

**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA**



**PROPUESTA PARA LA DISMINUCIÓN DE LAS INTERFERENCIAS
ELECTROMAGNÉTICAS PRESENTES EN EL EQUIPO DETECTOR
DE DESCARGAS PARCIALES UBICADO EN
LA EMPRESA "ARALVEN S.A."**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA**

Autores:
Coronel Acosta, María Carolina
Orellana Martinez, Ibrahin Eduardo

Tutor:
Francisco José Naveira

Bárbula, Enero de 2008

PROPUESTA PARA LA DISMINUCIÓN DE LAS INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS PRESENTES EN EL EQUIPO DETECTOR DE DESCARGAS PARCIALES UBICADO EN LA EMPRESA "ARALVEN S.A."

**Coronel, Maria; Orellana Ibrahin.
Universidad de Carabobo. Área de Pregrado. Enero 2008
"ARALVEN S.A."**

Resumen

Las interferencias electromagnéticas presentes en el equipo detector de descargas parciales, es un problema que afecta el funcionamiento ideal y correcto de la prueba de aislamiento del cable y que por ende perjudica a la Empresa "ARALVEN S.A.", ya que dificulta el proceso de producción de los cables de potencia. Este problema se aspira corregir, a través de una propuesta para la disminución de dichas perturbaciones la cual incluye una investigación previa del problema, que abarca el estudio de la estructura del laboratorio de alta tensión (Jaula de Faraday), el sistema del conexionado eléctrico y el sistema de puesta a tierra actual, para finalmente plantear un nuevo diseño optimo que cumpla con las mejoras necesarias.

Palabras claves: *Interferencias electromagnéticas, Jaula de Faraday, Descargas parciales, Cables de potencia.*

1. INTRODUCCIÓN

La empresa ARALVEN S.A., fabricantes de cables de cobre y aluminio para transmisión y distribución de energía eléctrica, cuenta con instalaciones experimentales en donde se efectúan ensayos que garantizan la calidad de sus productos. Una de estas instalaciones es un laboratorio de alta tensión, en la cual se efectúa la prueba de descargas parciales, suministrado con equipos de distinta naturaleza (potencia, control, medición), que interaccionan mediante los circuitos que los conectan y se utilizan para realizar el ensayo de medición de nivel de descargas parciales a cables de media tensión, que a su vez exige desarrollarse en un ambiente libre de perturbaciones.

En la actualidad, el ambiente en donde se realiza la prueba de descargas parciales, la cual es una prueba no destructiva que tiene como fin verificar la calidad del aislamiento del cable de potencia, presenta desde hace algunos años un problema de filtración de perturbaciones electromagnéticas, el cual se ha incrementado de manera gradual a través del tiempo. Este fenómeno, se presenta desde el momento en que se energiza el equipo de medición. Sin embargo, cuando el sistema de puesta a tierra de la Jaula de Faraday esta conectado, las perturbaciones son tan elevadas que se hace imposible calibrar el equipo y por tanto tomar alguna medida, como se muestra en la figura 1.

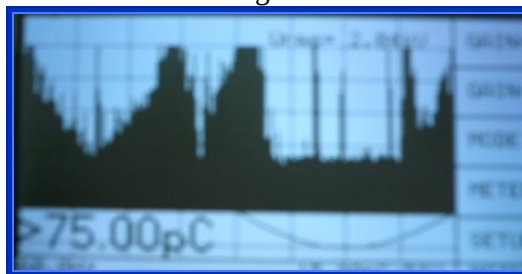


Fig.1 Nivel de interferencia con la conexión del sistema de puesta a tierra (GAIN = 15 picocoulomb/div).

Dada esta situación, la empresa decidió realizar dicho ensayo sin esta conexión, ya que, aunque no se eliminan las perturbaciones por completo, al menos disminuyen lo suficiente como para realizar el ensayo, sin embargo las condiciones no cumplen con los requerimientos mínimos de la normativa. Este efecto de disminución se puede observar en la figura 2.

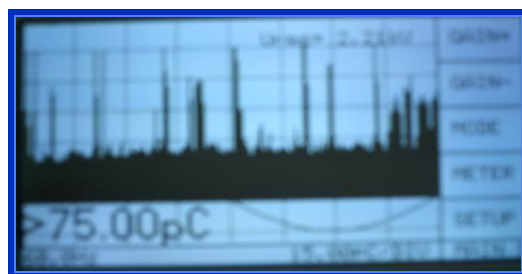


Fig.2 Nivel de interferencia sin la conexión del sistema de puesta a tierra (15 picocoulomb/div).

De esta manera, se puede observar como las perturbaciones están alterando las mediciones que amerita esta prueba, resultando esto un grave problema para la empresa ya que de persistir no se estaría

asegurando los valores mínimos de incertidumbres tolerables en la mediciones obtenidas durante el ensayo de nivel de Descargas Parciales.

2. INVESTIGACIÓN PREVIA

La investigación realizada previamente y que sustenta el diseño propuesto, esta basada en los antecedentes del laboratorio (Jaula de Faraday) al igual que de los equipos que en el se encuentran y el estudio detallado, dentro de las limitaciones, del sistema que compone la prueba de descarga parciales, en donde se incluye el ambiente, los equipos, el conexionado eléctrico y la puesta a tierra, entre otros.

2.1 ANTECEDENTES DE LA JAULA DE FARADAY Y LOS EQUIPOS UBICADOS EN ELLA

Al momento de presentarse el problema de interferencias electromagnéticas, lo primero que se detecto fue una falla en el equipo encargado de la medición de las descargas parciales por lo que se procedió a sustituirlo por uno más efectivo, de mayor precisión y de mejor tecnología.

Luego de revisar los equipos, descubrir las fallas en el equipo de medición y reemplazarlo, se noto que aunque efectivamente el equipo de vieja data incurría en errores graves, la alta precisión del nuevo equipo detectaba de manera más notable la filtración de perturbaciones electromagnéticas. En una practica de ensayo y error, se realizaron intentos para mejorar las condiciones de la prueba. Uno de ellos fue colocar una barra de tierra coperwell en las afueras de la Jaula que se observa en la figura 3, ya que el sistema de puesta a tierra con el que cuenta dicha Jaula cuando se encontraba conectado aumentaba aun mas las perturbaciones vistas por el equipo detector de manera tal que no se podía calibrar.

