varillas, Tubos, Placas, Flejes, Cables, Electrodos embebidos en concreto (también conocidas como tierras Ufer⁵⁹)

9.4.1.1 Estructuras metálicas de las cimentaciones (Ver sección 9.3)

La configuración de una malla horizontal en el terreno de forma rectangular es recomendada, pues la corriente a lo largo de cualquiera de los conductores es descargada a tierra de una forma muy uniforme, reduciendo las diferencias de potencial en el terreno.

⁵⁹ Este método de toma de tierra eléctrica fue desarrollada durante la Segunda Guerra Mundial por Herbert G. Ufer, de allí su nombre, estas tierras utilizan un electrodo revestido de concreto para mejorar la toma de tierra en las zonas secas. La técnica se utiliza en la construcción de cimientos de hormigón.

Sin embargo, una gran parte de la corriente es descargada desde los conductores de la periferia de la malla luego las tensiones de paso y de contacto presentaran los valores más altos en esta zona. Una forma efectiva para hacer que la densidad de corriente sea más uniforme entre los conductores del centro y la periferia es emplear un espaciamiento no uniforme, con espaciamientos mayores entre conductores del centro y menores hacia los conductores del perímetro, tal y como lo muestra la Figura 96 [19].

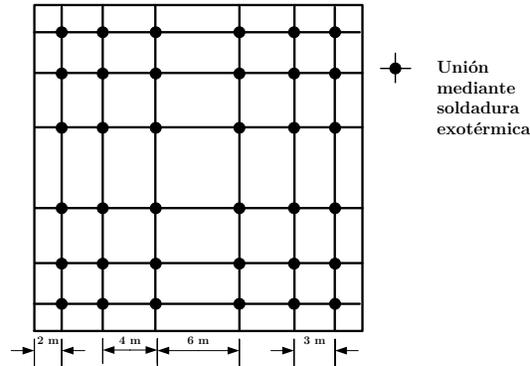


Figura 96. Espaciamiento no uniforme de los conductores de la malla de puesta a tierra.
Fuente: Autores.

Para un área dada, el efecto en la resistencia de incrementar el número de rejillas puede contribuir a disminuir la resistencia de puesta a tierra hasta cierto punto (ver Figura 97) puesto que este decrecimiento rápidamente se vuelve insignificante para grandes números de rejillas (o espaciamiento entre conductores menor). Igualmente, las tensiones de paso y de contacto pueden ser reducidas aumentando el número de rejillas (disminuyendo la distancia entre conductores) hasta un determinado límite de saturación, como lo indican la Figura 98 y Figura 99.

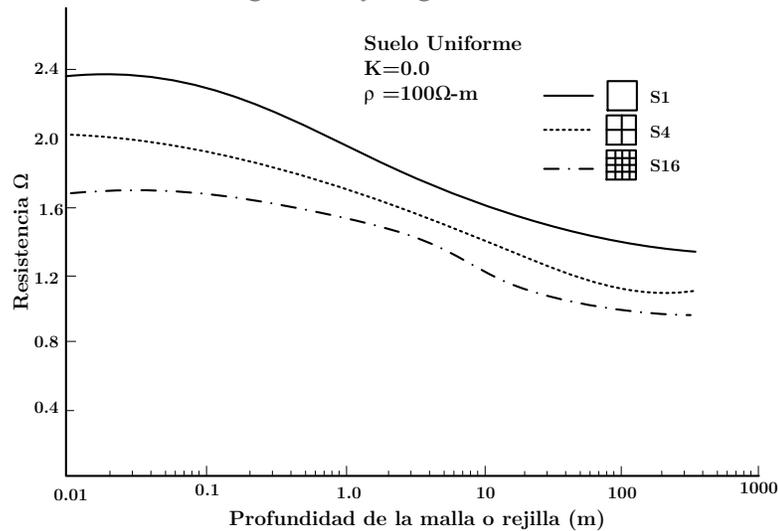


Figura 97. Resistencia de puesta a tierra para diferentes configuraciones de rejillas y diferentes profundidades en un área específica.

Fuente: [19].

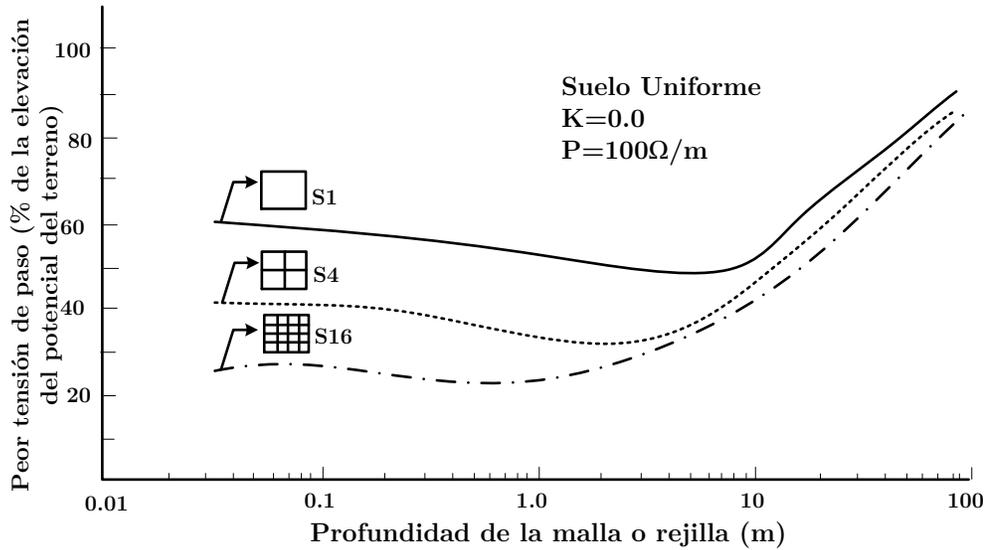


Figura 98. Tensión de contacto para diferentes arreglos de rejillas y profundidad de enterramiento en un área dada.

Fuente: [19]

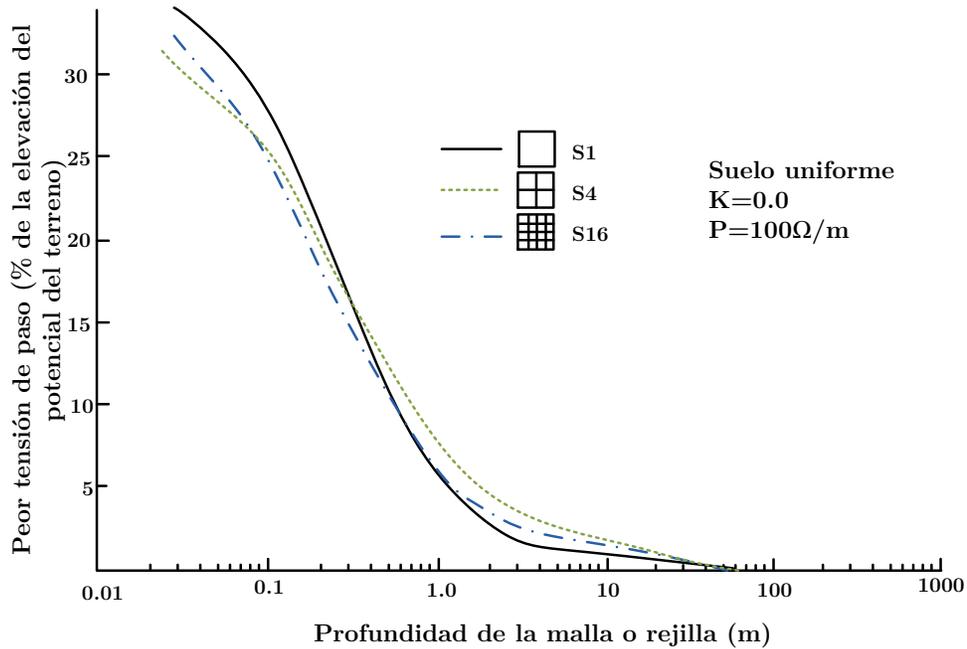


Figura 99. Tensión de paso para diferentes arreglos de rejillas y profundidad de enterramiento en un área dada.

Fuente: [19]

Por su parte, el uso de varillas como electrodos de puesta a tierra, es recomendado dado que estos, al atravesar las capas del terreno, disminuyen la dependencia de la resistencia de puesta a tierra, del contenido de humedad del suelo [77]. Adicionalmente, las varillas descargan mucha más corriente en el terreno que los conductores de las

rejillas. Esta corriente en la varilla también es descargada principalmente en su parte más baja, reduciendo las tensiones de paso y de contacto de manera significativa. El aumento en el número y longitud de los electrodos, también contribuye a disminuir la resistencia de puesta a tierra hasta determinados niveles, teniendo en cuenta la influencia del efecto mutuo entre ellos.

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

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

La referencia [1], permite realizar un diseño simplificado del sistema de puesta a tierra para subestaciones tipo poste, siempre y cuando se tenga en cuenta los parámetros de resistividad y corriente de falla que se puedan presentar, garantizando el control de las tensiones de paso y de contacto.

En la práctica, la puesta a tierra de este tipo de subestaciones se hace enterrando un electrodo que cumpla con las características de la Tabla 15.2 en la referencia [1]. Sin embargo ocasionalmente un solo electrodo puede proveer el valor de resistencia deseado.

La Tabla 35, especifica la máxima impedancia de puesta a tierra permitida para subestaciones de distribución

Cuando la resistencia de puesta a tierra objetivo no es alcanzada, electrodos suplementarios son adicionados tal y como lo muestra la Figura 101. Sin embargo existe un límite en el número de electrodos suplementarios que pueden ser usados en relación con el grado de mejoramiento en la resistencia de puesta a tierra [78], como lo muestra la Figura 100.

Descripción	Nivel (kV)	Z máxima (Ω)
Subestación de distribución	34,5	10
Subestación de distribución	13,2	10
Protección contra rayos	13,2-34,5	10
Redes de baja tensión	B.T.	20
Acometidas	B.T.	25

Tabla 35. Impedancias de puesta a tierra.

Fuente: [79]

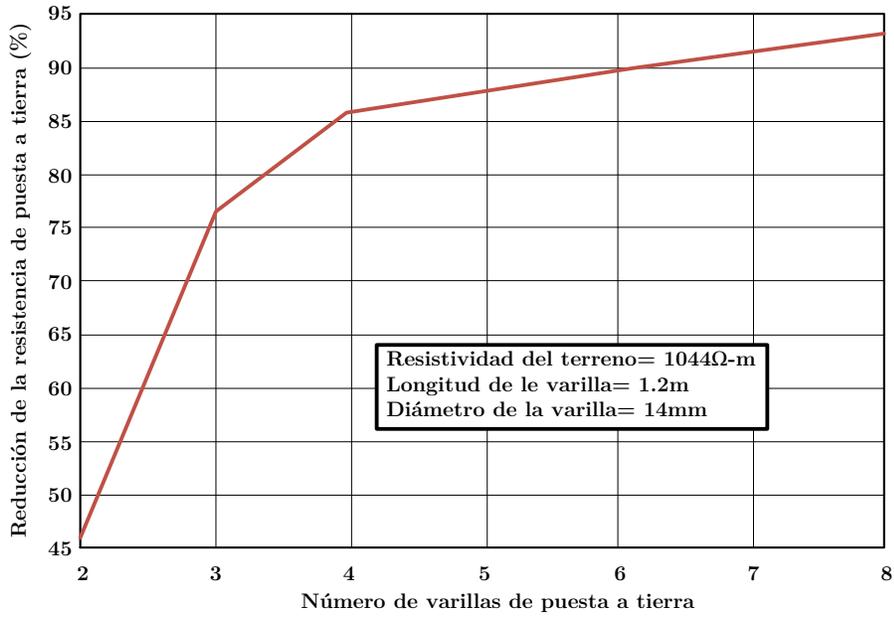


Figura 100. Curva de respuesta de electrodos de puesta a tierra conectados en paralelo.
 Fuente: [78].

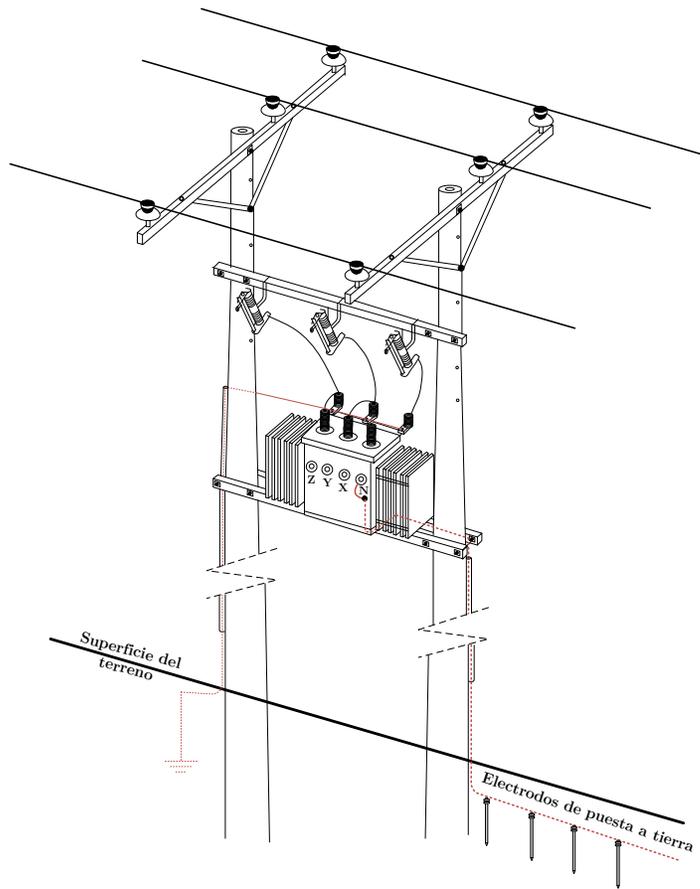


Figura 101. Puesta a tierra de una subestación aérea.
 Fuente: Autores.

De esta manera, resulta económicamente inviable introducir más electrodos en el terreno para disminuir la resistencia de puesta a tierra después de que se haya alcanzado el límite. Se ha observado que se encuentran significativas reducciones de la resistencia al agregar el segundo, tercer y cuarto electrodo en el terreno. En la Figura 100 se observa que más del 85% de la reducción fue obtenida en el cuarto electrodo y que el porcentaje de reducción del valor de la resistencia empieza a saturarse desde el quinto electrodo. Por lo tanto el número óptimo para reducir la resistencia de puesta a tierra de un sistema de electrodos es cinco. Cuando no se alcanza la resistencia objetivo, es recomendable la aplicación de una tierra artificial o tratamiento del terreno e [78].

9.4.2 Consideraciones en el tratamiento del terreno para reducir la impedancia de puesta a tierra [11], [9].

La tierra puede considerarse infinita en el tamaño, comparada con las dimensiones del sistema de electrodos de puesta a tierra, de la misma manera lo es su capacidad para absorber una cantidad prácticamente ilimitada de corriente. Sin embargo, en la práctica esta corriente ilimitada inyectada al terreno se transmite a través de la interfaz metal-suelo de los electrodos de puesta a tierra. De esta manera, alrededor del electrodo de puesta a tierra, la resistencia del terreno es la suma de las resistencias en serie de las capas virtuales del terreno que se encuentran progresivamente hacia el exterior de la varilla. La capa más cercana a la varilla tiene la sección de menor área, por lo que posee la mayor resistencia. Las capas sucesivas hacia afuera, tienen áreas cada vez mayores, luego su resistencia es menor. A medida que la distancia radial desde el electrodo aumenta, la resistencia por unidad de radio decrece a valores cercanos a cero.

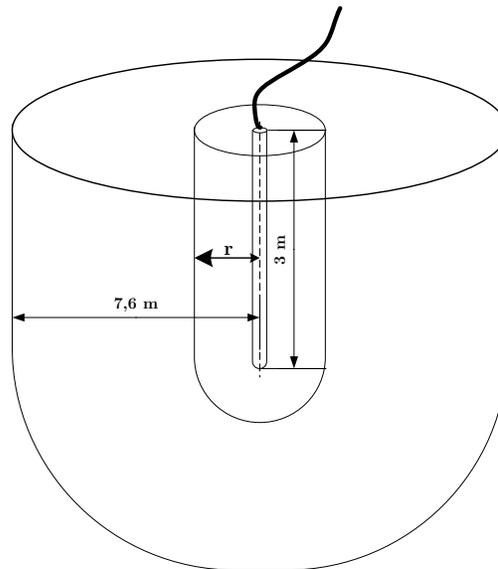


Figura 102. Desarrollo de la resistencia de un electrodo.

Fuente: [11].

La Figura 102, muestra un electrodo de diámetro de 16 mm, con 3 m de longitud de enterramiento. El camino de la corriente de tierra hacia el exterior de la superficie del electrodo, consiste en capas cilíndricas sucesivas. La Tabla 36 muestra que la resistencia de puesta a tierra se desarrolla en casi un 70 % en la capa de terreno adyacente al electrodo de 30 cm y que para una distancia radial desde el electrodo de 5 m se habrá desarrollado en su totalidad.

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

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

Distancia radial desde el electrodo		Porcentaje aproximado de la resistencia total
(m)	(pies)	
0,03	0,1	25
0,06	0,2	38
0,09	0,3	46
0,15	0,5	52
0,3	1,0	68
1,5	5,0	86
3,0	10,0	94
4,6	15,0	97
6,1	20,0	99
7,6	25,0	100
30,5	(100,0) ^a	(104)
305,0	(1000,0) ^a	(117)

Tabla 36. Porcentaje aproximado del desarrollo de la resistencia de puesta a tierra de un electrodo de 3m de longitud y 15.88 mm de diámetro.

Fuente: [11]

Para mejorar las condiciones de resistividad del suelo que rodea la varilla, se recomienda aplicar una sustancia adicional de baja resistividad, que ayude a reducir la resistencia de puesta a tierra. Esencialmente, para el tratamiento de suelos se utilizan diferentes tipos de materiales, unos naturales como la bentonita y otros preparados

industrialmente como los geles, cementos conductivos o tratamientos químicos artificiales (Su aplicación depende de las instrucciones del fabricante, pues aún no existen normas internacionales.). No se deben usar sales de cloruro y de sulfato para bajar la resistividad del suelo circundante al electrodo, debido a que puede contaminar las áreas cercanas, además pueden aumentar la corrosión. Tampoco se debe usar materiales que contengan limadura de hierro, debido a que con el tiempo esta se corroe afectando al electrodo. No se recomienda usar carbón de coque, puesto que puede destruir rápidamente el electrodo por corrosión gráficas.

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

9.4.3 Consideraciones de cableado y conexión a tierra de equipos.

Muchos de los problemas que generan perturbaciones al interior de una instalación eléctrica de uso final, están directamente relacionados con malas prácticas de cableado (Ver sección 2.3.1). Adicionalmente, la presencia de fluctuaciones de tensión y armónicos relacionados con la operación del sistema, hacen necesario tener en cuenta aspectos adicionales a la hora de diseñar e instalar los circuitos eléctricos de potencia.

No es inusual encontrar múltiples conexiones del conductor neutro a tierra al interior de una instalación eléctrica de uso final (Ver sección 2.3.1.1), puesto que el neutro debe ser conectado únicamente en el panel principal de alimentación de la edificación o en el devanado secundario de un sistema derivado independiente (transformador de aislamiento) [11].