El colocar una nueva barra como puesta a tierra fue un intento fallido ya que, aunque disminuyo el ruido respecto a los niveles con la conexión de la puesta a tierra principal, aun seguían siendo bastante considerables las perturbaciones percibidas por el equipo detector.



Fig. 3 Barra de tierra coperwell externa.

2.2 DESARROLLO DE LA INVESTIGACION

La investigación planteada se basó en tres criterios fundamentales para el efectivo desarrollo de la prueba de descargas parciales que son, el nivel de inmunidad de la Jaula de Faraday, el conexionado eléctrico desde el punto de vista de compatibilidad electromagnética, y el sistema de puesta a tierra para verificar el

drenaje de todas las corrientes parasitas que llegan a la misma y la equipotencialidad del sistema de puesta a tierra.

2.2.1 ESTUDIO DEL NIVEL DE INMUNIDAD DE LA JAULA DE FARADAY

Como resultado del análisis de las características actuales de la Jaula de Faraday, se puede concluir que:

- ✗ La unión eléctrica del portón al blindaje de la Jaula, cuenta con un sistema de pletinas flexibles, que se encuentra totalmente deteriorado.
- ✗ Los cables que alimentan a los equipos no se encuentran blindados por lo tanto no están unidos eléctricamente a la Jaula de Faraday lo que disminuye la efectividad del blindaje.
- ✗ Los cables de tierra se encuentran en su totalidad tendidos sobre el piso lo cual no cumple los requerimientos ideales del diseño de la Jaula de Faraday.

2.2.2 ESTUDIO DEL SISTEMA DEL CONEXIONADO ELÉCTRICO

Esta sección, plantea una revisión general realizada a las conexiones eléctricas (cables de potencia, control, medición y puesta a tierra), su ubicación y verificación del cumplimiento de la normativa IEEE, Std 1100-1999, IEEE, Std 142-1991 Y del CÓDIGO ELÉCTRICO NACIONAL.

El estudio del conexionado eléctrico en el laboratorio de alta tensión se realizara a partir de su fuente principal, y los puntos a tratar en esta sección serán:

- ▶ Circuito de alimentación en el laboratorio de alta tensión.
- ▶ Circuito de medición.
- ▶ Fosa de radio frecuencia ubicada en el cubículo de control.
- ▶ Puesta a tierra de seguridad.

2.2.2.1 CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN EN EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN

Según la práctica recomendada de puesta a tierra de equipos electrónicos e instrumentos de PDVSA para un sistema de potencia, se debe velar por los criterios fundamentales, que son mantener baja resistencia y proveer suficiente capacidad de corriente para los niveles de falla. Cuyos aspectos principales son:

- ▶ La puesta a tierra solo debe manejar corriente durante una falla o cortocircuito a tierra accidental y no debe ser utilizada para alimentar cargas.
- ▶ El neutro debe estar conectado a tierra solo en el tablero de distribución o transformador de alimentación.
- ▶ Todos los equipos pertenecientes al sistema de potencia deben tener la masa conectada a la puesta a tierra.

Actualmente para el circuito de alimentación se tiene que:

- ✗ El sistema no esta provisto de una referencia de tensión conectada a tierra en la fuente principal.

- ✗ El sistema no cuenta con una puesta a tierra debidamente estructurada en donde se garantice el camino de retorno para las corrientes de falla a la fuente principal.
- ✗ Por tanto, no se están velando los criterios fundamentales para un sistema de potencia.

Por otro lado, para el caso del transformador de servicios generales se observo que:

- ✗ No tiene el chasis (masa) conectado a la puesta a tierra.
- ✗ Alimenta equipos como el detector de descargas parciales, el circuito serie resonante y el aire acondicionado sin conexión a tierra a pesar de ser necesario para los mismos.

2.2.2.2 CIRCUITO DE MEDICIÓN

El circuito de medición esta compuesto por los equipos que intervienen directamente en el proceso de medición de las descargas parciales, estos son:

- ▶ Derivador
- ▶ Filtro de emisiones electromagnéticas
- ▶ Capacitor de acoplamiento
- ▶ Copas terminales 1 y 2
- ▶ Capacitor calibrador
- ▶ Equipo detector de descargas parciales

Basados en el esquema circuital del manual y realizando una comparación con las conexiones del circuito de medición en el laboratorio. Se puede observar que:

- ✗ El circuito de medición cuenta con una referencia de tensión totalmente contaminada por la circulación de las corrientes que de manera arbitraria podrían estar entrando y saliendo de la tanquilla de distribución.
- ✗ La tanquilla de distribución funciona como un nodo para las corrientes que desembocan en ella ya que se encuentra desconectada del sistema de puesta a tierra del laboratorio.
- ✗ Evidentemente, el equipo detector de descargas parciales (equipo sensible), esta percibiendo no solo la descarga en el objeto de prueba (cable) sino también todas las corrientes que probablemente se interconecten a la referencia de tensión por medio de la tanquilla de distribución.

Además, se debe destacar:

- ✗ Los cables de conexión a tierra de los distintos equipos se encuentran tendidos sobre el piso sin ninguna canalización ni blindaje. De esta manera se incumple la recomendación dada por IEEE , Std 142-1991 (capitulo 2, sección 2.2.5)

2.2.2.3 FOSA DE RADIO FRECUENCIA UBICADA EN EL CUBÍCULO DE CONTROL

- ✗ Los cables que pertenecen a las conexiones de alimentación y control de los equipos ubicados dentro de la misma, al igual que la salida de conexiones de puesta a tierra del sistema, es decir, cables de distintos circuitos y con distintos fines, cercanos y entrelazados entre ellos, sin ningún tipo de pantalla que pueda evitar la creación de EMI acopladas, pudiendo ser esto una de las causas principales del

problema. Además, se incumple con las recomendaciones prácticas dadas por IEEE, (Std 1100-1999, sección 4.6.2.1.3; sección 4.8.2).