Independientemente de la tensión nominal, las partes metálicas no portadoras de corriente de equipos fijos que se puedan llegar a energizar, se deben conectar a tierra [17], incluyendo los marcos y carcasas de motores, bombas y controladores, entre otros. Esto permite integrar las partes no metálicas a la red de equipotencialización del sistema de puesta a tierra permitiendo reducir la IEM, debida a diferencias de potencial y la redistribución de las posibles cargas estáticas asociadas a la operación de las cargas de gran potencia. Se recomienda que la conexión a tierra de motores con sus respectivos dispositivos de control se realice mediante la conexión a tierra para equipos electrónicos (SPG⁶⁰).

Adicionalmente, teniendo en cuenta que la reactancia de un circuito en AC es determinada principalmente por el espaciado entre los conductores de salida y de retorno, y a diferencia de la resistencia es ligeramente afectada por las dimensiones del conductor. Se recomienda disponer todos los conductores de un mismo circuito en el

⁶⁰ SPG (Single Point Grounding). Único punto de conexión a tierra.

mismo ducto, con el fin de reducir el espacio entre los conductores de puesta a tierra EGC⁶¹ y conductores de fase y neutro [11].

9.4.4 Separación de circuitos para mitigar la IEM debida a los armónicos de tensión [27].

Teniendo en cuenta los efectos causados por los armónicos de tensión (ver 2.3.3.2), se recomienda separar los circuitos que alimentan las cargas que generan armónicos de los que alimentan a las cargas que son sensibles a los armónicos. En este caso, las cargas lineales y las no lineales son alimentadas por circuitos diferentes (alimentadas desde diferentes paneles o alimentadores) que parten de un punto de acoplamiento común, de tal forma que la distorsión de tensión causada por las cargas no lineales no afecta a las cargas lineales. Esta práctica también es recomendada para separar cargas sensibles de cargas cuya operación puede tener características eléctricas nocivas (por ejemplo arranque de motores) [23].

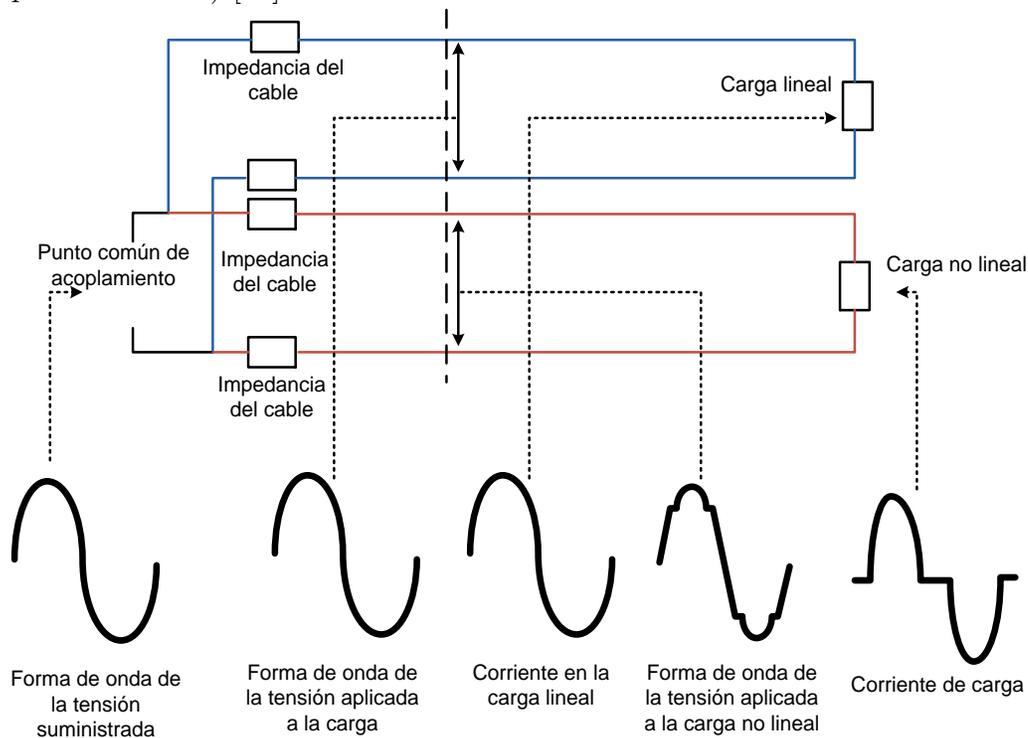


Figura 103. Separación de las cargas lineales de las no lineales.

Fuente: [27].

⁶¹ EGC(Equipment Grounding Conductor): Conductor de puesta a tierra de equipos.

10. Conclusiones

A través de este trabajo de investigación se ha desarrollado una propuesta para el diseño de instalaciones eléctricas de uso final en la que se ha identificado e incorporado algunos parámetros de compatibilidad electromagnética bajo criterios legales, reglamentarios, normativos y técnicos.

Las conclusiones más relevantes del trabajo de investigación son las que se citan a continuación:

- Se ha identificado y acotado el escenario legal y reglamentario a partir de lo dispuesto por el RETIE para el diseño de instalaciones eléctricas de uso final, de forma que para este trabajo se han propuesto siete componentes del diseño; por una parte, el sistema de protección contra rayos, el dimensionamiento de protecciones; el dimensionamiento de transformadores; el dimensionamiento de motores; el dimensionamiento de conductores, dimensionamiento de ductos, dimensionamiento del sistema de puestas a tierra bajo el entorno de las instalaciones eléctricas de uso final.
- Así mismo se han establecido los parámetros de compatibilidad electromagnética, en los que se describen los problemas y principales perturbaciones causantes del fenómeno relacionado con la incompatibilidad electromagnética, a partir de normativa internacional presentada por la IEEE y la IEC, sobre la cual se describe el alcance temático y técnico.
- Por otra parte se han propuesto una serie de buenas prácticas de ingeniería orientadas a los siete componentes del diseño de instalaciones eléctricas de uso final antes mencionados. Estas prácticas fueron propuestas con base en los trabajos de entes normativos internacionales, así como algunos artículos y catálogos de fabricantes.
- El conocimiento del entorno electromagnético en el que se verá envuelto la instalación, ya sea de forma simulada o mediante la caracterización de las cargas principales proyectadas en el sistema, permitirá un diseño de la instalación eléctrica de uso final óptimo seguro, confiable, rentable y electromagnéticamente compatible.

- Mediante la implementación de las prácticas de ingeniería orientadas a optimizar la compatibilidad electromagnética de la instalación aquí presentadas, se podrá contribuir al mejoramiento de los índices de calidad de la energía de las instalaciones eléctricas, al comercio internacional de productos eléctricos y electrónicos, al mejoramiento de los índices por paradas de procesos por falla de equipos e instalaciones, así como los gastos en mantenimiento y paradas de producción de las empresas, mejorando la competitividad de las mismas, del gremio, de la región y del país.

10.1 Proyectos de investigación y proyectos dirigidos

Durante la ejecución del trabajo de investigación se llevaron a cabo los siguientes proyectos:

- Proyecto VIE-DIEF-5566: «Propuesta para el diseño de instalaciones eléctricas de uso final mediante la incorporación de criterios legales, reglamentarios, normativos y técnicos considerando parámetros de compatibilidad electromagnética» Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander. Investigador principal: MPE. Julio Cesar Chacón.
- D. Jaimes y W. Gamboa. «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»
- O. Rodríguez. «Propuesta técnica que incorpora parámetros de compatibilidad electromagnética en el diseño de sistemas de puesta a tierra para instalaciones eléctricas de uso final»
- R. Fragozo. «Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados»
- F. Vera «Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de conductores, ductos y canalizaciones en instalaciones eléctricas de uso final»

10.2 Publicaciones realizadas

Publicaciones en congresos:

- G. Malagón, D. Jaimes J, W. Gamboa L, G. Ordóñez P, W. Giraldo P, J Chacón «Prácticas CEM enfocadas a la mitigación del impulso electromagnético del rayo (IER): earthing and bonding un enfoque de la IEC 62305-4», 1er Congreso

- Nacional de Diseño e Ingenierías Físicomecánicas UIS Bucaramanga del 14 al 16 de Noviembre 2012.
- G. Malagón, G. Ordóñez P, W. Giraldo P, J Chacón «Prácticas CEM orientadas a la mitigación de armónicos: Un enfoque de la IEC TR 61000-5-6», 1er Congreso Nacional de Diseño e Ingenierías Físicomecánicas UIS Bucaramanga del 14 al 16 de Noviembre 2012.
 - G. Malagón, J. Blanco, G. Ordóñez, J.F. Petit, W. Giraldo and J. Chacón «Transformer Winding Connections performance analysis on harmonic reduction in distribution systems» VII Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica SICEL, del 26 al 29 de Noviembre de 2013
 - O. Rodriguez, G. Malagón, G. Ordóñez, W. Giraldo and J. Chacón «Good Practices Identification for Design Electronic Equipment Grounding Systems to Mitigate Power Quality and EMI Problems.» VII Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica SICEL, del 26 al 29 de Noviembre de 2013
 - G. Malagón, C. Duarte, G. Ordóñez, W. Giraldo and J. Chacón «Implementation of phase shifting transformer distribution system for harmonics mitigation.» IEEE PSC14 Technical Committee

Publicaciones en revistas:

- G. Malagón, G. Ordóñez, W. Giraldo and J. Chacón Prácticas CEM enfocadas a la mitigación del impulso electromagnético del rayo (IER): «Earthing and bonding un enfoque de la IEC 62305» Revista tecnología en marcha. Clasificación C, Volumen 27, No 1 ISSN: 0379-3982.
- G. Malagón, J. Blanco, G. Ordóñez, J.F. Petit, W. Giraldo and J. Chacón «Transformer Winding Connections performance analysis on harmonic reduction in distribution systems» Revista DYNA Magazine of the National University of Colombia A1, (En revision)

11. Recomendaciones

Se propone como ejercicio práctico para futuros proyectos de grado la puesta en marcha de casos de estudio y/o la implementación de las estrategias o buenas prácticas mencionadas a lo largo de este documento de forma que se pueda corroborar los desarrollos teóricos citados con un estudio de una instalación eléctrica de uso final.

De igual forma se abre un panorama para la implementación de estas estrategias mediante el modelado en computador de estas buenas prácticas de forma que estos modelos proporcionen algunos datos con los cuales se pueda inferir de una mejor manera la pertinencia o no de los mismos al escenario practico colombiano.

A futuro se podría optar por la investigación a nivel de maestría de cada una de las siete consideraciones de diseño propuestos de forma general en este trabajo de investigación, en donde se analicen cada una de las buenas prácticas propuestas a lo largo de este documento.

Referencias

- [1] RETIE, Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, Ministerio de Minas y Energía, Resolución No. 90708 Agosto 30 de 2013.
- [2] IEC 62305-1, Protection against lightning – Part 1: General principles, International Electrotechnical Commission, 2010.
- [3] IEC 62305-2 , Protection against lightning– Part 2: Risk management, International Electrotechnical Commission, 2010.
- [4] IEC 62305-3, Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard, International Electrotechnical Commission, 2010.
- [5] R. Kithil, «Overview of Global Lightning Protection Codes and Standards,» de *19th International Lightning Detection Conference*, Tucson, 2006.
- [6] NFPA 780, Standard for the Installation of Lightning Protection Systems, National Fire Protection Association, 2008.
- [7] M440.1-1, Electrical Storms and Lightning Protection, Department of Energy of United States, 2002.
- [8] FAA-STD-019E, Lightning and surge protection, grounding, bonding, and shielding requirements for facilities and electronics equipment, Department of transportation Federal aviation , 2005.
- [9] NTC 389-3, Proyecto de Norma Técnica sobre Sistemas de Puesta a Tierra, ICONTEC .
- [10] IEEE Std. 1100 Emerald Book, IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005.
- [11] IEEE Std. 142 Green Book, Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007.

- [12] IEEE Std C57.110, Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008.
- [13] UL 1561, «Dry-Type General Purpose and Power Transformers,» 1994.
- [14] UL 1562, «Transformers, Distribution, Dry-Type-Over 600 Volts,» 1994.
- [15] NEMA MG1, Motors and Generators, National Electrical Manufacturers Association , 2011.
- [16] IEC 60034-26, «Rotating electrical machines –Part 26:Effects of unbalanced voltages on the performance of three-phase cage induction motors,» 2006-07.
- [17] NFPA 70, National Electrical Code® (NEC®), National Fire Protection Association , 2005 .
- [18] NTC 2050, Código Eléctrico Colombiano, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2002.
- [19] IEEE Std. 80, Guide for Safety in AC Substation Grounding, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000.
- [20] Okumura, Kazuhiro ; Uno, Hiroki ; Nagai, Yutaka ; Ametani, Akihiro; Baba, Yoshihiro ; Nagaoka, Naoto, «Optimum Position of a Grounding Wire within a Building for Reduction of Lightning Surge Voltages,» de *Proceedings of 2011 46th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC)*, Soest, 2011.
- [21] Zhou, Qibin, Lightning-induced impulse magnetic fields in high-rise buildings, Hong Kong : Polytechnic University, Febrero del 2007.
- [22] Jong-Hyuk Choi;Hee-Kyung Shin ; Dong-Seong Kim ; Bok-Hee Lee, «Grounding impedance based on the current distribution for the horizontal ground electrode installed in two-layer soil structure,» de *7th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL)*, Korea, 2011.
- [23] J. Burluson, «Wiring and Grounding to Prevent Power Quality Problems With Industrial Equipment,» de *Fiber and Film Industry Technical Conference*, Greenville, 1991.
- [24] A. Morinec, «Power Quality Considerations for CNC Machines : Grounding,» *IEEE Transaction on Industry Applicattions*, vol. 38, n° 1, pp. 3-11, 2002.
- [25] M. Robertson, «Neutral to ground bonding: not an option,» 2007. [En línea]. Available: <http://www.nemasurge.org/wp-content/themes/twentyeleven/documents/neutralgroundbonding.pdf>.

- [26] R. Calvas, Cuaderno Técnico n° 177: Perturbaciones en los sistemas electrónicos y esquemas de conexión a tierra., Schneider Electric, 2003.
- [27] D. Chapman, Guía de Calidad de la Energía Eléctrica :Armónicos, Causas y efectos 3.1, European Copper Institute, 2001.
- [28] C. Sankaran, Power Quality, Taylor & Francis, 2001.
- [29] A. Baggini, Handbook of Power Quality, England: John Wiley and Sons, 2008.
- [30] S. K. Datta y A. Nafsi, Distribution relay performance under harmonics conditions., Second International Power Quality Conference, 1992.
- [31] Power Technologies, Inc., Power System Harmonics, 1989..
- [32] J. Arrillaga, N. Watson y S. Chen, Power system quality assessment, John Wiley & Sons, 2000.
- [33] J. Desmet y G. Delaere, «Armónicos - Selección y Clasificación de los Transformadores,» de *Guía de Calidad de la Energía*, European Cooper Institute, 2005.
- [34] W. Deprez, Energy efficiency of the induction machines: a critical assessment, Belgica: Katholieke Universiteit Leuven, 2008.
- [35] Donolo, Pablo Daniel; Bossio, Guillermo Rubén;De Angelo, Cristian Hernán , «Demérito en motores de inducción por armónicos y desequilibrio de tensión,» de *XIV Encuentro Regional Iberoamericano del CIGRÉ*, Ciudad del Este, Paraguay, 2011.
- [36] IEEE Std 519, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Industry Applications Society, 1993.
- [37] IEC TR 61000-5-2, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-2: Installation and mitigation guidelines – Earthing and cabling, International Electrotechnical Commission, 1997.
- [38] IEC 62305-4, Protection against lightning – Part 4: Electrical and electronic systems within structures, International Electrotechnical Commission, 2010.
- [39] G. Rojas, «Capitulo 1: Sistemas de puesta tierra-Soldadura exotermica,» de *Manual de Sistemas de puesta a tierra*, GediStrut.
- [40] Corporation ERICO International, Protección eléctrica de instalaciones, Disponible en: <http://www.erico.com/public/library/fep/LT1051.pdf>.
- [41] F. Casas, Tierras: Soporte de la seguridad eléctrica, Bogotá: ICONTEC, 2005.
- [42] J. Balcells, Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos, Barcelona: Marcombo, 1992.

- [43] IEC 61643-1, Low voltage surge protective devices – Part 1: Surge protective devices connected to low voltage power distribution systems – Requirements and tests, International Electrotechnical Commission, 2005.
- [44] RETIGAS, Proyecto Reglamento Técnico de Instalaciones Internas de Gas Combustible, Ministerio de minas y energia, 2012.
- [45] IEC 60364-5-53, Electrical installations of buildings - Part 5-53: Selection and erection of electrical equipment - Isolation, switching and control., International Electrotechnical Commission, 2001.
- [46] IEC 61643-12, Low voltage surge protective devices – Part 12: Surge protective devices connected to low voltage power distribution systems – Selection and application principles, International Electrotechnical Commission, 2002.
- [47] IEC 61000-4-9, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-9: Testing and measurement techniques - Pulse magnetic field immunity test, International Electrotechnical Commission, 2001.
- [48] IEC 61000-4-10, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-10: Testing and measurement techniques - Damped oscillatory magnetic field immunity test., International Electrotechnical Commission, 2001.
- [49] IEC TR 61000-5-6, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5-6: Installation and mitigation guidelines - Mitigation of external EM influences, International Electrotechnical Commission, 2002-06.
- [50] IEC 60364-4-43, Electrical installations of buildings - Part 4-43: Protection for safety - Protection against overcurrent, International Electrotechnical Commission, 2008.
- [51] Groupe Schneider, Electromagnetic Compatibility (EMC) – Practical Installation guidelines, 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).
- [52] IEC 60939-2, Passive filter units for electromagnetic interference suppression - Part 2: Sectional specification: Passive filter units for which safety tests are appropriate - Test methods and general requirements, International Electrotechnical Commission, 2005.
- [53] IEC 60335-1, Household and similar electrical appliances - Safety - Part 1: General requirements, International Electrotechnical Commission, 2010.
- [54] IEC 60939-1 , Passive filter units for electromagnetic interference suppression - Part 1: Generic specification, International Electrotechnical Commission, 2010.

- [55] IEC 61000-4-5 , Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-5: Testing and measurement techniques - Surge immunity test, International Electrotechnical Commission, 2009.
- [56] CISPR 17, Methods of measurement of the suppression characteristics of passive EMC filtering devices, International Electrotechnical Commission, 2011.
- [57] IEC 61000-4-4, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-4: Testing and measurement techniques - Electrical fast transient/burst immunity test, International Electrotechnical Commission, 2011.
- [58] IEC 61000-4-12 , Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-12: Testing and measurement techniques - Ring wave immunity test, International Electrotechnical Commission, 2006.
- [59] Schneider Electric, Drive Isolation Transformers-Solutions to power quality, Disponible en: <http://static.schneider-electric.us/docs/Electrical%20Distribution/Low%20Voltage%20Transformers/Drive%20Isolation%20Transformers/7460PD9501R895.pdf>, 1995.
- [60] J. Desmet y A. Baggini, «Armonicos: Dimensionado del neutro en instalaciones ricas en armonicos,» de *Guía de Calidad de la Energía*, European Cooper Institute, 2003.
- [61] Gabrielson, Bruce C.; Reimold, Mark J, «Suppression of Powerline Noise with Isolation Transformers,» de *EMC EXPO87*, San Diego, CA, 1987.
- [62] R. Robles y A. Andreu, Propuesta metodológica para la evaluación e instalación de Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAIs) de gran potencia, Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, 2004.
- [63] M. Arias Pérez, 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, Girón: Universidad de Oviedo, 2010.
- [64] IEEE Std C57.12.91, Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012.
- [65] IEEE Std C57.12.00, Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010.
- [66] IEEE Std C57.12.90, Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, Institute of Electrical and Electronics Engineer, 2010.