2.2.3 ESTUDIO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.

En el diseño actual de la Jaula de Faraday se noto:

- ✗ Un anillo constituido por conductor de cobre 4/0 que no favorece la conducción de las corrientes a tierra, debido a que el área del mismo facilita la exposición a campos cercanos dando origen a corrientes inducidas (corrientes parasitas), las cuales incorporan grandes perturbaciones al sistema.
- ✗ Una tanquilla de distribución a donde llegan todos los cables, tanto de energía, medición y puesta a tierra, al igual que el blindaje de la Jaula, exponiendo a los equipos sensibles, en este caso al detector de descargas parciales, a todas las corrientes parasitas que en ese punto desembocan.
- ✗ La tanquilla se encuentra desconectada intencionalmente de las barras de tierra, es decir, flotando, ya que de esta forma el equipo percibe menos perturbaciones con respecto a cuando existe conexión del sistema de puesta a tierra.

El hecho de que las barras de puesta tierra no estén conectadas a la tanquilla, genera un nodo entre las conexiones de puesta a tierra que llegan a dicha tanquilla, lo cual hace que todas aquellas corrientes parasitas provenientes de cada uno de los equipos que deberían drenarse en la tierra se redistribuyan hacia otros equipos creándose de esta manera un grave problema de perturbaciones por conducción.

3. RESULTADOS DE LA INVESTIGACION

Luego de realizar el estudio de la prueba, conocer el proceso de detección de descargas parciales y el funcionamiento, analizar de manera cualitativa la inmunidad de la Jaula de Faraday, y estudiar las conexiones eléctricas y la puesta a tierra del sistema, se dedujo que el continuo incumplimiento de las normas eléctricas (CEN y IEEE) a nivel de la ubicación de las conexiones eléctricas y el diseño de puesta a tierra, es en definitiva lo que está de manera notable contribuyendo con las perturbaciones detectadas por el equipo detector de descargas parciales.

4. PROPUESTA

En esta sección se planteará una propuesta de diseño para mejorar las conexiones eléctricas y el sistema de puesta a tierra del laboratorio de alta tensión (Jaula de Faraday).

4.1 DISEÑO DEL CONEXIONADO ELÉCTRICO

Para una mayor especificación, este objetivo constará de cuatro secciones:

4.1.1 CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN

Siendo el transformador de aislamiento la fuente principal de alimentación del laboratorio, se propone:

- ☒ Conectar el transformador, según lo recomendado por el estándar IEEE (Std 1100-1999, sección 4.2.2.4).

- ☒ Blindar los cables de salida del transformador en ductos adecuados para reducir las perturbaciones y a su vez mejorar la estética de las instalaciones.
- ☒ Colocar un tablero para distribuir las salidas del transformador de aislamiento.

Además, se plantea para el transformador de servicios generales:

- ☒ Alimentarlo desde la fuente principal con la fase, referencia y la conexión de tierra, esta última conectada al chasis (masa) del equipo. La tierra se distribuirá junto con la alimentación que el provee hacia los equipos conectados a las tomas de corriente.

Finalmente, para la alimentación del ensayo se propone:

- ☒ Canalizar las salidas del tablero (fase, referencia y tierra) hacia el interruptor principal y conectar el chasis del equipo serie resonante y el chasis del dicho interruptor principal a la tierra.
- ☒ Canalizar desde el interruptor principal la salida de fase, referencia y tierra hacia el transformador elevador para la alimentación del ensayo.
- ☒ Conectar el filtro de interferencias electromagnéticas a la tierra que llega al autotransformador elevador de tensión.

4.1.2 CIRCUITO DE MEDICIÓN

El nuevo diseño para la conexión de los equipos de medición plantea:

- ☒ Distribuir dicha referencia lo más cercano posible a los equipos de medición para tener una conexión más confiable y menos expuesta a interferencias electromagnéticas, preferiblemente embutida en ductos o canaletas metálicas.
- ☒ Utilizar un conductor único que permita la conexión de los equipos de medición a la referencia antes mencionada.

4.1.3 CONEXIONES DE LA FOSA DE RADIOFRECUENCIA

Para el cableado eléctrico ubicado dentro de la fosa de radiofrecuencia, se propone:

- ☒ Separar los cables de distinta naturaleza por medio de canaletas independientes que estén en concordancia con las especificaciones de compatibilidad electromagnéticas necesarias.
- ☒ Sellar la fosa de radiofrecuencia de manera que se evite la introducción de perturbaciones electromagnéticas externas.
- ☒ Trenzar los cables de alimentación de manera que se evite la creación de acoplamientos inductivos.

4.1.4 CABLES DE CONEXIÓN A TIERRA DE SEGURIDAD

Es de vital importancia que la estructura metálica que conforma la Jaula de Faraday, se encuentre conectada a un punto de tierra para así drenar todas las corrientes parasitas que en ella se inducen, y cumplir con su función principal de servir como pantalla protectora del ensayo de descargas parciales aislando las perturbaciones electromagnéticas externas.

En este caso se propone:

- ☒ Conectar la Jaula de Faraday al igual que todas las estructuras metálicas a implementar tales como chasis, *conduits*, canaletas, bandejas porta cables, etc., que pueden acarrear descargas accidentales por tensión de contacto, a una puesta a tierra independiente que sea solo para seguridad.

4.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Para el diseño del sistema de puesta a tierra se realizó la medición de la resistividad del suelo, utilizando el método de *Wenner*, el cual arrojó un valor promedio de **35.73 Ohm-metro**, sin embargo como este valor no difiere en gran medida del valor máximo que es **56.7 Ohm-metro** se tomara este último para efecto de condiciones críticas de diseño.

De acuerdo con este valor de resistividad del suelo y siguiendo los pasos recomendados por el LEC (Lightning Eliminators & Consultants) la resistencia para un conjunto de dos barras Chem-Rod® en el diseño propuesto será de : 3.2 ohm.

Entonces, por poseer un terreno con baja resistividad y necesitar solo dos electrodos Chem-Rod® para cumplir con dichos requerimientos, se propone:

- ☒ Utilizar los electrodos Chem-Rod® ya existentes en el diseño actual de la puesta a tierra.
- ☒ Realizar una conexión entre las dos barras por medio de un conductor para establecer equipotencialidad y evitar inducción de diferencias de tensión que originen corrientes parásitas entre ellas.
- ☒ Colocar una barra MGB (Master Ground Bus) que sirva de conexión entre el sistema de puesta a tierra y las conexiones a tierra respectivas.

5. RECOMENDACIONES PARA LA EJECUCIÓN DEL DISEÑO

- ~ Evitar la colocación de cables de distinta naturaleza (potencia, control, etc.) cercanos.
- ~ Separar lo más posible los cables de potencia (señal perturbadora) respecto a los cables de datos (señal sensible).
- ~ Evitar espiras de cables y si no es posible reducirlos en tamaño.
- ~ Verificar que el conductor de fase este lo más cerca posible del conductor de neutro (retorno).
- ~ Usar en la medida de lo posible cables blindados.
- ~ Cambiar las sales conductoras que se encuentran depositadas en las barras Chem-Rod® por un nuevo kit de sales minerales.
- ~ Utilizar una barra MGB ya que facilita la conexión de las puestas a tierra de potencia y las estructuras que lo ameriten al sistema de puesta a tierra.
- ~ Utilizar conectores tipo doble ojo para conectar los distintos circuitos a la barra MGB.

6. CONCLUSIONES

Mediante la investigación previa de los factores que posiblemente contribuyen con el problema, se estableció el criterio general de que las mayores perturbaciones provocadas en el sistema, están relacionadas con el incumplimiento continuo de la normativa que constituyen los más exigentes estándares eléctricos.

Al realizar el estudio de la utilidad de la Jaula de Faraday se noto que la misma cumple en gran parte con las características ideales, en cuanto al material del blindaje, unión eléctrica y recubrimiento del blindaje

Para el circuito de alimentación se noto que no contaba con una puesta a tierra de potencia que pudiese realizar el retorno de cualquier corriente de falla a la fuente de manera efectiva además de que el sistema no tenía el neutro conectado a tierra en la fuente principal de alimentación.

En la fosa de radiofrecuencia se observaron cables de distintas naturaleza ubicados de tal forma que facilitan la creación de acoplamientos por campos cercanos e incumpliendo algunas de las practicas recomendadas por IEEE, Std 1100-1999 en relación a conexiones de equipos electrónicos.

Al analizar el sistema de puesta a tierra, se aprecio que el diseño actual no cuenta con las condiciones necesarias para el ambiente en el cual se encuentra, ya que posee un anillo de cuatro vueltas de un conductor de gran diámetro (# 4/0) en el centro de las instalaciones que se presume sea una de las causas mas importantes del problema, ya que además de poder estar induciendo corrientes de manera radial, también se demostró por pruebas hechas en el laboratorio que posee grandes corrientes parasitas inducidas en el mismo y por esto se encuentra actualmente desconectado de la tanquilla de distribución.

7. REFERENCIAS

- RAMÍREZ VÁZQUEZ, José (1992) Enciclopedia CEAC de electricidad, (Mediciones eléctricas), Barcelona (España), EDICIONES CEAC S.A., 4ta Edición.
- Luís FERRER, Departamento de Electrónica de la UPC, En su artículo: Introducción a la compatibilidad electromagnética, Barcelona, España.
- Catalogo didáctico de HIMEL (Compatibilidad Electromagnética).
- SCHNEIDER ELECTRIC. Manual Didáctico 2000, COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA <<CEM>>. Schneider Electric España, S.A.
- BALSECA, Celiano. (1988) Trabajo especial de grado “DISEÑO DE LA JAULA DE FARADAY PUESTA A TIERRA DEL LABORATORIO DE ALTA TENSION DE LA ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL (ESPOL)”, Guayaquil – Ecuador.
- CARPENTER, Roy B.; LANZONI, Jr. Joseph (1997). *Designing for a low resistance earth interface (Grounding)* Lightning Eliminators and Consultants, Inc. Boulder. Colorado (USA).
- IEEE Std 142-1991, IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Comercial Power Systems.
- IEEE Std 1100-1999, IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment.
- IEEE Std 80 – 2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.

Links:

- <http://www.lightningeliminators.com>

- <http://www.circuitor.es>
- <http://www.pardell.es>
- <http://aupec.univalle.edu.co>
- <http://energiaycomputacion.univalle.edu.co>
- <http://www.cib.espol.edu.ec>
- <http://www.energytech.com.ve>
- <http://lecglobal.com/>

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICADO DE APROBACIÓN	ii
CARTA DE ARBITRAJE	iii
CARTA DE APROBACIÓN DE LA EMPRESA ARALVEN S.A.	iv
DEDICATORIAS	v
RECONOCIMIENTOS	vii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO	
I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
Planteamiento del problema	5
Justificación	8
Objetivos	9
Objetivo General	9
Objetivos Específicos	9
Alcance	10
II MARCO TEÓRICO	12
Antecedentes	13
Perturbación electromagnética (EMI)	17
Elementos necesarios para que se presente un problema de EMI	17
Tipos de EMI	18
Transitorios	18
Características de los transitorios	19
Armónicos	20
Descargas Electrostáticas	22
Características de las descargas electrostáticas	22
Fuentes principales de EMI	24
Fuentes Intencionadas	24
Fuentes No Intencionadas	24
Mecanismos de propagación de EMI	27
Interferencias conducidas	28
Modo común	29
Modo diferencial	29
Interferencias por acoplamiento capacitivo	30
Interferencias por acoplamiento inductivo	32

Acoplamiento por radiación electromagnética	34
Desacoplamiento de las perturbaciones	35
Elementos supresores de perturbaciones	37
Filtros	37
Ferritas	40
Campo electromagnético	41
Compatibilidad electromagnética (CEM)	43
Nivel de inmunidad de un dispositivo	44
Emisiones electromagnéticas	44
Blindaje electromagnético	45
Importancia del blindaje electromagnético	46
Jaula de Faraday	46
Características ideales del diseño de una Jaula de Faraday	49
Consideraciones aplicables al laboratorio de alta tensión	51
Cables de potencia	53
Aislamiento en cables de potencia	54
Pruebas del aislamiento	55
Descargas parciales (DP's)	55
Secuencia de las descargas parciales	57
Equipo montado para la detección eléctrica de DP's	58
Evaluación de las DP's	61
Sistemas de puesta a tierra	63
Puesta a tierra del sistema de potencia	63
Puesta a tierra de equipos electrónicos	64
Interconexión de sistemas de puesta a tierra	65
Propósitos de la puesta a tierra	66
Sistemas de referencia de voltaje	67
Sistema de referencia flotante	67
Sistema de referencia puesto a tierra	68
Puesta a tierra de seguridad	69
Métodos de puesta a tierra	70
Puesta a tierra en un solo punto	70
Puesta a tierra en múltiples puntos	71
Resistividad y tipos de terreno	72
Medición de la resistividad del suelo	74
Método de Wenner	77
Método de schlumberger	79
Electrodos de puesta a tierra	80
Definición de términos	82
 III MARCO METODOLÓGICO	 85
Marco metodológico	86