- [67] IEC 60034-12, Rotating Electrical Machines-Starting Performance of Single-Speed Three-Phase Cage Induction Motors, International Electrotechnical Commission, 2002.
- [68] IEC 60364-5-52, Low-voltage electrical installations - Part 5-52: Selection and erection of electrical equipment - Wiring systems, International Electrotechnical Commission, 2009.
- [69] UNE 20460-5-523, Instalaciones eléctricas de edificios. Parte 5: selección e instalación de materiales eléctricos. Capítulo 52: canalizaciones. Sección 523: corrientes admisibles., AENOR, 2004.
- [70] UNE 20460-4-473, Instalaciones eléctricas en edificios. Parte 4: Protección para garantizar la seguridad. Capítulo 47: Aplicación de las medidas de protección. Sección 473: Protección contra las sobreintensidades, AENOR, 1990.
- [71] V. Fillipo, H. Cano y S. Gomez, «Manejo de interferencias electromagnéticas en bandejas portacables,» *Scientia et Technica*, vol. XVI, n^o 44, pp. 241-244, 2010.
- [72] UNE EN 61537, Conducción de cables. Sistemas de bandejas y de bandejas de escalera, AENOR, 2008.
- [73] R. Hope, D. Harrold y D. Brown, Control System Power and Grounding Better Practice, Newnes, 2004.
- [74] Electrical Construction and Maintenance ECM, «Observations on Supplemental Grounding and Bonding Systems: Part 1,» 2007. [En línea]. Available: <http://ecmweb.com/content/observations-supplemental-grounding-and-bonding-systems-part-1>.
- [75] Seguridad Eléctrica Ltda., Puestas a tierra para torres de líneas de transmisión., Seguridad Eléctrica Ltda., 2009.
- [76] Lee, Bok-Hee ; Joe, Jeong-Hyeon , «Simulations of Frequency-dependent Impedance of Ground Rods Considering Multi-layered Soil Structures,» *Journal of electrical engineering & technology*, vol. 4, n^o 4, pp. 531-537, 2009.
- [77] H. Mariewicz y A. Klajn, «Earthing & EMC: Earthing Systems - Basic Constructional Aspects 6.5.1,» de *Power Quality Application Guide*, Wroclaw, European Copper Institute, 2004.
- [78] G. Eduful, J. Ekow, C. Okyere y O. P.Y., «Optimum Mix of Ground Electrodes and Conductive Backfills to Achieve a Low Ground Resistance,» de *2nd International Conference on Adaptive Science & Technology*, Accra, 2009.
- [79] Electricadora de Santander S.A. E.S.P., Normas para cálculo y diseño de sistemas de distribución, Bucaramanga, 2005.

- [80] Ravot, J. F.; Kreuzer, J. , «Losses un rectifier transformers: Factory test losses in comparison with actual operating losses,» *CIGRE*, pp. 12-06, 1988.
- [81] Kulkarni, S.V.; Khaparde, S. A. , *Transformer Engineering: Design and Practice*, New York: John Wiley & Sons, 1951, pp. 55-65..
- [82] IEEE Std C57.12.01, Standard General Requirements for Dry-Type Distribution and Power Transformers, Including Those With Solid-Cast And/Or Resin Encapsulated Windings, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006.
- [83] IEC 60034-2-1, Rotating electrical machines - Part 2-1:Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles), International Electrotechnical Commission, 2007.
- [84] E. Téllez, «Distorsión armónica,» *Automatizacion, Productividad y Calidad*, [En línea]. Available: <http://www.waterymex.org/contenidos/rtecnicos/Optimizando%20la%20Operacion%20y%20el%20Mantenimiento/Distorsion%20Armonica.pdf>.
- [85] Suárez, J. A.; Di Mauro, G. F.; Anaut, D.; Agüero, C., «Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales,» *IEEE Latin America Transactions*, vol. 3, n° 5, pp. 429-430, December, 2005.
- [86] Cummings, Paul G. , «Estimating the effect of systems harmonics on losses and temperature rise of squirrel-cage motors,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vols. %1 de %2IA-22, n° 6, pp. 1121 - 1126, 1985.
- [87] Fuchs, E.F. , «Aging of electrical appliances due to harmonics of the power systems voltage,» *IEEE Trans. On Power Delivery*, n° 3, pp. 301-307, July,1986.
- [88] Emanuel, A.E., «Estimating the effects of harmonic voltage fluctuations on the temperature rise of aquirrel-cage motors,» *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 6, n° 1, pp. 162 - 169, 1991.
- [89] Grajales, John; Ramírez, José; Cadavid, Diego, «Efectos de los armónicos en los motores de inducción: una revisión,» *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, n° 031, pp. 116-123, 2004.
- [90] Sen, P.K. ;Landa, H.A., «Deranting of induction motors due to wave form distortion,» de *Petroleum and Chemical Industry Conference*, San Diego, 1990.
- [91] L. Ching-Yin y L. Wei-Jen, «Effects of nonsinusoidal voltage on the operation performance of a three-phase induction motor,» *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, n° 2, pp. 193-201, 1999.

- [92] de Abreu, J.P.G.; Emanuel, A., «Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and imbalance: Loss of useful life and estimated cost,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, nº 1, pp. 12 - 20, 2002.
- [93] de Abreu, J.P.G.; Emanuel, A.E., «Induction motor loss of life due to voltage imbalance and harmonics: A preliminary study,» de *Proceedings. Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power.*, Orlando, 2000.
- [94] Vijayraghavan, P.; Krishnan, R., «Noise in electric machines: A review,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 14, nº 2, pp. 1007 - 1013, 1999.
- [95] ECAMEC Tecnología, «Desbalance de Tensiones en sistemas trifásicos,» Septiembre 2009.
- [96] IEC TR 61000-2-5, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-5: Environment - Description and classification of electromagnetic environments, International Electrotechnical Commission, 2011.
- [97] IEC 61000-2-12, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-12: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public medium-voltage power supply systems, International Electrotechnical Commission, 2003.
- [98] UNE-EN50160, Características de la tensión suministrada por la redes generales de distribución, AENOR, 1999.
- [99] Joint Working Group Cigré c4.07/ Cired, «Power Quality Indices and Objectives,» 2004.
- [100] IEC 61000-4-30, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods, International Electrotechnical Commission, 2008.
- [101] IEEE 1159, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995.
- [102] IEC 61000-4-27, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-27: Testing and measurement techniques - Unbalance, immunity test, International Electrotechnical Commission, 2000.
- [103] ANSI C84.1, Electric Power Systems and Equipment - Voltage Ratings (60 Hertz), American National Standard Institute, 2011.
- [104] W. Langguth, «Puesta a tierra y compatibilidad electromagnética. Fundamentos de la Compatibilidad Electromagnética (EMC),» de *Guía de Calidad de la Energía Eléctrica*, Madrid, European Copper Institute, 2006..
- [105] NTC- IEC 61000-1-1, Compatibilidad Electromagnética, ICONTEC, 2000.

- [106] Schneider Electric, Puesta a tierra y compatibilidad electromagnética de los sistemas de automatización. Medidas y principios básicos 2011, Disponible en <http://www.schneider-electric.com/download/es/es/details/2297352-Puesta-a-tierra-y-compatibilidad-electromagnetica-de-los-sistemas-de-automatizacion-Fundamentos-y-medidas/?reference=33002442K01000>.
- [107] IEC TR 61000-2-5, Environment – Description and classification of electromagnetic environments, 2011.
- [108] R. Venhuizen, «Earthing & EMC A Systems Approach to Earthing,» de *Power Quality Application Guide*, Belgica, European Cooper Institute, 2002.
- [109] IEEE C62.41.2, IEEE Recommended Practice on Characterization of Surges in Low-Voltage (1000 V and Less) AC Power Circuits, IEEE Power & Energy Society, 2002 .
- [110] IEEE Std. 1100 Esmerald Book, IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment, 2005.

Anexos

Anexo A: Consideraciones generales para el cálculo de la capacidad equivalente del transformador

Pérdidas en un transformador

Los estándares [66] y [64] clasifican las pérdidas que se producen en un transformador como pérdidas en vacío (o pérdidas del núcleo) y las pérdidas bajo carga. Esto puede expresarse por la siguiente Ecuación:

$$P_T = P_{NL} + P_{LL} \text{ [W]}$$

Ecuación 0-1

En dónde:

P_{NL} Son las pérdidas en vacío o ajenas a la carga.

P_{LL} Son las pérdidas bajo carga.

P_T Son las pérdidas totales.

Las pérdidas en el vacío, se deben a la excitación de la tensión del núcleo. Aunque la corriente magnetizante contiene armónicos, éstos son extremadamente pequeños comparados con la corriente de carga, y el efecto sobre las pérdidas es mínimo.

En consecuencia, [12] acepta que la presencia de armónicos no incrementa las pérdidas del núcleo. Las pérdidas con carga están constituidas por las pérdidas I^2R (pérdidas Joule), las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados (P_{EC}) y las pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos, etc. (P_{OSL}), lo que se expresa en forma de Ecuación como:

$$P_{LL} = I^2R + P_{EC} + P_{OSL} \text{ [W]}$$

Ecuación 0-2

En dónde

I^2R Son las pérdidas debidas a la corriente de carga y a la resistencia en c.c de los devanados.

P_{EC} Son las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados.

P_{OSL} Son las pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos, etc.

No existen métodos de ensayo adecuados para determinar las pérdidas por corrientes de eddy de un arrollamiento individual, ni para separar las pérdidas por dispersión de las pérdidas por corrientes de eddy en un transformador. En lugar de ello, se evalúa la magnitud total de las pérdidas por dispersión y por corrientes de eddy, determinando las pérdidas con carga totales y restando las pérdidas óhmicas calculadas, es decir:

$$P_{EC} + P_{OSL} = P_{LL} - I^2R \text{ [W]}$$

Ecuación 0-3

Efecto de los armónicos sobre las pérdidas por dispersión (POSL)

Las pérdidas por dispersión se presentan debido al flujo disperso que origina pérdidas en el núcleo, soportes, tanque y otras partes de hierro. Estas pérdidas por dispersión elevan la temperatura de las partes estructurales del transformador. Para los transformadores tipo seco, los aumentos de temperatura de esas regiones no contribuyen a aumentar la temperatura de los devanados. Pero para los transformadores inmersos en líquido, las pérdidas por dispersión aumentan la temperatura del aceite y por lo tanto la temperatura de los devanados. Estas pérdidas son difíciles de evaluar por lo que se supone que varían con el cuadrado de la corriente multiplicado por la frecuencia (orden del armónico), como se indica:

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} \sum_{h=1}^{h=h_{\text{máx}}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 \text{ [W]}$$

Ecuación 0-4

En dónde:

P_{OSL-R} Son las pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos, etc. a la corriente y frecuencia nominal.

Las pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos y piezas estructurales, aumentan con el cuadrado de la corriente multiplicado por el orden del armónico elevado a un exponente igual a 0,8 o menor, una estimación conservadora es la utilización de 0,8 como lo sugiere [12]

Efecto de los armónicos sobre las pérdidas I^2R

Las pérdidas I^2R son generadas por la corriente que pasa por la resistencia de los devanados. También se conocen como pérdidas óhmicas [80] o pérdidas óhmicas de corto circuito [81]. Estas pérdidas son proporcionales al cuadrado de la magnitud de la corriente de carga, incluyendo los componentes armónicos, pero son independientes de la frecuencia. Se determinan midiendo la resistencia en corto circuito y calculando las pérdidas resultantes usando las corrientes de los devanados a plena carga.

Efecto armónico sobre las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados (PEC)

Las pérdidas por corrientes de eddy varían con el cuadrado de la corriente eficaz y el cuadrado de la frecuencia (orden de armónico h), de esta forma una vez conocidas las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados para condiciones nominales (P_{EC-R}), se pueden realizar los cálculos para cualquier carga con corrientes no sinusoidales, como se define en la Ecuación 0-5.

$$P_{EC} = P_{EC-R} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 \text{ [W]}$$

Ecuación 0-5

En dónde:

h Es el orden del armónico, 1, 2, 3, etc.

h_{\max} Es el mayor orden de armónico a considerar.

I_h Es el valor eficaz de la corriente del h -ésimo armónico, en amperios.

I_R Es el valor eficaz de la corriente nominal, en amperios.

P_{EC-R} Son las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados a la corriente y frecuencia nominal.

Las pérdidas por corrientes de eddy dependen del cuadrado de la dimensión del conductor perpendicular al campo del flujo de pérdida. En los extremos del arrollamiento el campo de flujo se curva y la dimensión mayor del conductor rectangular es perpendicular a un vector componente del campo de flujo de pérdida. Igualando la altura de los devanados primario y secundario, que se puede conseguir con cualquier diseño de arrollamiento, se reducen las pérdidas por corrientes de eddy concentradas en los extremos del arrollamiento. Sin embargo, la magnitud todavía sigue siendo mayor que en la mitad del arrollamiento, debido a esa curvatura del campo de flujo de pérdida.

Por otra parte, reduciendo el tamaño del conductor se reduce el porcentaje de pérdidas por corrientes de eddy, pero las pérdidas óhmicas aumentan. En cambio la utilización de varios hilos por arrollamiento reduce tanto las pérdidas por corrientes de eddy, como las pérdidas óhmicas, pero al ser los conductores de longitudes desiguales se generan corrientes de circulación que producen pérdidas adicionales. Esto puede evitarse mediante el uso de conductores continuamente transpuestos (ver la Figura 104), para el arrollamiento de corriente de alta intensidad. Los transformadores pequeños presentan tamaños reducidos de los conductores debido a la baja intensidad de las corrientes involucradas.

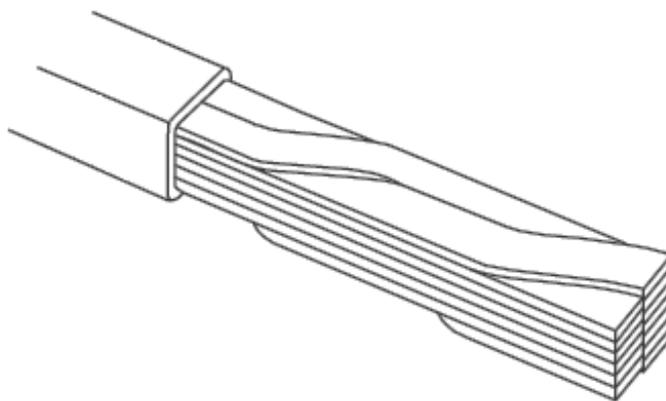


Figura 104. Conductor continuamente transpuesto.

Fuente [33]

Componentes DC de la corriente de carga

Las corrientes de carga de tipo armónico suele ir acompañada por un componente de corriente continua. La componente de corriente continua incrementará ligeramente las pérdidas en el núcleo del transformador, esto aumentará la corriente magnetizante y el nivel de ruido de manera sustancial. Para componentes de corriente continua relativamente pequeños (hasta la magnitud eficaz de la corriente de excitación del transformador a tensión nominal), se espera que no tengan ningún efecto sobre la capacidad de carga del transformador determinada por las prácticas recomendadas en este documento, si existen componentes de corriente continua mayores pueden afectar adversamente la capacidad del transformador por lo tanto deben ser tenidos en cuenta.

Capacidad equivalente del transformador

Los métodos para determinar la capacidad equivalente del transformador contenidos en las prácticas recomendadas de este documento se basan en las siguientes premisas:

- a) El transformador, exceptuando la distribución armónica de la corriente de carga, se presume que opera de acuerdo con las condiciones normales de servicio establecidas en las referencias [65] o [82]
- b) Se presume que el transformador puede alimentar cargas con corrientes con cualquier contenido armónico, siempre y cuando las pérdidas totales, las pérdidas con carga en cada devanado y en la zona donde se tiene la más alta densidad de pérdidas, no exceda los límites a plena carga, la frecuencia nominal y las condiciones sinusoidales de diseño, se presume que la condición límite se encuentra en la zona donde se tiene la más alta densidad de pérdidas, por lo que esta es la base utilizada para establecer capacidad equivalente.

Pérdidas en por unidad del transformador

Dado que la mayor preocupación sobre el funcionamiento de un transformador en condiciones de cargas armónicas es el aumento de temperatura en los devanados, es conveniente considerar la densidad de pérdidas en los devanados en por unidad (la corriente base es la nominal y la densidad de pérdidas base es la densidad de pérdidas I^2R a la corriente nominal). Por lo tanto, la Ecuación 0-2 aplicada a las condiciones nominales de carga, puede ser reescrita en por unidad de la siguiente manera:

$$P_{LL-R} (pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R} (pu)$$

Ecuación 0-6

En donde:

$P_{LL-R} (pu)$ Son las pérdidas bajo carga en por unidad para condiciones nominales.

P_{EC-R} Son las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados a la corriente y frecuencia nominal.

P_{OSL-R} Son las pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos, etc. a la corriente y frecuencia nominal.

Por definición de la Ecuación 0-6 las pérdidas I^2R con carga nominal son iguales a uno en por unidad, por lo tanto para cargas con corrientes no sinusoidales, el valor eficaz de la corriente en por unidad (la corriente base es la corriente nominal), será el siguiente:

$$I(pu) = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=h_{m\acute{a}x}} I_h(pu)^2} \quad [pu]$$

Ecuación 0-7

En dónde:

$I(pu)$ Es el valor eficaz de la corriente de carga en por unidad.

$I_h(pu)$ Es el valor eficaz de la corriente del h-ésimo armónico en por unidad.

La Ecuación 0-5 también se puede escribir en por unidad (la corriente base es la corriente nominal y la densidad de pérdidas base es la densidad de pérdidas I^2R a corriente nominal) como sigue en la Ecuación 0-8

$$P_{EC}(pu) = P_{EC-R}(pu) \sum_{h=1}^{h=h_{m\acute{a}x}} I_h(pu)^2 h^2 [pu]$$

Ecuación 0-8

Pérdidas en el transformador con corrientes diferentes a la nominal.

Para las Ecuación 0-6 a la Ecuación 0-8 se ha asumido que las corrientes corresponden a las nominales del transformador. Dado que esto rara vez sucede, es necesario introducir un nuevo término (P_{EC-O}) para describir las pérdidas por corrientes de eddy en los

devanados, cuando circula una corriente diferente a la nominal a frecuencia nominal. Para aclarar el uso de estas expresiones, además de las premisas básicas para determinar la capacidad equivalente, es necesario establecer:

a) Las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados son aproximadamente proporcionales al cuadrado de la frecuencia. Esta suposición causará que cualquier ecuación subsecuente sea exacta para conductores pequeños y armónicos bajos, proporcionando un cálculo conservador para una combinación de conductores más grandes y armónicos altos.

b) Las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados son producidas por la corriente que circula en los conductores, sin embargo se pueden expresar en función del valor eficaz de la corriente de la carga I .

c) Se aplicará el principio de superposición para determinar las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados, lo que permitirá realizar la sumatoria directa de las pérdidas por corrientes de eddy debidas a cada armónico.

La Ecuación 0-5 y Ecuación 0-8 pueden reescribirse en forma más general, como en la Ecuación 0-9:

$$P_{EC} = P_{EC-O} \sum_{h=1}^{h=h_{\text{máx}}} \left(\frac{I_h}{I}\right)^2 h^2 \text{ [W]}$$

Ecuación 0-9

En dónde

P_{EC-O} Son las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados para una corriente diferente a la nominal y frecuencia nominal.