	Tipo de investigación	86
	Obtención de la información	86
	Procedimiento para la elaboración del trabajo de grado	87
IV	RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	90
	Descripción del ensayo de DP`s de la empresa ARALVEN S.A.	91
	Antecedentes del laboratorio de alta tensión	101
	Desarrollo de la investigación	105
	Estudio del nivel de inmunidad de la Jaula de Faraday	106
	Diseño actual de la Jaula de Faraday	106
	Utilidad de la Jaula de Faraday	107
	Conclusiones sobre la Jaula de Faraday	108
	Estudio del conexionado eléctrico	110
	Circuito de alimentación	112
	Circuito de medición	116
	Fosa de Radiofrecuencia	121
	Estudio del sistema de puesta a tierra	122
	Descripción del actual sistema de puesta a tierra	123
	Medición de la resistencia de puesta a tierra	125
	Resultados de la medición de resistencia de puesta a tierra	127
	Interpretación de los resultados	128
V	DESARROLLO	129
	Diseño del conexionado eléctrico	130
	Circuito de alimentación	130
	Circuito de medición	133
	Conexiones de la fosa de radiofrecuencia	135
	Cables de conexión a tierra de seguridad	136
	Diseño del sistema de puesta a tierra	136
	Medición de la resistividad del suelo	137
	Pasos para diseñar conexión a tierra con electrodos Chem-Rod®	140
	Configuración de la propuesta para el sistema de puesta a tierra	145
	Recomendaciones para la ejecución del diseño propuesto	146
VI	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	147
	Conclusiones	148
	Recomendaciones	150

REFERENCIAS	151
ANEXOS	153
A. Información electrodos CHEM-ROD	154
B. Imágenes de la medición de la resistividad del suelo en la empresa	188
C. Especificaciones técnicas del TL-5 <i>circutor (Teluometro)</i>	192

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro N° 1. Fuentes principales de EMI no intencionadas	25
Cuadro N° 2. Tipos de transformadores de Aislamiento	37
Cuadro N° 3. Ecuaciones de Maxwell en forma diferencial	43
Cuadro N° 4. Funcionamiento ideal versus actual de la Jaula de Faraday	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.	Valores típicos de resistividad de algunos terrenos	73
Tabla II.	Cuadro comparativo de sistemas de tierra físicos	81
Tabla III.	Valores de resistencia de las barras del sistema de puesta a tierra	127
Tabla IV.	Valores de resistividad del terreno en función de la distancia (A)	139
Tabla V.	Factor de multiplicación para múltiples barras	144

INDICE DE FIGURAS

FIGURAS	PAG.
1 (a) Nivel de interferencia con la conexión del sistema de puesta a tierra	7
(b) Nivel de interferencia sin la conexión del sistema de puesta a tierra	7
2 Elementos presentes en un problema de interferencia electromagnética	17
3 Representación temporal del transitorio con impulsos	19
4 Representación temporal del transitorio con ráfagas de impulso	20
5 Representación espectral del transitorio	20
6 Forma de onda de la corriente consumida por un tubo fluorescente	21
7 Representación temporal de los armónicos	21
8 Representación espectral de los armónicos	22
9 Representación temporal de una descarga electrostática	23
10 Representación espectral de una descarga electrostática	23
11 Ilustración de las perturbaciones emitidas por Walkie-talkie	24
12 Tipos de propagación de las interferencias electromagnéticas	28
13 Interferencias conducidas	28
14 Interferencias en modo común	29
15 Acoplamiento de modo diferencial	30
16 Ejemplo de acoplamiento capacitivo	31
17 Elementos para que se produzca un acoplamiento capacitivo	32
18 Ejemplo de diafonía inductiva	33
19 Acoplamiento por radiación	34
20 Efecto antena de un conductor	35
21 Acoplamiento de perturbaciones por medio de capacitancia parasita	36
22 Filtrado de una señal no deseada	38
23 Esquema de un filtro pasivo LC	39
24 Filtro pasivo en modo diferencial	39

25	Filtro pasivo en modo común	40
26	Disposición de una ferrita en modo común	40
27	Esquema de la compatibilidad electromagnética	44
28	Construcción de un cable de potencia	53
29	Clasificación de las descargas parciales	56
30	Circuito equivalente de un cable con DP's	57
31	Secuencia de las descargas parciales	57
32	Circuito resonante paralelo	58
33	Elementos del circuito de medición	60
34	Jaula de Faraday	60
35	Equivalencia de la onda de voltaje de prueba y la elipse del osciloscopio	61
36	Ejemplos de oscilogramas	62
37	Ejemplo de un diagrama X – Y	62
38	Puesta a tierra de Potencia	64
39	Ejemplo de lazo de tierra causado con la puesta a tierra de equipos electrónicos	65
40	Daños en equipos electrónicos con sistemas de puesta a tierra separados	66
41	Riesgo a las personas cuando NO se utiliza la puesta a tierra de seguridad	66
42	Sistema de referencia flotante	68
43	Sistema de referencia puesto a tierra	68
44	Sistema de referencia puesto a tierra en un solo punto	70
45	Puesta a tierra aislada y de seguridad en un mismo equipo	71
46	Puesta a tierra en múltiples puntos	72
47	Megger de Cuatro Terminales. Cortesía AVO Internacional	75
48	Disposición de los electrodos en configuración de Wenner	77
49	Disposición de los electrodos en configuración de Schlumberger	79
50	Barra Chem-Rod® colocada en el suelo	81
51	Detector de descargas parciales	92
52	Filtro de emisiones electromagnéticas	92
53	Capacitor de acoplamiento de impedancia	93