I Es el valor eficaz de la corriente de carga.

$$P_{EC} = P_{EC-O} \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\text{máx}}} I_h^2 h^2}{I^2} \text{ [W]}$$

Ecuación 0-10

Al extraer el término I de la sumatoria, se obtiene la Ecuación 0-10, el valor eficaz de la corriente de carga no sinusoidal I está dado por la Ecuación 0-11:

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=h_{\text{máx}}} I_h^2}$$

Ecuación 0-11

La corriente eficaz I puede ser expresada en términos de los componentes de frecuencia, como se indica en la Ecuación 0-12:

$$P_{EC} = P_{EC-O} \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2} [W]$$

Ecuación 0-12

Factor armónico de pérdidas para las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados⁶².

Es conveniente definir un factor que se pueda utilizar para determinar la capacidad de un transformador para funcionar normalmente en determinadas condiciones de carga.

F_{HL} es un factor de proporcionalidad aplicable a las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados que permite evaluar el calentamiento producido por las corrientes armónicas de la carga, y está dado por la relación entre las pérdidas por corrientes de eddy totales debidas a los armónicos (P_{EC}) y las pérdidas por corrientes de eddy a frecuencia nominal, cuando no existen corrientes armónicas (P_{EC-O}). Esta definición se puede expresar en forma de ecuación, así:

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-O}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2}$$

Ecuación 0-13

En dónde:

F_{HL} Es el factor armónico de pérdidas para las corrientes de eddy en los devanados.

La Ecuación 0-13 permite que el factor F_{HL} sea calculado en términos del valor eficaz de las corrientes armónicas. Equipos analizadores de armónicos permiten hacer los cálculos en términos de armónicos normalizados de la corriente eficaz total o la componente fundamental.

La Ecuación 0-13 puede ser adaptada, dividiendo el numerador y el denominador, ya sea por el valor eficaz de la corriente de carga (I), o por el valor eficaz de la corriente armónica fundamental (I_1).

Los términos I e I_1 se pueden aplicar a la Ecuación 0-13 término a término, lo que resulta en la Ecuación 0-14 y la Ecuación 0-15:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2}$$

Ecuación 0-14

⁶² El factor armónico de pérdidas es similar pero no idéntico al K-factor.

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2}$$

Ecuación 0-15

Para las Ecuación 0-14 y Ecuación 0-15 el factor F_{HL} es igual, debido a que es una función de la distribución armónica de la corriente y es independiente de la magnitud de referencia (que la hace relativa).

Para aclarar las definiciones se ilustrarán dos ejemplos. En ambos ejemplos se tiene una corriente de carga no sinusoidal de 1804 A RMS y será usada como la corriente nominal.

Ejemplo A1

Calculo del factor armónico de pérdidas para una carga con una distribución armónica como la mostrada en la Tabla 37, normalizada a la corriente de carga de 1804 A RMS.

h	I_h	$\frac{I_h}{I}$
1	1764	0,978
5	309	0,17
7	195	0,11
11	79,4	0,044
13	50,5	0,028
17	27,1	0,015
19	17,7	0,0098

Tabla 37. Ejemplo de distribución armónica normalizada al valor eficaz de la corriente de carga.

Fuente: [12]

h	$\frac{I_h}{I}$	$\left[\frac{I_h}{I} \right]^2$	h^2	$\left[\frac{I_h}{I} \right]^2 h^2$
1	0,978	0,956	1	0,956
5	0,17	0,029	25	0,725
7	0,11	0,012	49	0,588
11	0,044	0,0019	121	0,230
13	0,028	0,00078	169	0,132
17	0,015	0,00023	289	0,066
19	0,0098	0,000096	361	0,035
Σ		1,00		2,73

Tabla 38. Cálculos para la distribución armónica de la Tabla 37

Fuente: [12]

La suma de la tercera columna es igual a 1,00 y representa el valor eficaz de la corriente nominal en por unidad. El factor armónico de pérdidas para esta distribución armónica utilizando la Ecuación 0-14 es como sigue:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2} = \frac{2,73}{1,00} = 2,73$$

Ejemplo A2

La distribución de carga de la Tabla 37, también puede ser descrita en términos del valor eficaz de la componente fundamental, como se muestra en la Tabla 39

h	I_h	$\frac{I_h}{I_1}$
1	1764	1
5	309	0,18
7	195	0,11
11	79,4	0,045
13	50,5	0,029
17	27,1	0,015
19	17,7	0,010

Tabla 39. Ejemplo de una distribución armónica normalizada al valor eficaz de la corriente fundamental.

Fuente: [12]

Nótese que los valores de la corriente armónica I_h son los mismos tanto para el Ejemplo A1 como para el Ejemplo A2, pero los valores normalizados son diferentes, dado que en este ejercicio se normalizaron a la corriente armónica fundamental. El cálculo se tabula en la Tabla 40.

h	$\frac{I_h}{I_1}$	$\left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2$	h²	$\left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2$
1	1,00	1,00	1	1,00
5	0,18	0,032	25	0,80
7	0,11	0,012	49	0,59
11	0,045	0,0020	121	0,24
13	0,029	0,00084	169	0,14
17	0,015	0,00023	289	0,066

19	0,010	0,0001	361	0,036
Σ		1,05		2,87

Tabla 40. Cálculos para la distribución armónica de la Tabla 39

Fuente: [12]

La suma de la tercera columna es igual a 1,05 y representa el valor eficaz de la componente fundamental en por unidad. El factor armónico de pérdidas para esta distribución armónica utilizando la Ecuación 0-15 es como sigue:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2} = \frac{2,87}{1,05} = 2,73$$

Tanto para las corrientes armónicas individuales normalizadas a la corriente de carga I RMS o a la corriente fundamental I_1 RMS, el factor armónico de pérdidas es el mismo:

$$F_{HL} = \frac{2,73}{1,00} = \frac{2,87}{1,05} = 2,73$$

Factor armónico para las pérdidas por dispersión

El calentamiento debido a las pérdidas por dispersión (en fijaciones, depósitos, etc.) generalmente no es considerado para transformadores tipo seco, puesto que el calor es disipado por el aire refrigerante. Sin embargo, estas pérdidas pueden tener un efecto importante en los transformadores inmersos en líquido, al causar el calentamiento adicional del líquido refrigerante.

Una relación similar al factor armónico para las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados existe para las pérdidas por dispersión en un transformador, y se desarrolla de manera análoga al factor F_{HL} . Sin embargo, las pérdidas debidas a las conexiones, piezas estructurales, el tanque, etc., según [12] son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y a la frecuencia armónica elevada a la 0,8. Esto puede ser expresado en una forma similar a la Ecuación 0-15, como se muestra en la Ecuación 0-16:

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^{0,8} \text{ [W]}$$

Ecuación 0-16

Las ecuaciones correspondientes al factor armónico de pérdidas, normalizado a la corriente eficaz de carga y a la corriente armónica fundamental respectivamente, son la Ecuación 0-17 y la Ecuación 0-18:

$$F_{\text{HL-STR}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\text{max}}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2 h^{0,8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{\text{max}}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2}$$

Ecuación 0-17

$$F_{\text{HL-STR}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\text{max}}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^{0,8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{\text{max}}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2}$$

Ecuación 0-18

En dónde

$F_{\text{HL-STR}}$ Es el factor armónico para las pérdidas por dispersión.

A continuación se muestra un ejemplo ilustrativo donde se calcula el factor armónico para las pérdidas por dispersión, utilizando la distribución armónica de carga mostrada en la Tabla 37 del Ejemplo A1.

Ejemplo A3

Utilizando la distribución armónica de la Tabla 37, se tabulan los cálculos realizados tomando como base el valor eficaz de la componente fundamental.

h	$\frac{I_h}{I_1}$	$\left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2$	$h^{0,8}$	$\left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^{0,8}$
1	1,00	1,00	1	1,00
5	0,18	0,031	3,62	0,11
7	0,11	0,012	4,74	0,058
11	0,045	0,0020	6,81	0,014
13	0,029	0,00082	7,78	0,0064
17	0,015	0,00024	9,65	0,0023
19	0,010	0,00010	10,54	0,0011
Σ		1,05		1,19

Tabla 41. Cálculo del Factor armónico para las pérdidas por dispersión

Fuente: [12]

$$F_{\text{HL}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\text{max}}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^{0,8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{\text{max}}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2} = \frac{1,19}{1,05} = 1,14$$

Se destaca que para un transformador de columnas el arrollamiento interno (normalmente de baja tensión), se presentan pérdidas adicionales más altas en los

extremos debido a que el flujo disperso tiende a cerrarse por una trayectoria de la columna de baja reluctancia próxima a los yugos y elementos de sujeción, donde se tiene un alto contenido radial de densidad de flujo.

Consideraciones de diseño para especificar un nuevo transformador.

Filtrado de armónicos de corriente

Cuando sea práctico, el usuario puede instalar filtros en la línea secundaria para reducir algunas de las corrientes armónicas. Sin embargo, se debe tener cuidado, dado que puede ocurrir amplificación de corrientes a esta frecuencia, si una de las frecuencias armónicas está cerca de la frecuencia de resonancia resultante del circuito de filtrado.

Impacto en el neutro

Cuando las frecuencias armónicas de corriente incluyen órdenes de armónicos múltiplos de tres (3, 6, 9, etc.), las corrientes de secuencia cero fluyen en el neutro. Según [12] es necesario entonces sobredimensionar el neutro. En estas circunstancias, una práctica común para los transformadores de baja tensión y de uso general, es duplicar la capacidad de corriente por el neutro.

Equipos de compensación

Estos quipos son instalados frecuentemente para mejorar el factor de potencia y reducir los costos por consumo de energía. Se debe tener cuidado cuando se hace esto, puesto que la amplificación de corriente a ciertas frecuencias debido a la resonancia en el circuito puede ser bastante alta. Además, la inductancia que se reduce en el circuito generalmente permite la aparición de corrientes armónicas más altas. Los efectos de calentamiento debido a los armónicos en estas condiciones pueden ser perjudiciales para los transformadores y equipos asociados. Las pérdidas adicionales producidas también pueden aumentar los costos de utilidad debido al aumento de los requisitos de potencia, aunque el factor de potencia se ha mejorado.

Consideración de diseño para el exterior de los devanados

Las corrientes armónicas pueden aumentar considerablemente las pérdidas por corrientes de eddy en las partes estructurales externas de los devanados. Espaciamientos adicionales, el uso de materiales no magnéticos, la ruptura de las trayectorias de circulación de corriente y el uso de materiales de apantallamiento, son algunas formas de reducir los efectos de calentamiento por corrientes armónicas en las partes estructurales. Así mismo, las pérdidas por dispersión (P_{OSL}) deben ser incluidas en las pérdidas utilizadas para determinar la elevación de la temperatura del aceite ($\Delta\theta_{TO}$) bajo condiciones de cargas armónicas.

Pantalla electrostática con conexión a tierra

En los transformadores, existe cierto acoplamiento entre los devanados, este acoplamiento permite que las perturbaciones armónicas puedan llegar al devanado secundario. Sin embargo, cuando se utiliza una pantalla electrostática conectada a tierra, el acoplamiento entre los mismos queda reducido de forma significativa, reduciendo las perturbaciones en el lado secundario, pero no se eliminan en el lado primario del transformador. En la pantalla electrostática se producen pérdidas por corrientes de eddy que se incrementan con las corrientes armónicas así como las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados se incrementan por las corrientes armónicas. Es importante que la pantalla esté diseñada de manera que las pérdidas por corrientes de eddy producidas por la presencia de las corrientes armónicas no den lugar a un aumento excesivo de la temperatura en la pantalla. [12]

Análisis del espectro armónico

Es recomendable que el espectro de armónicos a los que se someterá el transformador sea comunicado al fabricante en el momento de la especificación. Un análisis preciso del tamaño adecuado del transformador sólo puede hacerse mediante la evaluación del espectro armónico específico. El espectro armónico suministrado se debe identificar si es medido en el lado primario o secundario del transformador. Si el espectro de armónicos se proporciona en por unidad, entonces la fundamental, debe ser definida a la frecuencia nominal del transformador especificado. Si el espectro no se puede suministrar, se debe especificar el cálculo del usuario o la estimación del factor armónico de pérdidas F_{HL} .

Consideraciones de diseño de los devanados

Dado que las corrientes armónicas pueden aumentar considerablemente las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados, cuando se especifica un transformador nuevo se debe tener en cuenta este efecto en el aumento excesivo de la temperatura. Para cada uno de los devanados, las pérdidas por corrientes de eddy en por unidad en la zona donde se tiene la más alta densidad de pérdidas se puede determinar para la frecuencia y corriente nominal en términos de la Ecuación 0-16, sin considerar las pérdidas $P_{OSL-R} (pu)$, que por definición son las pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos, etc, en por unidad para condiciones nominales.

La densidad de pérdidas en la región de mayores pérdidas puede ser calculada mediante la combinación de la Ecuación 0-16, la Ecuación 0-18, la Ecuación 0-11, y la Ecuación 0-14, como se muestra en la Ecuación 0-19:

$$P_{LL} (pu) = I(pu)^2 \times [1 + (F_{HL} \times P_{EC-R}(pu))] [pu]$$

Ecuación 0-19

En dónde:

$P_{LL} (pu)$ Las pérdidas bajo carga en por unidad.

Para ajustar en por unidad la densidad de pérdidas en cada devanado, se debe conocer el efecto de F_{HL} para cada devanado.

Es importante resaltar que el devanado de baja tensión tiene un conductor de mayor sección transversal que el devanado de alta tensión, por lo cual, el devanado de baja tensión puede comenzar con una pequeña densidad de pérdidas y una baja elevación de temperatura, pero puede aumentar más que en el devanado de alta tensión y exhibir el punto más caliente en el transformador. Es decir, existe un solo valor de F_{HL} para la carga, pero los efectos pueden resultar distintos en diferentes transformadores y diferentes devanados debido a su forma constructiva.

Para transformadores inmersos en líquido, el calentamiento del aceite por las pérdidas por dispersión diferentes a las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados también afecta la elevación de temperatura de los devanados.

Se deben cumplir los límites de temperatura y elevación de temperatura dados en los estándares [65] y [82] para la región más caliente de los devanados, teniendo en cuenta la densidad de pérdidas en por unidad obtenido de la Ecuación 0-19 con un valor eficaz de corriente igual a 1,0 (pu).

Anexo B: Consideraciones generales para el cálculo de la reducción de potencia de los motores de inducción

Rendimiento de un motor de inducción

La eficiencia de un motor se define como la relación que existe entre la potencia de salida (mecánica) y la potencia de entrada (eléctrica). Esta puede ser medida de manera directa o indirecta.

La medición directa implica el cálculo de la potencia eléctrica de entrada en función de la tensión y de las corrientes suministradas, y de la potencia mecánica de salida en función de la velocidad rotacional y el par disponible en el eje.

$$\eta(\%) = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{abs}}} \times 100$$

Ecuación 0-20

En dónde:

$\eta(\%)$ La eficiencia del motor de inducción en porcentaje.

$P_{\text{útil}}$ La potencia mecánica de salida.

P_{abs} La potencia eléctrica de entrada.

La medición indirecta consiste en medir la potencia de entrada y calcular la potencia mecánica de salida considerando todas las pérdidas en el motor, como en la Ecuación 0-30:

$$\eta(\%) = \frac{P_1 - P_T}{P_1} \times 100$$

Ecuación 0-21

En dónde:

$\eta(\%)$ Es la eficiencia del motor de inducción en porcentaje.

P_1 Es la potencia de entrada.

P_T Es la sumatoria de todas las pérdidas en el motor de inducción.

$$P_T = P_{fe} + P_{fw} + P_{s,\theta} + P_{r,\theta} + P_{LL}$$

Ecuación 0-22

En dónde:

P_{fe} Las pérdidas en el hierro.

P_{fw} Las pérdidas por rozamiento y ventilación.

$P_{s,\theta}$ Las pérdidas en el estator.

$P_{r,\theta}$ Las pérdidas en el rotor.

P_{LL} Las pérdidas adicionales.

Pérdidas en el motor de inducción

Pérdidas en el núcleo del estator (P_{fe})

Se deben a las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas que dependen de la tensión y la frecuencia. Por ello, durante el funcionamiento son más o menos constantes. En el rotor, las pérdidas son insignificantes debido a la baja frecuencia de la corriente del rotor durante el funcionamiento

Pérdidas por rozamiento y ventilación (P_{fw})

Son las pérdidas provocadas por el rozamiento y todas aquellas pérdidas debidas al rozamiento aerodinámico en todas las piezas de la máquina, incluyendo la energía absorbida por los ventiladores acoplados al eje y en las máquinas auxiliares que forman una parte de la máquina.

Pérdidas en los devanados (P_s, P_r)

En un motor de inducción son las pérdidas óhmicas en las bobinas del rotor y del estator, ambas son una función cuadrada de la carga.

Pérdidas por dispersión (P_{LL})

Son las pérdidas producidas por la carga de corriente en el hierro activo y otras piezas de metal con excepción de las bobinas conductoras: estas pérdidas son producidas por las corrientes de Foucault en las bobinas conductoras.

En la Figura 105, P_1 es la potencia eléctrica de entrada y P_2 la potencia mecánica de salida.

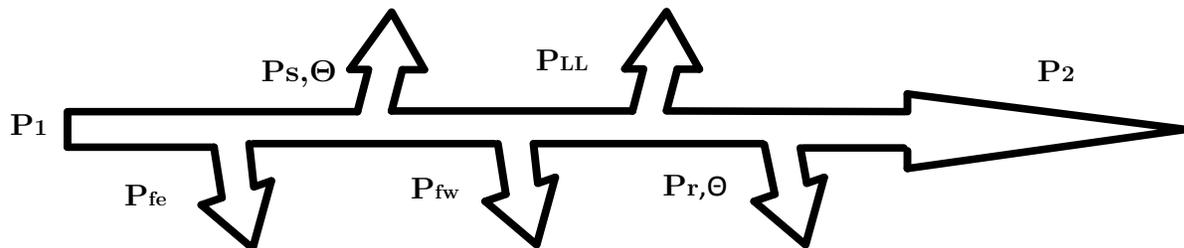


Figura 105. Potencias de entrada, pérdidas y potencia de salida en un motor de inducción
Fuente: Autores.

De esta forma en la referencia [83] se presenta una guía para determinar tanto las pérdidas como el rendimiento en máquinas eléctricas rotativas, exceptuando aquellas máquinas destinadas a la tracción de vehículos, aquí se establecen los métodos para determinar el rendimiento y las pérdidas en máquinas de corriente continua, máquinas síncronas y máquinas de inducción.

Distorsión armónica

Cuando la tensión o la corriente de un sistema eléctrico tienen deformaciones con respecto a la forma de onda sinusoidal, se dice que la señal está distorsionada. La distorsión puede deberse a:

Fenómenos transitorios: Tales como arranque de los motores, conmutación de capacitores, efectos de tormentas o fallas por cortocircuito entre otras.

Condiciones permanentes: Están relacionadas con armónicos de estado estable. En los sistemas eléctricos es común encontrar que las señales tendrán una cierta distorsión que cuando es baja, no ocasiona problemas en la operación de equipos y dispositivos [84].

Cuando la onda de corriente o de tensión medida en cualquier punto de un sistema eléctrico se encuentra distorsionada, con relación a la onda sinusoidal que idealmente debería existir, se dice que se trata de una onda contaminada con componentes armónicas.

A continuación se detallan los índices utilizados para cuantificar los niveles de distorsión armónica.

Índice de distorsión armónica total

Uno de los índices más utilizados es la denominada distorsión armónica total, citado en la literatura como THD⁶³, y aplicable tanto para corriente como para tensión. Este índice se define como la relación entre el valor eficaz del total de las componentes armónicas y el valor eficaz correspondiente a la componente fundamental. Este valor es usualmente expresado como un porcentaje de la onda fundamental. Así para la onda de corriente será:

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\%$$

Ecuación 0-23

Dónde:

h Es el orden del armónico.

I₁ Es el valor eficaz de la onda fundamental de corriente.

⁶³ THD: Total Harmonic Distortion, en inglés.

I_h Es el valor eficaz de corriente de orden h .

El THD_I puede variar desde pocas unidades porcentuales hasta superar el 100%. Aunque los armónicos de corriente de frecuencia más elevada pueden tener valores pequeños, al ser las reactancias de la línea y de los transformadores proporcionales a la frecuencia, los armónicos de tensión pueden tomar valores significativos [85].

De porcentaje, de orden h , con respecto a la fundamental. La distorsión armónica individual de tensión y corriente se calculan como en la Ecuación 0-25 y la Ecuación 0-26 respectivamente: forma similar al THD_I se expresa la distorsión en la tensión:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

Ecuación 0-24

En dónde:

h Es el orden del armónico.

V_1 Es el valor eficaz de la onda fundamental de tensión.

V_h Es el valor eficaz de tensión de orden h .

Índice de distorsión armónica individual

La distorsión armónica individual o distorsión armónica de orden h , se define como el nivel de distorsión, en

$$THD_v = \frac{V_h}{V_1} \times 100\%$$

Ecuación 0-25

En dónde:

V_h El valor eficaz de la tensión de orden h .

V_1 El valor eficaz de la onda fundamental de tensión.

$$THD_I = \frac{I_h}{I_1} \times 100\%$$

Ecuación 0-26

En dónde:

I_h El valor eficaz de la corriente de orden h .

I_1 El valor eficaz de la onda fundamental de corriente.

Distorsión de demanda total

Es la relación entre la corriente armónica y la demanda máxima de la corriente de carga. Cuando se efectúan medidas relacionadas con armónicos es común encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los

equipos dado que la energía distorsionante que fluye es también baja [84]. Para evaluar adecuadamente estas condiciones se define el índice de demanda total (THD) que es el parámetro de referencia que establece los límites aceptables de distorsión en corriente citados en la referencia [36].

$$\text{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\%$$

Ecuación 0-27

En dónde:

h Es el orden del armónico.

I_L Es la demanda máxima de corriente fundamental de carga, que se calcula como el promedio máximo mensual de demanda de corriente de los últimos 12 meses o puede estimarse.

I_h Es el valor eficaz de corriente de orden h .

Niveles de armónicos permitidos

Para asegurar la integridad en el sistema de potencia global, es preciso establecer límites sobre los niveles de distorsión permisibles que apliquen tanto para usuarios como para las empresas distribuidoras de la energía.

En Estados Unidos [36], define entre sus puntos los valores máximos de distorsión permisibles, por su parte en Colombia la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), emitió en 1998 el reglamento de distribución de energía eléctrica, como parte del reglamento de operación del Sistema Interconectado Nacional (SIN), en el cual describe las características de calidad del servicio de los sistemas de transmisión regional y/o distribución local.

En dicho reglamento se especifica que en cuanto al contenido armónico de tensión y corriente de las redes de distribución se debe cumplir los requisitos exigidos por [36], en donde se limita las corrientes armónicas de cada usuario en lo individual de forma que los niveles armónicos en la tensión en la totalidad del sistema sean aceptables, siendo su cumplimiento una responsabilidad compartida entre la empresa distribuidora y los usuarios.

Límites de distorsión en tensión

Es importante notar que la definición de la distorsión armónica total THD que se utiliza en la Tabla 42 es diferente al convencional puesto que se expresa la distorsión en función de la tensión nominal que es un valor constante para cada usuario, estableciéndose así, una base fija de evaluación. La expresión utilizada para calcular el THD_{V_n} se muestra en la Ecuación 0-30.

Anexo B: Consideraciones generales para el cálculo de la reducción de potencia de los motores de inducción

Nivel de tensión en la acometida (V_n)	Distorsión armónica individual	Distorsión armónica total (THD_{V_n})
$V_n \leq 69$ kV	3,0%	5,0%
69 kV $< V_n \leq 161$ kV	15%	2,5%
$V_n > 161$ kV	1,0%	1,5%

Tabla 42. Límites de distorsión armónica de tensión en % de la tensión nominal
Fuente: [36]

$$THD_{V_n} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_n} \times 100\%$$

Ecuación 0-28

En dónde:

h Es el orden del armónico.

V_n Es la tensión nominal fundamental del sistema.

V_h Es el valor eficaz de tensión de orden h .

Límites de distorsión en corriente

Las corrientes armónicas para cada usuario son evaluadas en la acometida y los límites establecen en base a la relación entre corriente de cortocircuito y la demanda máxima de corriente de la carga del usuario.

I_{cc}/I_L	TDD	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$
$V_n \leq 69$ kV						
<20	5,0%	4,0%	2,0%	1,5%	0,6%	0,3%
20-50	8,0%	7,0%	3,5%	2,5%	1,0%	0,5%
50-100	12,0%	10,0%	4,5%	4,0%	1,5%	0,7%
100-1000	15,0%	12,0%	5,5%	5,0%	2,0%	1,0%
>1000	20,0%	15,0%	7,0%	6,0%	2,5%	1,4%
69 kV $< V_n \leq 161$ kV						
<20*	2,5%	2,0%	1,0%	0,75%	0,3%	0,15%
20-50	4,0%	3,5%	1,75%	1,25%	0,5%	0,25%
50-100	6,0%	5,0%	2,25%	2,0%	0,75%	0,35%
100-1000	7,5%	6,0%	2,75%	2,5%	1,0%	0,5%
>1000	10,0%	7,5%	3,5%	3,0%	1,25%	0,7%
$V_n > 161$ kV						

<50	2,5%	2,0%	1,0%	0,75%	0,3%	0,15%
≥50	4,0%	3,5%	1,75%	1,25%	0,5%	0,25%

*** Todos los equipos de generación de energía están limitados a estos valores de corriente, sin importar la relación I_{cc}/I_L .**

-Para los armónicos pares, los límites son el 25% de los valores especificados en la tabla.
 -No se permite la existencia de componentes de corriente directa.
 -Si las cargas que producen los armónicos utilizan convertidores con número de pulsos q mayor a 6, los límites indicados en la tabla se incrementan por un factor $\sqrt{q/6}$

Tabla 43. Límites de distorsión armónica de corriente en % de la corriente nominal

Fuente: [36]

Efectos en las pérdidas en el motor de inducción

La presencia de armónicos, incrementa las pérdidas en el motor. Las pérdidas adicionales debido a los armónicos ($P_{armónica}$) puede ser calculadas aproximadamente con la expresión en la referencia [86]:

$$P_{armónica} \approx P_{nominal} \cdot \Delta W$$

Ecuación 0-29

$$\Delta W \approx 35 \sum_{h=2}^{\infty} \frac{1}{h^2} \left[\frac{V_h}{V_1} \right]^2$$

Ecuación 0-30

En dónde:

- $P_{armónica}$ Son las pérdidas adicionales debido a los armónicos
- $P_{nominal}$ Son las pérdidas con carga nominal
- ΔW Es el incremento de las pérdidas en el motor
- V_1 Es la tensión fundamental
- V_h Es la tensión armónica de orden h.
- h Es el orden del armónico

En la referencia [87] se presenta otra expresión que tiene en cuenta los armónicos de orden menor al quinto:

$$\Delta W = K_2 \sum_{h=2}^{\infty} \frac{1}{h^k} \left[\frac{V_h}{V_1} \right]^l$$

Ecuación 0-31

En dónde:

- ΔW Es el incremento de las pérdidas en el motor
- V_1 Es la tensión fundamental
- V_h Es la tensión armónica de orden h.
- h Es el orden del armónico
- l Exponente que toma valores entre 1,2 y 2

- k Exponente que toma valores entre 0,7 y 1,2
 K_2 Es un factor que depende de los parámetros del motor dados en la referencia [88].

Por otra parte la referencia [88] presenta los resultados de la verificación de la Ecuación 0-29, la cual se presenta en la Tabla 44:

Datos característicos							
Motor de 3,8 HP, 220 [V] y 60 [Hz]							
Prueba sinusoidal $P_{\text{nominal}} = 1.303$ [W]							
Pérdidas totales= 1.957 [W]							
Pérdida armónica: $P_{\text{armónica}} = 654$ [W]							
Tensión de prueba (% de fundamental)							
h=5	7	11	13	17	19	23	25
V_h/V_1	14,3	9,1	7,7	5,9	5,3	4,4	4,0
h =29	31	35	37	41	43	47	49
V_h/V_1	3,2	1,9	2,7	2,4	2,3	2,1	2,0
$P_{\text{armónica}} = 575$ [W] Error=12%							

Tabla 44. Medida y cálculo de pérdidas armónicas.

Fuente: [88]

Efectos en el aumento de la temperatura de los motores de inducción

La presencia de armónicos en la señal de suministro incrementa la temperatura en el motor. En la Figura 106 se muestra el incremento de temperatura en el motor de inducción monofásico y en el trifásico en función del factor armónico [87]. De la figura se observa que los motores monofásicos son más sensibles que los trifásicos.

Según [87] los armónicos de menor orden tienen efecto mayor que los de alto orden. En la referencia [90] se indica que para una distorsión de 5% de tensión, el segundo armónico tiene efecto mayor en el incremento de temperatura, que el quinto armónico con este mismo valor. Para una distorsión de 10% de tensión, los armónicos de secuencia negativa tienen efecto mayor que los armónicos de secuencia positiva [91]. Además, los armónicos menores al quinto tienen efecto mayor en el incremento de la temperatura para una misma distorsión.

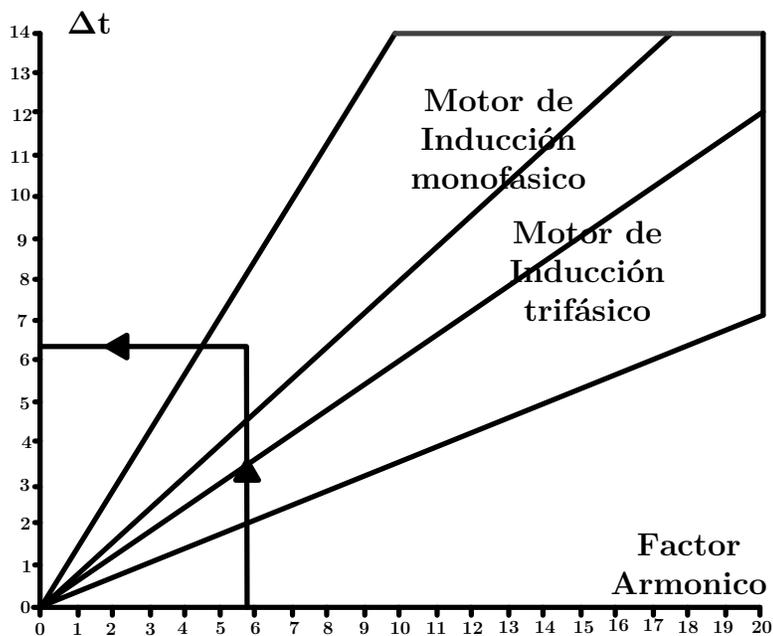


Figura 106. Aumento de la temperatura adicional contra la función del factor armónico.

Fuente: [89]

Efectos en la pérdida de vida útil de los motores de inducción

En las referencias [92], [93] se expone que la susceptibilidad de los motores a la distorsión depende del tamaño y diseño del motor. Figura 107 muestra cómo los sub-armónicos afectan considerablemente en el envejecimiento térmico de un motor de 100 Hp. La pérdida de capacidad para los motores no se puede modelar con una curva universal, dado que el tamaño y el diseño afectan su pérdida de capacidad ante la distorsión armónica y desbalance. A medida que aumenta la distorsión, se incrementa la pérdida de vida útil en el motor.

La Figura 107 muestra que con $n=0,1 p$ (donde n significa de secuencia negativa y p de secuencia positiva) de magnitud 25%, se causa en el mismo envejecimiento térmico que un 6% del quinto armónico (Figura 108). Ambos causan 18% de pérdida de vida útil.

El porcentaje de vida útil ($\% \Delta L$), menor a 40% de la vida nominal, puede calcularse aproximadamente por [93]:

$$\% \Delta L \approx a_u (\% D_{desbalance}) + \sum_n a_h (\% THD_{v_indi})^2$$

Ecuación 0-32

En dónde:

- $\% \Delta L$ Es el porcentaje de vida útil
- a_u Es el coeficiente de desbalance
- a_h Es la tensión armónica de orden h
- THD_{v_indi} Es la distorsión armónica individual de tensión

$\%D_{\text{desbalance}}$ Es el porcentaje de desbalance
 En donde a_u y a_h varían dependiendo del tamaño del motor.

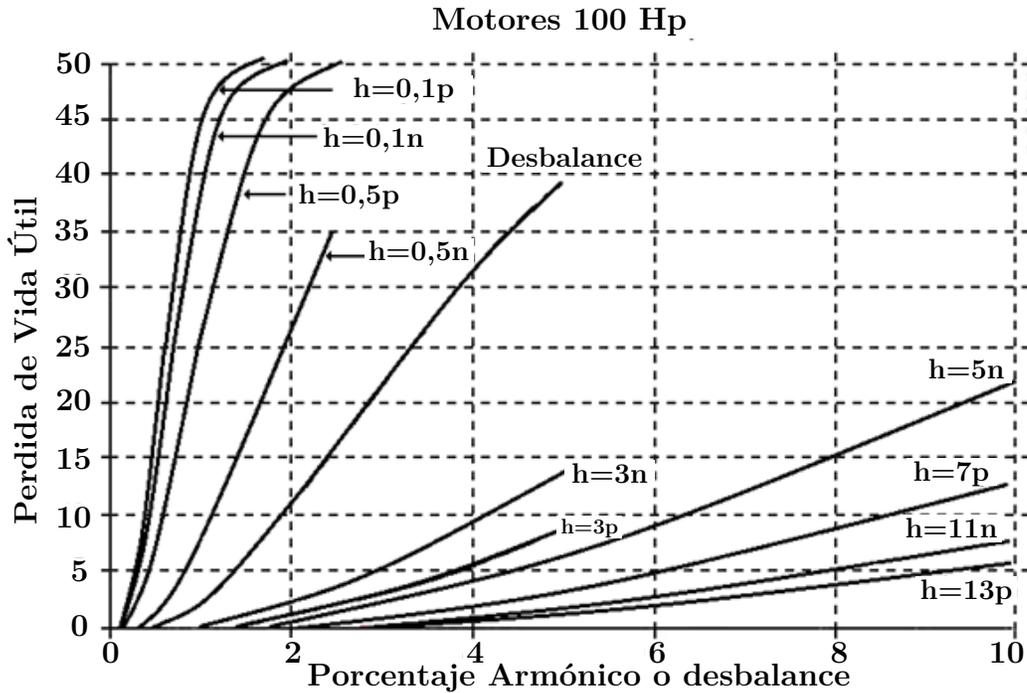


Figura 107. Pérdida de vida útil del motor de 100 hp
 Fuente: [92]

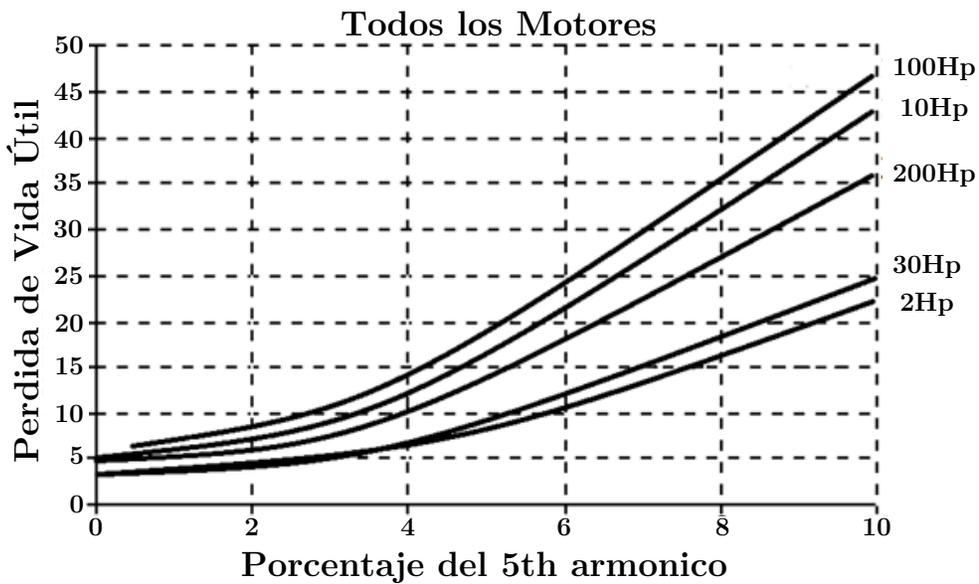


Figura 108. Pérdida útil de varios motores
 Fuente: [92]

Efecto de los armónicos en el ruido acústico y torques pulsantes en los motores de inducción.

Las fuentes de ruido acústico pueden dividirse en cuatro categorías: magnético, mecánico, aerodinámico y electrónico, como se muestra en la Figura 109.

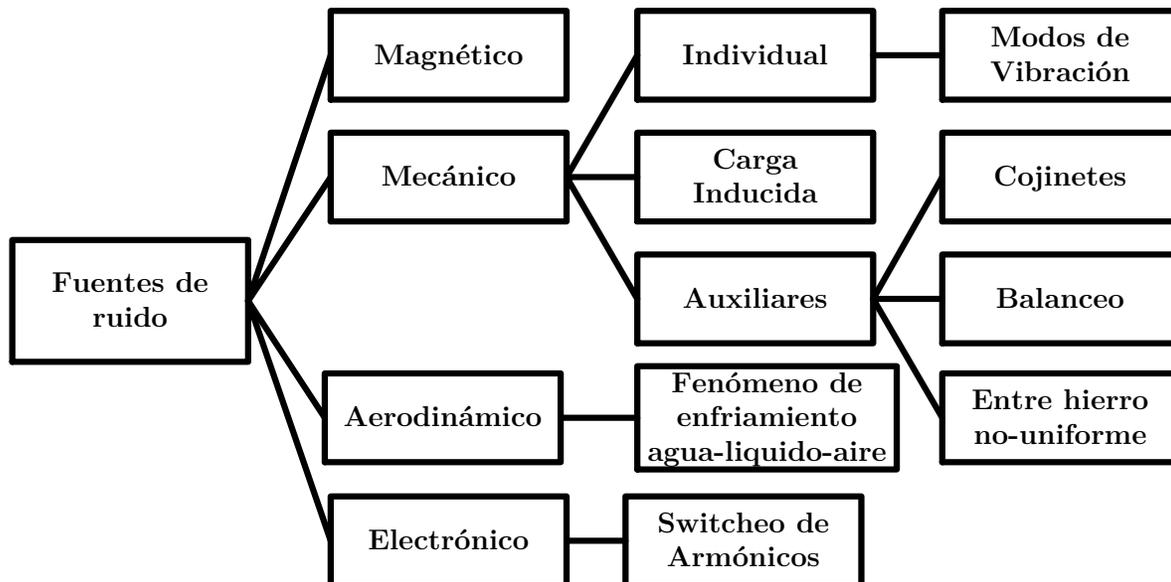


Figura 109. Clasificación de las fuentes de ruido en motores eléctricos

Fuente: [94]

En general, la contribución de los armónicos al torque promedio es pequeña, aproximadamente 4% de reducción, siendo los armónicos más influyentes en la reducción el quinto, el séptimo y el undécimo. Generalmente, las fuerzas electromotrices de esos armónicos son suficientemente altas para provocar ruido considerable y aumento de los torques pulsantes, este incremento es significativo si el orden del armónico está cercano a las frecuencias naturales del estator [89].