54	Impedancia de Medición	93
55	Copas terminales 1 y 2 unidas por el objeto de prueba	94
56	Capacitor Calibrador	94
57	Esquema físico de conexión del equipo detector de descargas parciales	95
58	Transformador de aislamiento junto a sus datos de placa	96
59	Transformador elevador de tensión	96
60	Derivador	97
61	Filtro de alto voltaje	97
62	Interruptor Principal (MAIN POWER)	98
63	Equipo serie resonante	98
64	Esquema del circuito serie resonante	99
65	Conexión de los equipos de la prueba de descargas parciales	100
66	Ambiente hostil cercano al laboratorio de alta tensión	102
67	Laboratorio de alta tensión de la empresa ARALVEN S.A	102
68	Equipo detector de descargas parciales de mayor data	103
69	Barra de tierra coperwell externa	104
70	(a) Nivel de interferencia con la puesta a tierra de la Jaula	104
	(b) Nivel de interferencia con la puesta a tierra externa	104
71	Sistema de unión por pletinas del portón	109
72	Cables de tierra tendidos en el piso	110
73	Diagrama unifilar del sistema de potencia de la Jaula de Faraday	112
74	Esquema del circuito de alimentación y sus conexiones de puesta a tierra	113
75	Esquema de alimentación con puesta a tierra de potencia	114
76	Esquema representativo del circuito de alimentación actual	114
77	Salidas de tensión por el lado de baja del transformador de servicios generales	115
78	Cables de conexiones eléctricas	116
79	Conexiones del circuito de medición actual	117
80	Esquema circuital de conexión de los equipos de medición	117
81	Situación actual del circuito de medición	118

82	Cables de conexión a tierra de varios equipos que intervienen en la prueba	119
83	Fosa de radiofrecuencia ubicada dentro de la consola de control	120
84	Entrada y salida de cables a la fosa de radiofrecuencia	121
85	Diseño del sistema de puesta a tierra actual del laboratorio	122
86	Barra CHEM – ROD® del sistema de puesta a tierra de la Jaula de Faraday	123
87	Barra de CHEM – ROD® una vez instalada	123
88	Tanquilla de distribución del sistema de puesta a tierra de la Jaula de Faraday	124
89	Disposición de los electrodos para medir la resistencia de puesta a tierra	125
90	Esquema físico ubicación barras Chem – Rod® y electrodos de medición	126
91	Propuesta para el circuito de alimentación	127
92	Conexión del transformador de aislamiento con blindaje electrostático típico	131
93	Conexión de equipos de medición con sistema de referencia	132
94	Esquema circuital del auto transformador elevador de tensión	133
95	Configuración Wenner para la medición de resistividad	134
96	Diseño del sistema de puesta a tierra	135
97	Configuración <i>Wenner</i> para la medición de resistividad.	138
98	Diseño del sistema de puesta a tierra.	145

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. <i>Distribución espectral de las perturbaciones electromagnéticas</i>	26
Gráfico 2. <i>Niveles de perturbación permitidos</i>	45
Gráfico 3. <i>Resistividad del suelo vs. Distancia</i>	139

INTRODUCCIÓN

La empresa ARALVEN S.A., fabricantes de cables de cobre y aluminio para transmisión y distribución de energía eléctrica, cuenta con instalaciones experimentales en donde se efectúan ensayos que garantizan la calidad de sus productos. Una de estas instalaciones es un laboratorio de alta tensión, suministrado con equipos de distinta naturaleza (potencia, control, medición), que interaccionan mediante los circuitos que los conectan y se utilizan para realizar el ensayo de medición de nivel de descargas parciales a cables de media tensión, que a su vez exige desarrollarse en un ambiente libre de perturbaciones.

Actualmente, cuando se realiza el ensayo, se dificulta la obtención de la data proporcionada por el equipo de medición de nivel de descargas, debido a altas interferencias percibidas por el mismo, ocasionando que los resultados sean poco fiables.

Ante este inconveniente, la empresa se vio en la necesidad de desarrollar un estudio de las instalaciones en donde se realiza el ensayo, que abarque el análisis de la utilidad de la estructura del laboratorio de alta tensión (Jaula de Faraday), el sistema del conexionado eléctrico y el sistema de puesta a tierra y finalmente plantear una propuesta para disminuir las perturbaciones existentes.

Este estudio constituye el presente trabajo de grado y se desglosa en seis capítulos caracterizados de la siguiente manera:

Capítulo I

Se muestra el planteamiento del problema, el objetivo general y específicos, justificación además de los alcances y limitaciones del proyecto de grado.

Capítulo II

Se dedica a los antecedentes y las bases teóricas necesarias para el desarrollo del trabajo. Definición de interferencias electromagnéticas, las fuentes que las producen y los mecanismos de propagación. Introducción acerca de los campos electromagnéticos y la compatibilidad electromagnética, de igual manera se hace mención a la función real de una Jaula de Faraday, y sus características ideales de diseño. Consideraciones para el laboratorio de alta tensión y se ahonda en el tema de los cables de potencia y las pruebas de aislamiento a las que se someten los mismos, con una descripción de interés en la prueba de descargas parciales. Finalmente, planteamiento del sistema de puesta a tierra, los tipos e interconexión entre ellos además de sus propósitos. Definición del sistema de referencia y la puesta a tierra de seguridad, para luego concluir este capítulo con los distintos métodos de puesta a tierra, los electrodos necesarios para la misma y algunas definiciones de términos importante para la mayor comprensión del proyecto.

Capítulo III

Trata sobre el marco metodológico, se explica el cómo se realizó la investigación. Adicionalmente, se indica el tipo de investigación, el cómo se adquirió la información y se da a conocer el procedimiento.

Capítulo IV

Comprende una descripción mas específica del ensayo de descargas parciales que se efectúa en la empresa ARALVEN S.A., se dan a conocer los antecedentes del laboratorio de alta tensión, las modificaciones y cambios efectuados para solucionar la problemática que no han arrojado los resultados esperados. Luego se realizó una investigación previa de los factores que posiblemente están colaborando con el problema para dar soporte a la propuesta planteada en este proyecto.

Capítulo V

En este capítulo se presenta la propuesta de solución al problema, constituida por mejoras a las conexiones eléctricas y al sistema de puesta a tierra del laboratorio de alta tensión de la empresa ARALVEN S.A. y que permitirá la disminución de la gravedad del problema que afecta las mediciones del equipo de detector de descargas parciales.

Capítulo VI

Está comprendido por las conclusiones a las que se llegó en el desarrollo del proyecto y las distintas recomendaciones para mantener las condiciones óptimas del sistema en general.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El avance tecnológico trae consigo un aumento en los dispositivos de electrónica de potencia que conforman a los circuitos de un sistema determinado. Esto origina que dichos circuitos interaccionen cada vez más en tal sistema, ocasionando mayores acoplamientos electromagnéticos entre ellos y generando perturbaciones electromagnéticas.

Las perturbaciones electromagnéticas son fenómenos electromagnéticos que pueden afectar el funcionamiento de un equipo o sistema. Estas perturbaciones aparentemente no poseen información relevante y pueden superponerse o combinarse con otras señales, alterando su valor. En la actualidad, existen muchos equipos electrónicos de medición que pueden ser afectados por cualquier perturbación electromagnética y, más aún, cuando estos equipos son sensitivos, esto trae como consecuencia que las mediciones realizadas por los mismos reflejen información no deseable producto de las perturbaciones. En el caso de las empresas que requieran de mediciones precisas este problema les perjudica en forma directa, ya que los equipos que se ven afectados por dichas perturbaciones disminuirán la exactitud de sus medidas.

ARALVEN S.A., es una empresa que se encarga de fabricar cables de cobre y aluminio para transmisión y/o distribución de energía eléctrica, suministrados bajo los más exigentes estándares de calidad y es por esto que requieren de mediciones exactas al momento de realizar pruebas que garanticen la calidad de sus productos, como lo es el Ensayo de Descargas Parciales. El Ensayo de Descargas Parciales, es no destructivo y tiene como objetivo fundamental, comprobar si el aislamiento del cable de potencia posee una expectativa de vida optima para su desempeño. Ésta se realiza con un equipo para la aplicación de tensión, conformado por una consola de control, un transformador de aislamiento, un transformador de alto voltaje y un filtro

para alto voltaje, además un equipo para la medición, que incluye un condensador de calibración, un detector de descargas parciales y un condensador de acoplamiento conocido como “capta ruido”. Todos estos equipos mencionados anteriormente e involucrados en el ensayo se encuentran apantallados dentro de una Jaula de Faraday, ya que esta prueba amerita ser desarrollada en un medio aislado de cualquier perturbación electromagnética.

La prueba consiste en la aplicación de alto voltaje al cable de potencia, específicamente entre el conductor y la pantalla del cable, de manera que, de existir defectos por cavidades en el aislamiento, se pueda medir en el equipo detector la carga eléctrica producida por las descargas en dichas cavidades diminutas. Es posible medir esta carga eléctrica causada por la descarga de la cavidad, debido a que generan impulsos de voltaje repetitivos de alta frecuencia que son descubiertos por el equipo detector de descargas parciales y mostradas en un diagrama X-Y (picocoulomb versus kilovoltios de prueba). Cabe destacar que dichos impulsos se muestra de manera distinta dependiendo de la forma o tipo de cavidad que presente el cable y que la norma tiene límites de cargas eléctricas permitidos que dependerán del estándar internacional por el cual estén regidos al momento de realizar la prueba. De esta manera, se descartan las descargas parciales por efectos corona en el cable y, a su vez, algún signo de falla.

Desde hace diez años, el ambiente en donde se realiza esta prueba presenta un problema de filtración de perturbaciones electromagnéticas que se ha incrementado de manera gradual a través del tiempo, de acuerdo a información proporcionada por el personal a cargo de la empresa. Las perturbaciones electromagnéticas, se observan en el equipo de medición llamado, “detector de nivel de descargas parciales”. Anteriormente, se utilizaba un equipo más antiguo, el cual fue sustituido por uno de tecnología reciente, marca PHENIX, modelo No PD Measurement Equipment, que se encuentra en funcionamiento aproximadamente desde hace dos años y medio. Cabe destacar que, desde antes que se realizara este cambio, ya el problema de ruido estaba presente, sin embargo, por ser el equipo nuevo de mayor sensibilidad, se pudo notar la perturbación con mayor intensidad.

Este fenómeno se presenta desde el momento en que se energiza el equipo de medición. Sin embargo, cuando el sistema de puesta a tierra de la Jaula de Faraday está conectado, las perturbaciones son tan elevadas que se hace imposible calibrar el equipo y, por tanto, tomar alguna medida, como se muestra en la figura 1 (a). Dada esta situación, la empresa tomó la decisión de realizar dicho ensayo sin esta conexión, ya que, aunque no se eliminan las perturbaciones por completo, al menos disminuyen lo suficiente como para realizar el ensayo; sin embargo, las condiciones no cumplen con los requerimientos mínimos de la normativa, como por ejemplo la norma AEIC CS5-94 que indica que para un voltaje aplicado de 7.9KV por cada mm de espesor del aislamiento del cable por un tiempo de 10 a 180 segundos, el máximo valor de descarga parcial tolerable es de 5 picocoulomb. Este efecto de disminución se puede observar en la figura 1 (b).

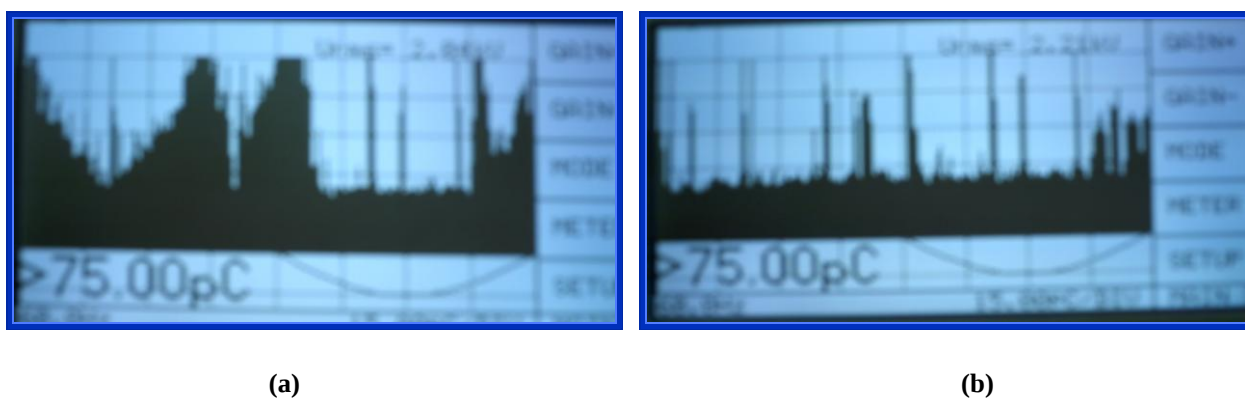


Fig.1 (a) Nivel de interferencia con la conexión del sistema de puesta a tierra (GANANCIA = 15 picocoulomb/divisiones). **(b)** Nivel de interferencia sin la conexión del sistema de puesta a tierra (GANANCIA = 15 picocoulomb/divisiones).