Efecto de los armónicos en el factor de potencia y eficiencia de los motores de inducción

La variación del factor de potencia en función de la distorsión armónica individual se puede evidenciar en la Figura 110 Se observa que a mayor distorsión de tensión, más bajo es el factor de potencia, y que los armónicos de bajo orden tienen un mayor efecto que los de alto orden para un valor dado de distorsión armónica. Los armónicos de secuencia negativa de menor orden (menor al quinto), tienen efecto mayor en el decrecimiento del factor de potencia que los de secuencia positiva y de secuencia cero.

Anexo B: Consideraciones generales para el cálculo de la reducción de potencia de los motores de inducción

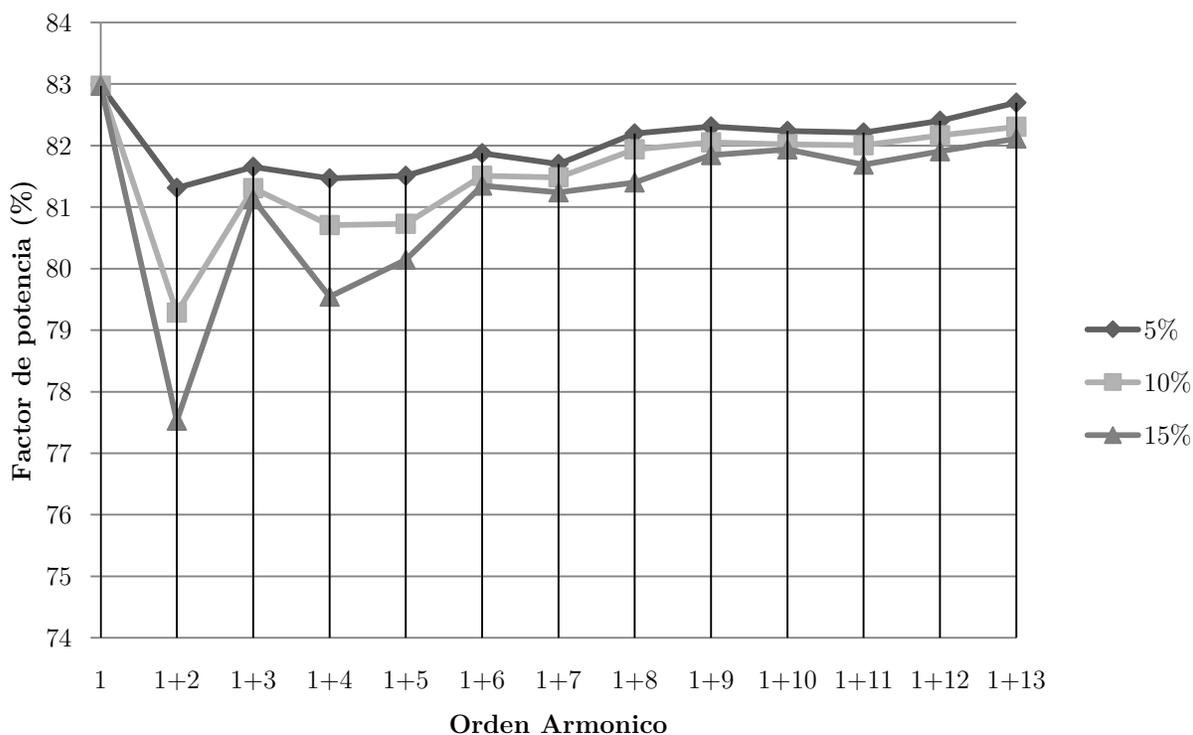


Figura 110. Factor de potencia en función de la distorsión armónica de tensión
Fuente: [91]

Orden del armónico	Secuencia	Factor de distorsión de tensión (%)		
		5%	10%	15%
1	-	82,97	82,97	82,97
1+2	Negativa	81,31	79,283	77,528
1+3	Cero	81,653	81,308	81,123
1+4	Positiva	81,465	80,709	79,542
1+5	Negativa	81,507	80,73	80,144
1+6	Cero	81,875	81,508	81,349
1+7	Positiva	81,701	81,48	81,241
1+8	Negativa	82,197	81,939	81,399
1+9	Cero	82,309	82,05	81,844
1+10	Positiva	82,236	82,019	81,938
1+11	Negativa	82,211	82,003	81,689
1+12	Cero	82,405	82,164	81,906
1+13	Positiva	82,699	82,305	82,112

Tabla 45. Factor de potencia en función de la distorsión armónica de tensión

Fuente [91]

La variación de la eficiencia en función de la distorsión armónica individual se muestra en la Figura 111 el comportamiento es similar al descrito para el factor de potencia.

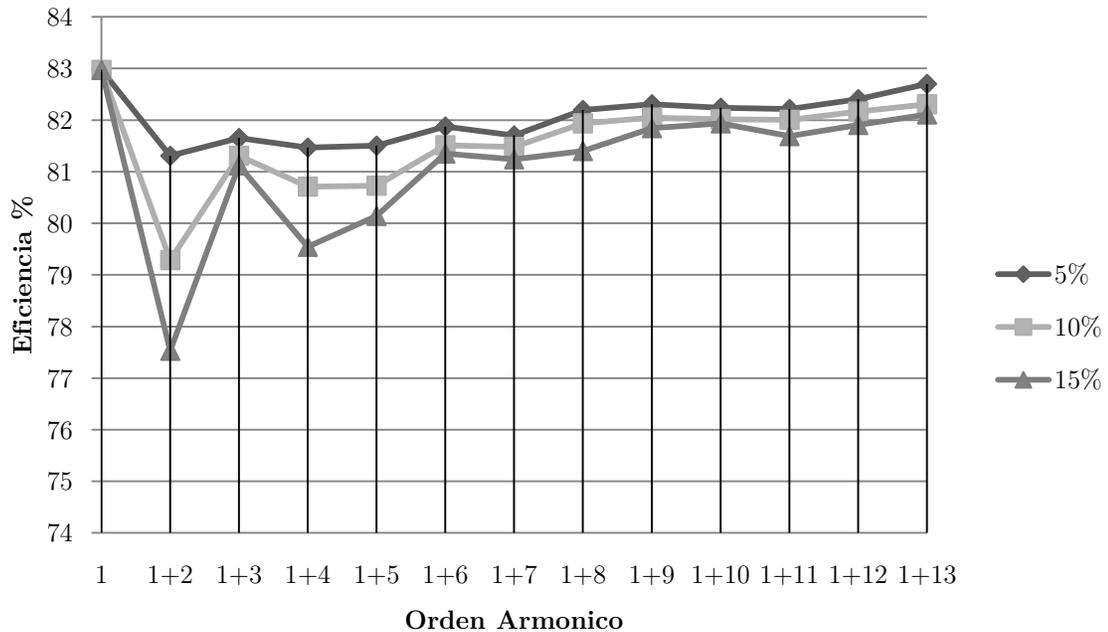


Figura 111. Eficiencia en función de la distorsión armónica

Fuente: [91]

Orden del armónico	Secuencia	Factor de distorsión de tensión (%)		
		5%	10%	15%
1	-	83,152	83,152	83,152
1+2	Negativa	81,032	79,67	77,062
1+3	Cero	82,232	82,043	81,281
1+4	Positiva	81,578	81,136	80,663
1+5	Negativa	82,017	81,408	80,96
1+6	Cero	82,574	82,176	81,986
1+7	Positiva	82,406	81,957	81,013
1+8	Negativa	82,237	82,072	81,871
1+9	Cero	82,514	82,461	82,105
1+10	Positiva	82,774	82,331	82,055
1+11	Negativa	82,816	82,46	82,094
1+12	Cero	82,788	82,563	82,167
1+13	Positiva	82,83	82,642	82,31

Tabla 46. Eficiencia en función de la distorsión armónica

Fuente [91]

Desbalance de tensiones en motores de inducción

El desbalance trifásico es el fenómeno que ocurre en sistemas trifásicos donde las tensiones y/o ángulos entre fases consecutivas no son iguales. El balance perfecto de tensiones es técnicamente inalcanzable. El continuo cambio de cargas presentes en la red, causan una magnitud de desbalance en permanente variación. La conexión de cargas residenciales de naturaleza monofásica, provocan un estado de carga en el sistema trifásico que no es equilibrado entre fases, de allí que las caídas de tensión del sistema tampoco serán equilibradas, dando por resultado niveles de tensión desiguales [95].

Los sistemas desbalanceados pueden analizarse a partir de la representación por medio de tres sistemas trifásicos equivalente de secuencia, tal como se observa en la Figura 112 y que corresponde a dos ternas (trifásicas) simétricas y una tercera compuesta por una terna de igual magnitud, pero de igual fase; La terna de secuencia positiva corresponde al flujo de potencia que proviene de la red hacia la carga, es decir, desde el generador hacia aguas abajo. La potencia suministrada o energía eléctrica generada tiene únicamente representación de secuencia positiva, o sea, no existe generación de secuencia negativa u homopolar, en los sistemas de generación simétricos; La terna de secuencia negativa(o componente negativa), es una indicación de la medida de desbalance existente en el sistema (trifásico), o sea, de la falta de simetría entre los fasores de tensión en el punto de conexión.

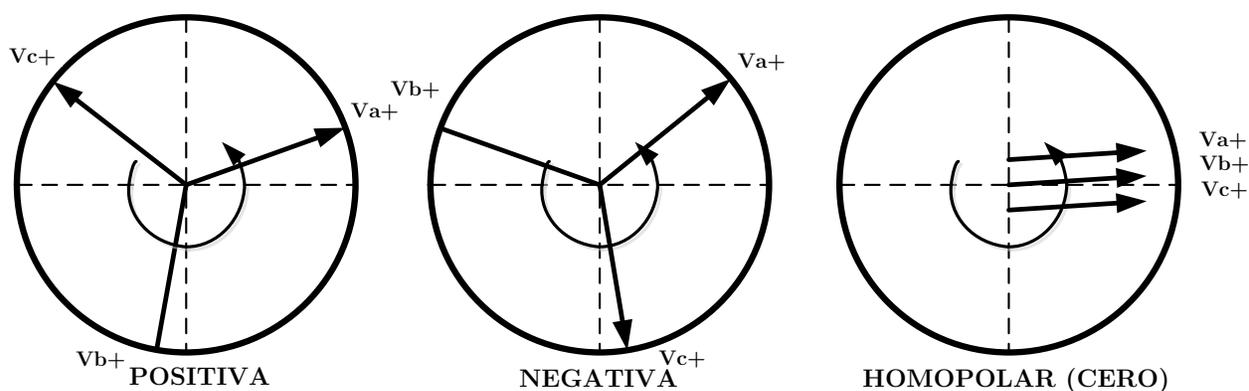


Figura 112. Componentes simétricas: Secuencias

Fuente: [95]

La presencia de componentes de secuencia homopolar, se vincula a la conexión respecto de tierra. Las corrientes homopolares son aquellas que no cierran el circuito por las fases activas, sino que lo hacen por el neutro o por tierra, si existiera vinculación galvánica con el circuito. Las tensiones homopolares en un sistema estrella se encuentran en el centro de estrella de cargas, cuya magnitud se mide respecto de tierra o del centro estrella de generación.

Efectos en el rendimiento del motor

El efecto del desbalance de tensiones en motores de inducción polifásicos equivale a la introducción de “tensión de secuencia negativa”, lo que significa una rotación opuesta a la producida con tensiones equilibradas. Esta tensión de secuencia negativa ocasiona un flujo opuesto a la rotación del rotor en el entre hierro, produciendo un incremento en las corrientes. Una pequeña tensión de secuencia negativa puede producir en los devanados corrientes considerablemente excesivas comparadas con las presentes en condiciones de tensión balanceada.

Efectos en el par del motor

El par de rotor bloqueado y el par máximo se reducen cuando la tensión aplicada es desbalanceada. Si el desbalance son extremadamente graves, los torques podrían no ser adecuados para la aplicación.

Efectos en la velocidad del motor a plena carga

La velocidad del motor a plena carga se reduce ligeramente cuando el motor opera con tensiones desbalanceadas.

Efectos en las corrientes del motor

La corriente de rotor bloqueado tendrá el mismo grado de desbalance presente en las tensiones, pero la potencia de rotor bloqueado tendrá un leve incremento.

Las corrientes a una velocidad normal de operación con tensiones desbalanceadas presentarán un alto grado de desbalance, de alrededor de 6 a 10 veces la tensión desbalanceada.

Los análisis de laboratorio indican que hasta un 2% de desbalance, los motores no ven muy afectados. Por encima del 2%, la eficiencia se verá reducida, requiriéndose una desclasificación o reducción de la potencia de la máquina [95].

Límites permitidos por norma para el desbalance de tensión en la red.

Desde el lado de la normativa vigente, se identifican algunos límites permisibles para el desbalance en la red:

- Grado 1: $u_n^{64} \leq 2\%$ y Grado 2: $u_n \leq 3\%$ [96]
- $u_n \leq 2\%$ y bajo especiales condiciones $u_n \leq 3\%$ [97]
- $u_n \leq 2\%$ y bajo especiales condiciones $u_n \leq 3\%$, correspondiente al valor percentil 95% de un registro de 1 semana cada 10 minutos [98].

Desde el punto de vista de algunos países los límites permisibles para el desbalance en sistemas de distribución de baja tensión (BT) se recomienda que no exceda el 5% de desbalance, porque de lo contrario deberán tomarse medidas correctivas. Para el caso

⁶⁴ u_n es el factor de desbalance de secuencia negativa

de media (MT) y alta tensión (AT), los desequilibrios de tensión deben ser aún más restrictivos, entre el 1% y el 3%.

En países como Bélgica, Brasil, Italia, Alemania, Ecuador y Guatemala, el desequilibrio se calcula en función del porcentaje de secuencia negativa tal como lo define la IEC en Ecuación 0-33. Los límites son los siguientes [32], [99]:

- **Bélgica**
 $u_n < 2\%$ para MT
 $u_n < 1\%$ para AT
- **Brasil**
 $u_n < 2\%$
- **Italia**
 $u_n < 2\%$ para MT
 $u_n < 1\%$ para AT
- **Alemania**
 $u_n < 2\%$
- **Ecuador**
 $u_n < 1\%$ para tensiones mayores a 90 kVT
- **Guatemala**
 $u_n < 3\%$

En cuanto a la operación y especificación de motores (en BT), [15], establece que: “Los motores polifásicos de corriente alterna deberán operar satisfactoriamente bajo condiciones de operación a carga nominal cuando el desequilibrio de tensión no exceda del 1%”.

Medición de Desbalance de Tensión

El concepto de medición de desbalance, expresa la relación entre la tensión de secuencia negativa respecto de la positiva. En la práctica, esta relación puede encontrarse expresada de varios modos.

Existen diferentes normas donde se especifica el cálculo del desbalance de tensión, a continuación se presentan algunas de ellas. El desbalance de secuencia negativa según [100] y [101] es definido como el cociente de la componente de tensión de secuencia negativa con la secuencia positiva, como sigue en Ecuación 0-33.

$$u_n = \frac{|U^-|}{|U^+|} = \frac{\sqrt{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}}{\sqrt{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} 100\%$$

Ecuación 0-33

y

$$\beta = \frac{U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4}{(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)^2}$$

Ecuación 0-34

En dónde:

- u_n Es el factor de desbalance de secuencia negativa.
- U^- Es la componente de tensión de secuencia negativa.
- U^+ Es la componente de tensión de secuencia positiva.
- U_{AB} Es la diferencia de tensión entre las fases A y B.
- U_{BC} Es la diferencia de tensión entre las fases B y C.
- U_{CA} Es la diferencia de tensión entre las fases C y A.

Esta medición de desbalance considera únicamente las componentes de tensión de frecuencia fundamental. El error cometido si se considera el valor RMS total sería mínimo, pero se mezclarían las fases de la fundamental con magnitud RMS total. Debido a que el desbalance provoca la presencia de componentes de secuencia negativa y homopolar (además de la positiva, única que aporta potencia), se requiere también medir el factor de desbalance homopolar, así:

$$u_0 = \frac{|U^0|}{|U^+|} 100\%$$

Ecuación 0-35

En dónde:

- u_0 El factor de desbalance homopolar.
- U^0 La componente de tensión de secuencia cero.
- U^+ La componente de tensión de secuencia positiva.

El coeficiente de desbalance definido por [100], representa también el grado de proporción de la potencia suministrada a la carga (sec. positiva), respecto de la potencia de falla en el punto de conexión. Haciendo una generalización para todos los casos de carga, se puede decir que el desbalance es aproximadamente igual a la relación entre la potencia de carga y la potencia de falla trifásica en el punto de conexión (potencia de cortocircuito). Por otra parte [102] y [103], definen el factor de desbalance de secuencia negativa como el cociente entre la máxima diferencia entre las tensiones de fase y la tensión promedio, con la tensión promedio.

$$u_n = \frac{\Delta U_{m\acute{a}x}}{\bar{U}}$$

Ecuación 0-36

En donde:

- u_n Es el factor de desbalance de secuencia negativa.
- $\Delta U_{m\acute{a}x}$ Es la máxima diferencia entre las tensiones de fase.

\bar{U} Es la tensión promedio.

La máxima diferencia entre las tensiones de fase se calcula de la siguiente forma:

$$\Delta U_{m\acute{a}x} = m\acute{a}x(U_{AB} - \bar{U}, U_{BC} - \bar{U}, U_{CA} - \bar{U})$$

Ecuación 0-37

En dónde:

$\Delta U_{m\acute{a}x}$ La máxima diferencia entre las tensiones de fase.

\bar{U} La tensión promedio.

U_{AB} La diferencia de tensión entre las fases A y B.

U_{BC} La diferencia de tensión entre las fases B y C.

U_{CA} La diferencia de tensión entre las fases C y A.

Y la tensión promedio está dada por la Ecuación 0-38

$$\bar{U} = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}$$

Ecuación 0-38

En dónde:

\bar{U} Es la tensión promedio.

U_{AB} Es la diferencia de tensión entre las fases A y B.

U_{BC} Es la diferencia de tensión entre las fases B y C.

U_{CA} Es la diferencia de tensión entre las fases C y A.

Así mismo [97] define el factor de desbalance de secuencia negativa de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$u_n = \sqrt{\frac{6(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)}{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}} - 2$$

Ecuación 0-39

Variables que corresponde a:

u_n Factor de desbalance de secuencia negativa.

U_{AB} Es la diferencia de tensión entre las fases A y B.

U_{BC} Es la diferencia de tensión entre las fases B y C.

U_{CA} Es la diferencia de tensión entre las fases C y A.

Anexo C: Aspectos generales de la compatibilidad electromagnética.

La realidad de los sistemas eléctricos, lejos de ser un entorno ideal para la operación, involucra problemas de calidad de la energía y perturbaciones electromagnéticas que pueden comprometer seriamente la seguridad y la eficiencia de la instalación y los equipos en su interior. Las perturbaciones pueden ocurrir durante la operación normal del sistema eléctrico, como en el arranque de motores o conexión o desconexión de grandes cargas, o durante situaciones anormales como en el evento durante el despeje de una falla. A partir de esto, se ha incrementado el interés en la compatibilidad electromagnética (CEM), que representa la capacidad de una máquina, aparato o sistema eléctrico o electrónico de operar sin problemas en un entorno electromagnético perturbador sin perjudicar, a su vez, el funcionamiento de otros componentes del sistema [104].

Elementos que intervienen en la CEM.

El número cada vez mayor de aplicaciones eléctricas y electrónicas también ha dado lugar a un aumento de los problemas en su operación. Uno de los factores que contribuyen en esta problemática se debe a que los dispositivos en uso se encuentran en interferencia entre ellos como resultado de sus propiedades electromagnéticas. Si todos estos dispositivos pudiesen operar juntos en armonía, el mundo sería electromagnéticamente compatible. Desafortunadamente, la realidad es distinta y los problemas de interferencia y Compatibilidad electromagnética EMI⁶⁵ deben ser resueltos. De esta manera entendemos la EMI como la degradación en el desempeño de un dispositivo, equipo o sistema, causada por una perturbación electromagnética [105]. En términos generales, el modelo que envuelve la compatibilidad electromagnética puede ser descrito por tres elementos principales (Ver Figura 113) La fuente o emisor que causa la interferencia, un mecanismo o medio de acople y el sistema perturbado.

⁶⁵ EMI: Interferencia electromagnética.



Figura 113. Componentes de la compatibilidad electromagnética

Fuente: [96].

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

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

Fuentes y clasificación de perturbaciones electromagnéticas.

En general existen dos tipos de contextos para determinar el origen de las perturbaciones, en el primero se busca establecer la fuente de la perturbación y en el segundo se busca definir si esta es interna o externa al sistema de energía en particular; teniendo en cuenta que el límite de un sistema de potencia se establece a partir del medidor, haciendo referencia al "usuario" y al "operador de red".

Según otra interpretación, la preocupación se da por la naturaleza de la fuente de interferencia, luego se describe en términos técnicos tales como rayos, conmutación de carga, fallas del sistema eléctrico y cargas no lineales. Dependiendo de las condiciones locales, una puede ser más importante que la otra, pero todas deben ser reconocidas.

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

La tendencia general de los usuarios consiste en atribuir la mayor parte de sus problemas al operador de red. Sin embargo muchas fuentes de perturbaciones, se encuentran dentro de la misma instalación y son atribuibles a la operación de equipos que hacen parte del usuario final Figura 114.

Por último, se encuentran las fuentes de perturbaciones debidos a fallas del sistema, pero que no están asociadas con la fuente de alimentación, como el caso de las descargas electrostáticas, descargas atmosféricas, interferencia electromagnética (IEM) y diferencias de potencial a tierra.

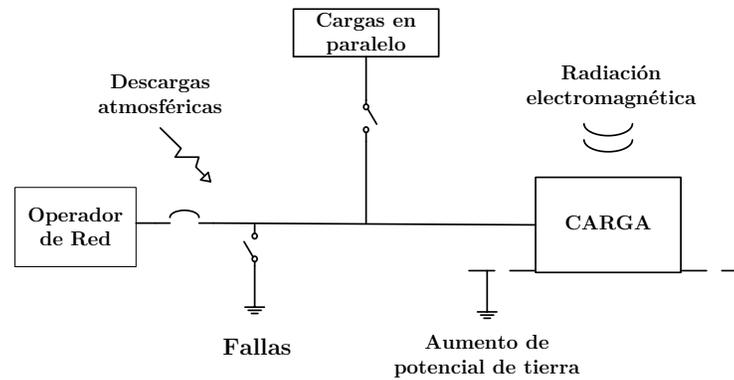


Figura 114. Origen de las perturbaciones electromagnéticas

Fuente: [10]

En la práctica resulta muy útil clasificar las fuentes de perturbaciones electromagnéticas de la siguiente manera [106].

- **Fuentes naturales.** Tales como rayos, ruido cósmico atmosférico, descargas electrostáticas.
- **Fuentes técnicas.** Son aquellas fuentes presentes en la conexión y desconexión de grandes cargas, controladores por tiristor, generadores de alta frecuencia, osciladores locales, etc.
- **Fuentes con espectro de frecuencia de banda estrecha.** Son fuentes de señales con frecuencias discretas tales como: Transmisores de radio y radioaficionado, transmisor-receptor portátil, radares, generadores industriales de alta frecuencia, hornos microondas, circuitos de potencia., máquinas de soldadura, receptores de sonido o FX, dispositivos de ultrasonido, convertidores de corriente. Estos aparatos pueden generar campos electromagnéticos sustanciales, sobre todo a su alrededor.
- **Fuentes con espectro de frecuencia de banda ancha.** Son potentes disruptores en las instalaciones electrónicas, puesto que dentro de su amplio rango se presentan altas frecuencias. Fuentes de este tipo pueden ser: motores, lámparas de descarga, conmutadores de línea, seccionadores en fuentes de energía, ruidos, circuitos de control con semiconductores, dispositivos de conmutación (relés, contactores) descargas electrostáticas, descargas atmosféricas, efecto corona y descargas nucleares.
- **Fuentes regulares e imprevistas.** Las diferencias entre las fuentes regulares e imprevistas pueden resultar útiles para obtener una configuración de Compatibilidad electromagnética; cuando se deben determinar los rangos de frecuencia presentes en las fuentes que operan de manera regular en la instalación o durante la caracterización de una perturbación debida a fuentes desconocidas.
- **Fuentes continuas e intermitentes.** Puede resultar necesario diferenciar entre fuentes de perturbaciones continuas o intermitentes cuando por ejemplo, se desea mitigar la perturbación escalonando el funcionamiento de la fuente y de la magnitud. Ejemplo: Desconexión de receptores durante una tormenta

Clasificación perturbaciones electromagnéticas

La naturaleza y el grado de los fenómenos perturbadores están ligados al canal de acoplamiento a través del cual las perturbaciones entran o salen de los sistemas. Estas perturbaciones electromagnéticas inciden directamente sobre los sistemas eléctricos por radiación o por conducción [107]. Establecer un entorno electromagnético en el que los sistemas eléctricos y electrónicos funcionen sin interferencia es muy complejo. Para los efectos de esta clasificación, se han definido tres categorías con el fin de describir todas las perturbaciones electromagnéticas presentes en el entorno de un sistema:

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

Estas categorías permiten clasificar las perturbaciones electromagnéticas teniendo en cuenta su canal de acoplamiento y frecuencia (Ver Tabla 47). Las perturbaciones conducidas y radiadas se trataran en detalle en el siguiente numeral. En cuanto a la frecuencia, para el contexto del presente informe y de acuerdo con el enfoque proporcionado en la referencia [107], el término baja frecuencia se aplica a frecuencias mayores o iguales 9 kHz; y alta frecuencia se aplica a frecuencias superiores a 9 kHz.

Tipo de Perturbaciones	Frecuencia de operación	Perturbación
Conducidas	Baja frecuencia	Armónicos, Superposición de señales, Caídas de tensión e interrupciones, Desbalance de tensión, Tensiones inducidas, Variaciones de frecuencia, Corrientes de CC en redes de CA.
	Alta frecuencia	Ondas continuas inducidas de tensión o corriente, Transitorios unidireccionales y oscilatorios
Radiadas	Baja frecuencia	Campos Eléctricos y Magnéticos.
	Alta frecuencia	Campos Eléctricos y Magnéticos, Campos electromagnéticos, Ondas continuas, Transitorios
Descargas Electrostáticas		
Pulsos Nucleares Electromagnéticos		

Tabla 47. Clasificación de las perturbaciones electromagnéticas

Fuente: [107]

Perturbaciones conducidas.

Estas perturbaciones se transmiten a través de conductores metálicos (cables o estructuras de cableado de señal y/o alimentación), transformadores, bobinas y condensadores. Teniendo en cuenta que los conductores también pueden comportarse como antenas, la perturbación puede convertirse en una interferencia por radiación y viceversa [106].

Como lo indica la Tabla 48, las frecuencias presentes en las perturbaciones conducidas están directamente relacionadas con su fuente. Muchas de las fuentes mencionadas dependen de la red de alimentación, dado que las perturbaciones se inyectan y se propagan a través de la misma. De esta forma, la red de alimentación puede ser en sí misma fuente de perturbaciones continuas e intermitentes.

Fuente	Espectro de frecuencia predominante en MHz
Tubos fluorescentes	0,1-3
Lámparas de vapor en mercurio	0,1-1
Sistemas de procesamiento de datos	0,05-20
Conmutadores	2-4
Contactos de un conmutador de línea	10-20
Contactores y relés	0,05-20
Conmutadores de red	0,5-25
Fuentes de alimentación DC (sincronizada)	0,1-25
Efecto Corona	0,1-10
Aspiradora	0,1-1

Tabla 48. Ejemplos de fuentes de perturbaciones conducidas y su espectro de frecuencia
Fuente: [106]

Resulta útil, para facilitar el análisis de las redes eléctricas de potencia y de comunicaciones, considerarlas como un conjunto de puertos, que conforman el canal de acople de las perturbaciones conducidas, (Ver Figura 115):

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

- El puerto de alimentación es un conductor o cable conectado al sistema que lleva la energía eléctrica (AC o CC) para la operación.

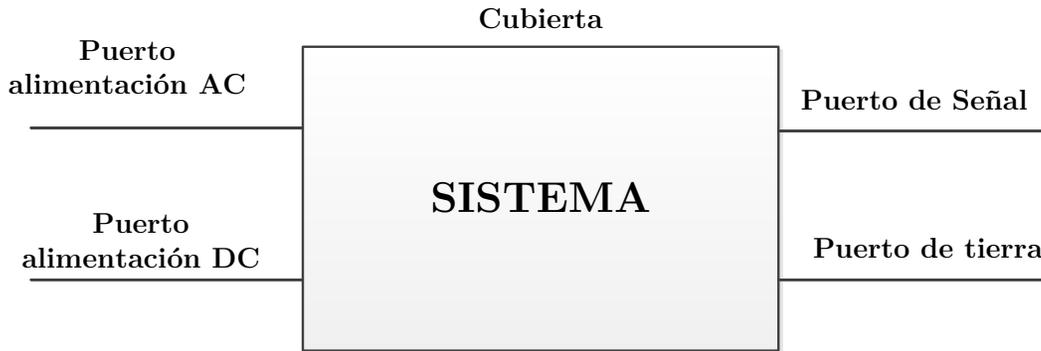


Figura 115. Puertos de entrada de las perturbaciones electromagnéticas conducidas
Fuente: [10]

La importancia de diferenciar los puertos que intervienen en las perturbaciones conducidas permite identificar los diferentes tipos de fenómenos que pueden ocurrir en los sistemas de potencia en comparación con los sistemas de comunicación, así como la importancia de las prácticas de puesta a tierra para cada uno de los sistemas [107], puesto que la tierra a menudo funciona como una referencia para cada uno de estos, tal y como se aprecia en la Figura 116 y Figura 117, estas perturbaciones pueden circular a través de lazos cerrados, conformados por los conductores activos (circuito en modo diferencial) o por lazos compuestos por conductores activos y conductores de tierra (circuito en modo común o asimétrico).

Adicionalmente, cuando existen diferentes circuitos que utilizan líneas comunes y/o impedancias de acoplamiento, cada vez que cambie la corriente en uno de los circuitos, cambiará la tensión en el conductor común, de modo que los circuitos se influncian o se afectan mutuamente generando perturbaciones conducidas por acoplamiento galvánico [104].

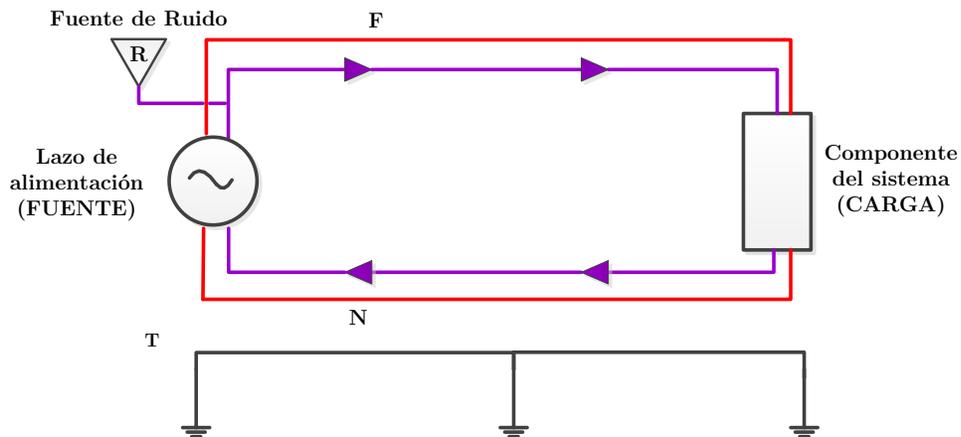


Figura 116. Circuito en modo diferencial
Fuente: [59] .

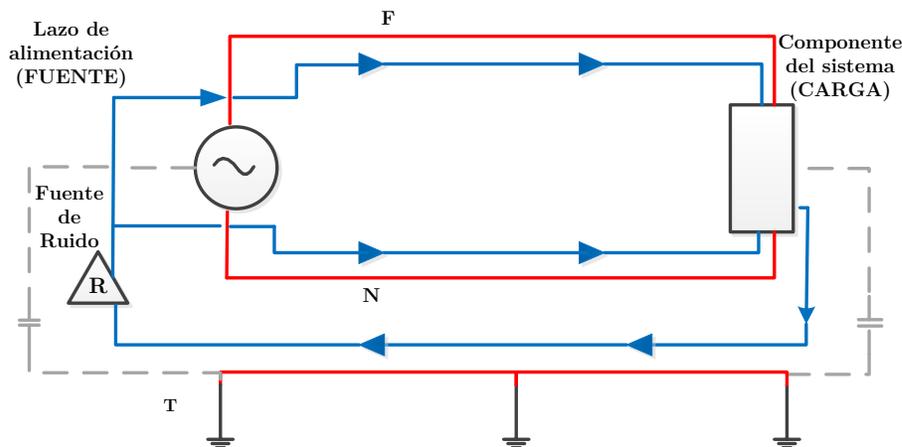


Figura 117. Circuito en modo común

Fuente: [59] .

Perturbaciones radiadas.

A diferencia de las perturbaciones conducidas, que se producen en diversos medios conductores, las perturbaciones radiadas se producen en el medio que rodea al equipo. La radiación electromagnética puede ser el resultado de fuentes intencionales o no intencionales, incluyendo campos electromagnéticos en un espectro de frecuencias de 0 Hz (campos estáticos) a 400 GHz.

A bajas frecuencias los campos eléctricos y magnéticos actúan de forma independiente mientras que a altas frecuencias los campos eléctricos se combinan para constituir un campo electromagnético, que viaja por el espacio a la velocidad de la luz, luego pueden producir perturbaciones a distancias significativamente mayores.

La naturaleza de la perturbación y sus características se mencionan enseguida en la Tabla 49.

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

Tabla 49. Tipos y características de las perturbaciones radiadas

Fuente: [108].

Teniendo en cuenta que el campo eléctrico es proporcional a la tensión, este puede causar perturbaciones a cierta distancia en las proximidades de instalaciones eléctricas o en los elementos conductores muy cercanos (ejemplo: conductores en una misma

canalización). Por su parte, el campo magnético es proporcional a la intensidad de la corriente eléctrica. En muchos sistemas de potencia eléctrica, las corrientes pueden alcanzar valores muy elevados, de forma que los campos magnéticos pueden ser fuertes y el riesgo de que se produzca IEM⁶⁶ se incrementa [104].

Para caracterizar las fuentes potenciales de perturbaciones electromagnéticas se consideran todos los dispositivos en los que se generen altas frecuencias (Ver Tabla 50) y en los que los componentes funcionen, ya sea de forma deliberada o no, como antenas.

Fuente	Espectro de frecuencia predominante (MHz)
Cirugía de alta frecuencia	0,4-5
Interruptor biestable	0,015 - 400
Contactos de termostato (arco)	30-1000
Motores	0,01-0,4
Arco voltaico de conmutación	30-200
Dispositivo de alimentación de CC	0,1-30
Cubiertas de carcasas no tratadas	0,01-10
Tubos fluorescentes, arcos voltaicos	0,1-3
Semiconductor- multiplexador	0,3-0,5
Contactos de levas	10-200
Circuitos de conmutación	0,1-300

Tabla 50. Fuentes de perturbación electromagnética por radiación y espectros de frecuencia

Fuente: [106].

⁶⁶ IEM: Interferencia electromagnética

Anexo D: Curva CBEMA.

Información adicional

Los dispositivos electrónicos tienen típicamente un cierto nivel de inmunidad a las variaciones de tensión, que pueden ser definidas por las pruebas de calidad de la energía y desempeño para definir lo que se conoce comúnmente como la curva tipo CBEMA⁶⁷ o perfil para el dispositivo bajo prueba (Ver Tabla 50).

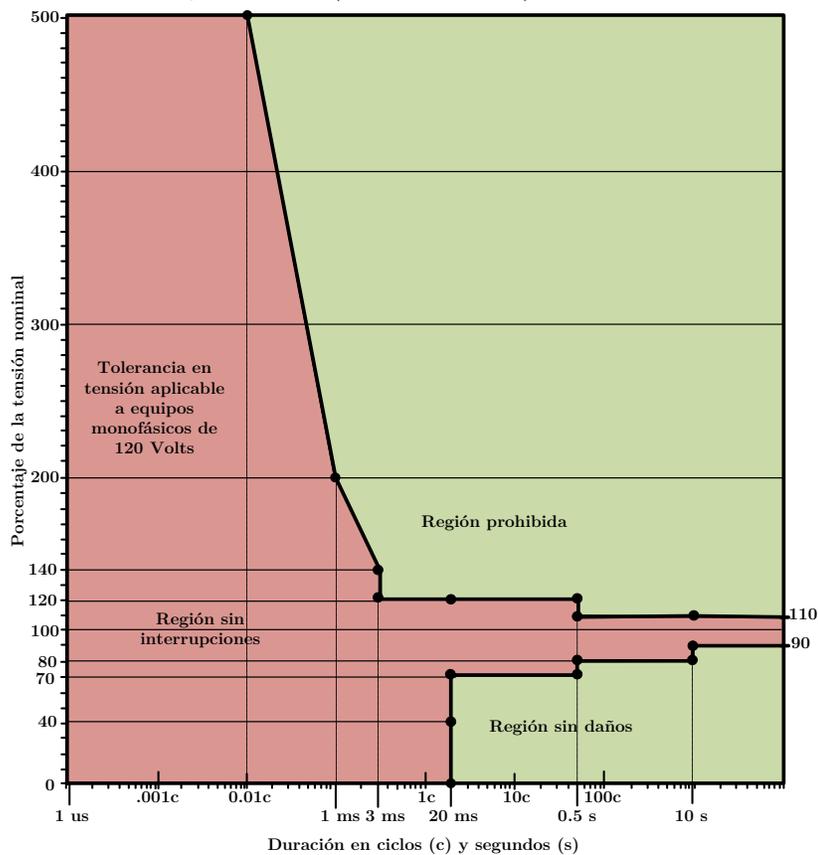


Figura 118. Curva CBEMA, tolerancia de los equipos a variaciones de tensión del sistema de alimentación

Fuente: [10].

⁶⁷ Computer and Business Equipment Manufacturers Association.

Anexo E: Recomendaciones para la construcción de las mallas de referencia de señal SRG.

Información adicional

- a) En todo caso se debe verificar el cumplimiento del Código Eléctrico Colombiano y otros códigos y normas aplicables relacionadas con la conexión a tierra de forma segura. No existen conflictos entre los requerimientos de puesta a tierra de seguridad y las configuraciones para alta frecuencia aplicadas a los sistemas eléctricos y su equipo electrónico asociado.
- b) Seleccionar una malla de referencia de señal adecuada, asegurándose que se ha diseñado, instalado y mantenido adecuadamente.
- c) Conecte de forma permanente y efectiva la malla de referencia de señal a todos los elementos de acero estructural y a cada trayectoria metálica accesible (por ejemplo, ductos, canalizaciones, bandejas de cables y tubos) que se crucen con la estructura de referencia de señal en cualquier plano, o que se encuentren a menos de 1,8 m de ella.
- d) Si existe un único punto de entrada para los conductores de alimentación y existen los conductores de conexión a tierra y otros elementos metálicos en el lugar, entonces es aceptable la conexión de la SRG mediante SPG⁶⁸. De esta manera las cargas electrónicas instaladas en el sistema de referencia de señal pueden ser conectadas a tierra mediante MPG⁶⁹ o SPG a la malla de referencia de la señal, dependiendo de la frecuencia de la señal de interés.

⁶⁸ SPG (Single Point Grounding): Único punto de conexión a tierra.

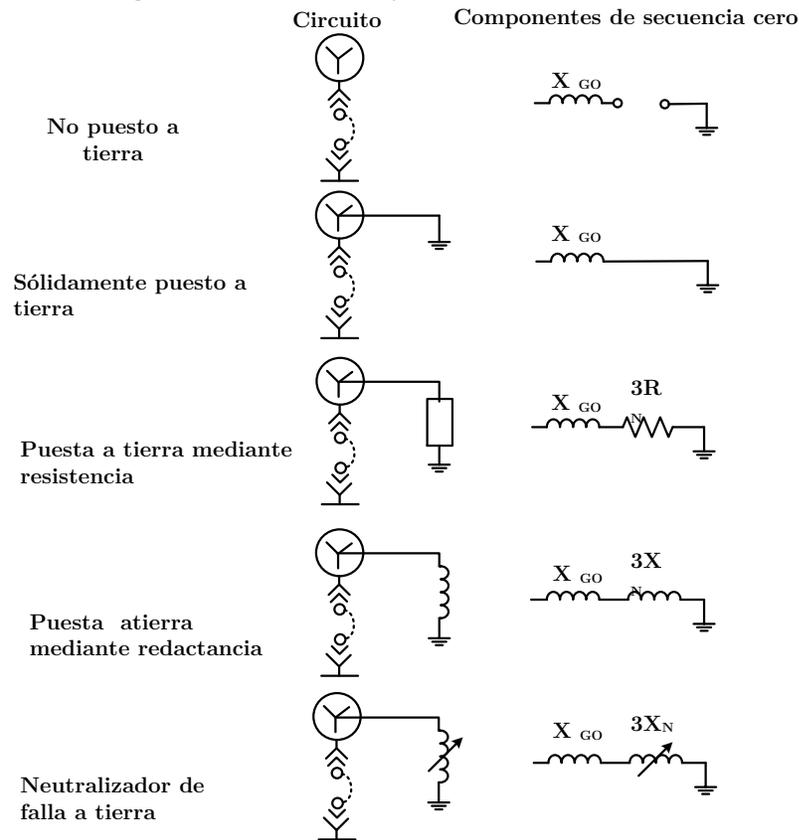
⁶⁹ MPG (Múltiple Point Grounding): Múltiples puntos de conexión a tierra.

- e) Conecte la SRG⁷⁰ a cada pieza de equipo electrónico y cualquier otro equipo eléctrico o mecánico ubicado en el sistema de referencia de señal.
- f) Las conexiones de equipotencialización a la SRG deben ser tan cortas como sea posible, sin pliegues o dobleces agudos. Es preferible la aplicación de bandas flexibles en vez conductores redondos.
- g) Cuando, de acuerdo con los requisitos del fabricante, debe ser utilizado más de un conductor de conexión para cada pieza del equipo. Estos conductores deben conectarse a esquinas opuestas del equipo y a los puntos más cercanos (pero separados) en la SRG. Estos conductores deben ser de diferentes longitudes.
- h) En lo posible, los aparatos electrónicos no se deben instalar cerca a los bordes exteriores de la SRG.
- i) Debe evitarse ubicar equipos sensibles importantes, conectados a la SRG muy cerca del acero de refuerzo de la construcción o de otros posibles caminos de corrientes parciales de rayo (se recomienda 1.8 m mínimo).
- j) Todos los sistemas derivados independientes, que alimenten equipos ubicados la SRG deben tener su punto de conexión a tierra de alimentación (es decir, conexión neutro-tierra) conectado al sistema de referencia de la señal por una correa de unión adecuada.
- k) Todo equipo de calefacción, ventilación y aire acondicionado además de tuberías correspondientes, tableros eléctricos, transformadores y equipos eléctricos o mecánicos similares al interior del área protegida deben estar unidos a la SRG.
- l) No deben realizarse conexiones de puesta a tierras especiales o complementarias entre puntos remotos, que proporcionen caminos a tierra desde la SRG y los equipos instalados en ella.
- m) Todos los conductores de comunicaciones, datos y los cables de alimentación deben estar sobre o muy cerca de la SRG.
- n) La documentación y los planos de la instalación deben estar completos y detallados, incluyendo la puesta a tierra de equipos de calefacción, ventilación y aire acondicionado, tuberías, canalizaciones y elementos similares. El ingeniero debe especificar los pormenores del diseño y no debe esperar a que los técnicos completen la instalación.

⁷⁰ SRG (Single Reference Grid): Malla de referencia de señal.

Anexo D: Métodos de conexión a tierra [11]

Los sistemas eléctricos pueden emplear diferentes métodos para conectar el neutro a tierra. Estos métodos pueden ser divididos en dos categorías generales: Sólidamente puesto a tierra y puesto a tierra mediante una impedancia. A su vez, la puesta a tierra por impedancia se divide en puesta a tierra por: reactancia, resistencia y neutralizador de falla a tierra. La Figura 119 muestra ejemplos de estos métodos.



X_{GO} = Reactancia de frecuencia cero del transformador o generador

X_N = Reactancia del reactor de puesta a tierra

R_N = Resistencia del resistor de puesta a tierra

Figura 119. Métodos de puesta a tierra del neutro y sus diagramas equivalentes

Fuente: [11]

- Sistema no aterrizado (intencionalmente)

En un sistema no puesto a tierra, no existe una conexión intencional entre los conductores del sistema y tierra. Sin embargo, como lo muestra la Figura 120, siempre existirá un acoplamiento capacitivo entre los conductores del sistema, y también entre conductores del sistema y tierra. Dado que la capacitancia entre fases tiene poco efecto en las características de puesta a tierra del sistema, es despreciada. Por simplicidad, la capacitancia distribuida a tierra, X_{co} , es asumida balanceada.

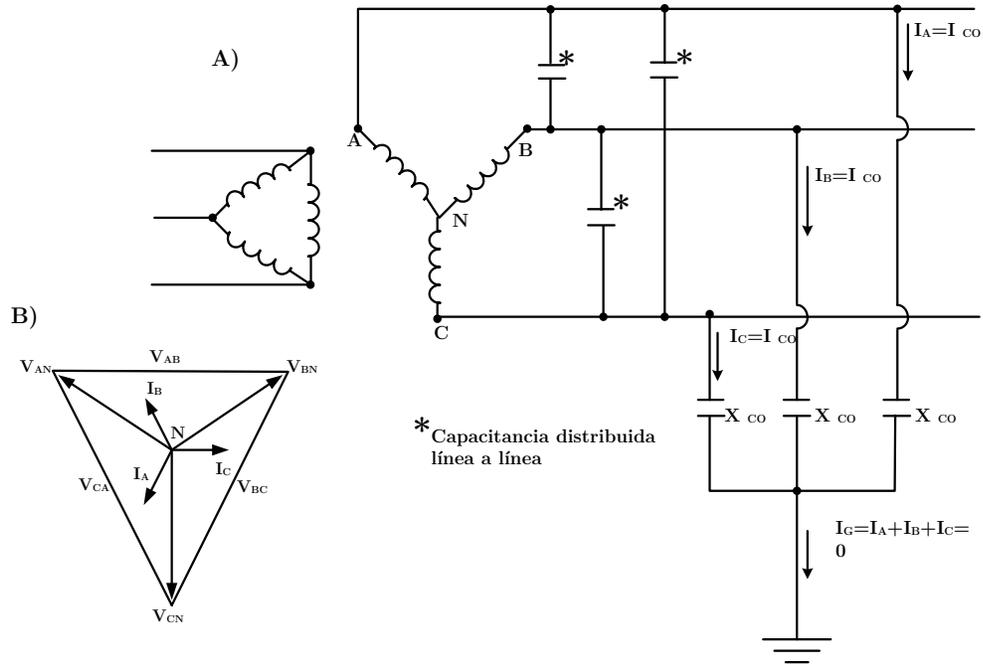


Figura 120. Sistema no puesto a tierra: (A) Configuración del circuito, (B) Diagrama vectorial.

Fuente: [11].

En condiciones normales, con tensiones trifásicas balanceadas en las líneas, las corrientes capacitivas, I_{co} , en la fase serán iguales y desplazadas entre ellas 120° . De la misma manera las tensiones de fase a tierra, serán de igual magnitud y desplazadas 120° entre ellas. Mientras el neutro de las capacitancias distribuidas este al potencial de tierra, permite que el neutro del transformador también se encuentre al potencial de tierra. Si uno de los conductores del sistema, la fase C por ejemplo, falla a tierra, la corriente que fluirá a través de la capacitancia a tierra desaparecerá, puesto que no existe diferencia de potencial. La tensión a tierra a través de las dos capacitancias distribuidas restantes aumentara a valores de tensión de línea. De esta manera la corriente I_{co} , en las dos fases (A, B) se incrementara $\sqrt{3}$ veces. Adicionalmente las tensiones de fase estarán desplazadas entre ellas 60° . De esta manera, en un sistema no puesto a tierra, es posible que se presenten sobretensiones y desbalances que pueden afectar seriamente los equipos conectados, haciendo que su empleo ya no sea recomendado.

Sistema puesto a tierra mediante una resistencia.

En un sistema puesto a tierra mediante una resistencia, el neutro del transformador o generador está conectado a tierra a través de una resistencia. Comúnmente, la resistencia tiene un valor considerablemente alto comparado con la reactancia del sistema donde se ubica la resistencia. A consecuencia de esto, la corriente de falla a tierra es limitada por esta resistencia (Ver Figura 121. Limitación de la corriente de falla en el método de puesta a tierra mediante resistencia).

Las razones para limitar esta corriente mediante la resistencia incluyen:

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

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

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

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

Este método de puesta a tierra es generalmente utilizado en:

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

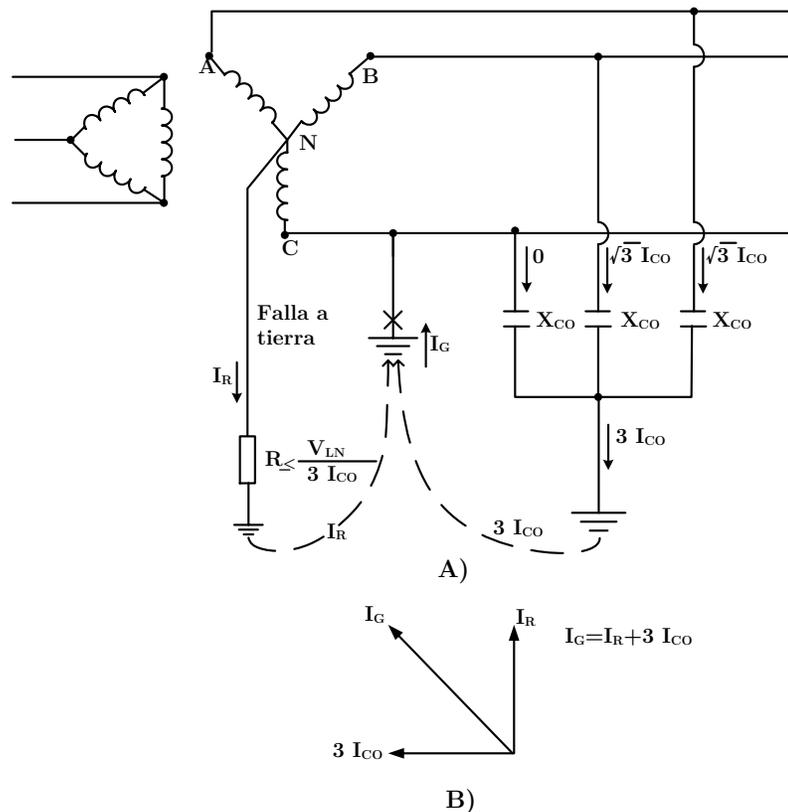


Figura 121. Limitación de la corriente de falla en el método de puesta a tierra mediante resistencia

Fuente: [11]

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

Puesta a tierra mediante una reactancia.

Como se muestra en la Figura 122, esta configuración, utiliza una reactancia para conectar el neutro a tierra. Dado que la corriente que puede circular durante una falla a tierra en este tipo de sistema es función de la reactancia del neutro, su magnitud es utilizada usualmente como criterio para describir el grado de conexión a tierra.

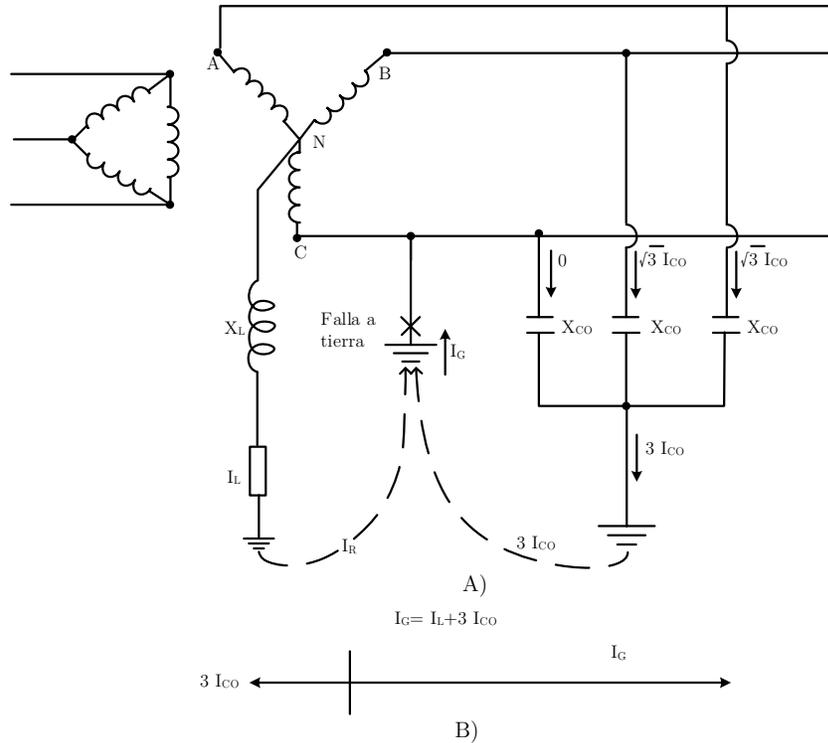


Figura 122. Falla monofásica a tierra en un sistema puesto a tierra mediante una reactancia. A) Configuración del circuito, B) Diagrama fasorial

Fuente: [11].

La conexión a tierra mediante una reactancia es típicamente reservada para aplicaciones donde se desea limitar la magnitud de la corriente de falla a una magnitud relativamente cercana a la de una falla trifásica. Esta situación suele presentarse cuando una subestación grande, alimenta un sistema de distribución de media tensión, y la impedancia de secuencia cero de los transformadores reductores en la subestación causa que la corriente de falla monofásica exceda la magnitud de la corriente de una falla trifásica.

Adicionalmente también es aplicado cuando se desea alimentar cargas monofásicas directamente en los terminales de salida de un generador, sin la intervención de un transformador de aislamiento. En este caso, la corriente en el neutro del generador debida al desbalance será limitada por esta reactancia. El empleo de reactancias para limitar la corriente de fallas o desbalances, suele ser menos costoso que utilizar resistencias, si la magnitud de la corriente de falla deseada es de orden de varios miles de amperes.

Puesta a tierra resonante (neutralizador de falla a tierra)

Un neutralizador de falla a tierra corresponde a una reactancia conectada entre el neutro de un sistema y tierra. Esta reactancia está especialmente seleccionada o sintonizada para resonar con la capacitancia distribuida X_{CO} del sistema, de tal manera

que la corriente de falla a tierra sea resistiva y de una magnitud pequeña (Figura 123). La resistencia r representa las pérdidas de la reactancia. La corriente de falla a tierra resultante estará en fase con la tensión monofásica, luego tanto la tensión como la corriente se hacen cero de manera simultánea.

Para explicar su funcionamiento, la capacitancia por fase se asume balanceada. Cuando existe una falla a tierra en una de las fases del sistema (la fase C en la Figura 123), se le aplicara una tensión monofásica a la reactancia. Esto produce una corriente inductiva en atraso I_L , que fluye por la reactancia de puesta a tierra y por el transformador. Al mismo tiempo una corriente capacitiva en adelanto $3I_{co}$, fluye por las capacitancias distribuidas de las otras dos fases no aterrizadas. De esta manera, la corriente en atraso que viene de la reactancia y la corriente en adelanto de las capacitancias distribuidas están prácticamente desfasadas 180° .

Ajustando de forma adecuada esta reactancia (seleccionando el tap correcto), las componentes inductivas y capacitivas de la corriente pueden neutralizarse mutuamente, dejando relativamente una pequeña componente resistiva I_r , fluyendo durante la falla., puesto que al realizarse cambios en los parámetros distribuidos del sistema el circuito resonante debe ser sincronizado de nuevo, su aplicación es ideal en sistemas que no envuelvan switcheo o reconfiguraciones de los circuitos frecuentes.

Este método ha sido aplicado en sistemas de transmisión de alta tensión y también se encuentra de manera poco frecuente en la conexión a tierra de generadores de grandes centrales. Sin embargo, su aplicación es relativamente común en sistemas de distribución en Europa y Reino Unido.

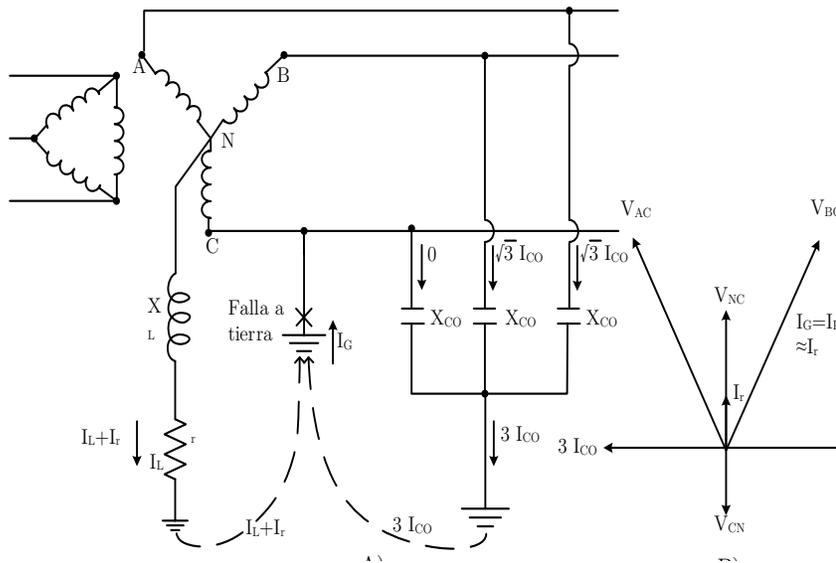


Figura 123 Falla monofásica a tierra en un sistema de puesta a tierra resonante. A) Configuración del circuito B) Diagrama vectorial.

Fuente: [11].

Sistemas sólidamente puestos a tierra.

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

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

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

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

Características de los métodos de conexión a tierra del sistema.

Las ventajas y desventajas de los diferentes métodos de conexión a tierra se resumen en la Tabla 51. Características de los métodos de conexión a tierra

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

Tabla 51. Características de los métodos de conexión a tierra

Fuente: [11]