De esta manera se puede observar como las perturbaciones están alterando las mediciones que amerita esta prueba, resultando esto un grave problema para la empresa, ya que, de persistir, no se estaría asegurando los valores mínimos de incertidumbres tolerables en las mediciones obtenidas durante el ensayo de nivel de Descargas Parciales.

En vista de la problemática expuesta anteriormente surge la necesidad de realizar una investigación técnica y de diseño de los factores que se presumen están contribuyendo con el problema, haciendo uso de los estándares IEEE 142-1991 IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Comercial Power Systems, IEEE 1100-1999 IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment, entre otros, de manera que sustente la propuesta para la disminución de las interferencias electromagnéticas presentes en el equipo detector de descargas parciales ubicado en la empresa "ARALVEN S.A.", que en este trabajo se desarrollará.

JUSTIFICACIÓN

La problemática presente en el ensayo de descargas parciales dificulta el proceso de producción de cables de potencia, alterando el cronograma de elaboración por ser una prueba que se realiza al cable en su fase intermedia de construcción llegando a posponer la entrega del producto terminado.

Igualmente, las pérdidas económicas se ven reflejadas en las continuas inversiones para la reforma de la Jaula de Faraday y adquisición de nuevos equipos, como intentos para darle fin a la problemática existente, proporcionando resultados pocos satisfactorios, por ser medidas tomadas sin estudios previos.

Conjuntamente, al ser auditada, la empresa se ha visto en la obligación de realizar pruebas de descargas parciales en otras empresas a fin de satisfacer las normas de calidad y de evitar sanciones por parte de las respectivas comisiones.

Al disminuir las interferencias de forma considerable las mediciones serán realizadas con mayor rapidez, ya que se le permitirá al operador a cargo del ensayo, visualizar en el equipo detector de descargas parciales, de manera directa y sin aproximaciones, los niveles de descargas

presentes en el cable al que se le somete la prueba, dando como resultado una toma de datos precisa y completamente objetiva.

De esta manera, la empresa podrá cumplir con las exigencias de las normas de calidad para la producción de cables de potencia, ICEA 593-639 (americana), la norma AEIC CS5-94 (europea) y la norma ICE 66-524, bajo las cuales están regidos. Además, se reducirán las pérdidas de materia prima y productos terminados, ocasionados por errores humanos que se presentan por el técnico a cargo de realizar el ensayo, al descartar productos en buen estado, basándose en mediciones incorrectas.

OBJETIVOS

Objetivo General

Desarrollar una propuesta para disminuir las interferencias electromagnéticas presentes en el equipo de medición denominado detector de descargas parciales ubicado en la empresa “ARALVEN S.A.”.

Objetivos Específicos

1. Establecer un diagnostico de la inmunidad electromagnética de la estructura que conforma el Laboratorio de Alta Tensión (Jaula de Faraday) de la empresa ARALVEN S.A., desde el punto de vista cualitativo, con el objeto de realizar las distintas recomendaciones para la optimización de la misma.

2. Identificar las distintas condiciones que incumplen las normas relacionadas con el conexionado de los cables de potencia, control, medición y puesta a tierra de los equipos que se encuentran dentro del Laboratorio de Alta Tensión.

3. Analizar el diseño actual del sistema de puesta a tierra del Laboratorio de Alta Tensión, realizando mediciones de la resistencia de los electrodos de puesta a tierra y comprobando si existe o no contribución de la misma con el problema.

4. Elaborar una propuesta basada en la investigación previa, que cumpla con las exigencias de las normas establecidas por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) y el Código Eléctrico Nacional (CEN).

ALCANCE

La investigación se desarrolló en las instalaciones de la Empresa ARALVEN S.A. y en la Escuela de Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. Esta investigación tuvo inicialmente una etapa de análisis de la situación actual y posibles factores que se presentan en el ensayo de descargas parciales, que se realizará a través de la revisión de la estructura del laboratorio de alta tensión (Jaula de Faraday), del conexionado eléctrico y el sistema de puesta a tierra, además de un análisis del proceso que se efectúa en dicho laboratorio.

Una de las principales limitantes presentes en la investigación es la insuficiencia de equipos para la medición de campos electromagnéticos radiados, que complementen la recolección de data para el estudio del nivel de inmunidad de la Jaula de Faraday, lo que va originar que dicho estudio tenga un enfoque cualitativo.

La propuesta para la disminución de las interferencias en el ensayo de descargas parciales, estuvo basada en una serie de mejoras del conexionado eléctrico y al sistema de puesta a tierra que se harán a partir de la verificación del cumplimiento de la normativa para este tipo de pruebas.

Los datos necesarios para la elaboración de dichas verificaciones, fueron recopilados de los diferentes estándares internacionales y comparados con la data recolectada dentro de la empresa.

La velocidad y tiempo con que se ejecutaron estas actividades dependió de la colaboración y acceso a las instalaciones, que dicha empresa pueda brindar a los investigadores.

En el desarrollo de la serie de mejoras para el sistema de puesta a tierra, no se tomara en cuenta el estudio de la protección para descargas atmosféricas ya que las instalaciones del laboratorio de alta tensión (Jaula de Faraday) no se encuentran expuestas a este tipo de fenómeno.

Debido a la urgencia de la empresa por solucionar el problema que se presenta en sus instalaciones, se estableció en acuerdo con la misma, como requerimientos para la investigación, realizar un diseño en el cual se pudiese ver claramente el problema y basado en la normativa y las practicas recomendadas, ya que ellos a través de su equipo de técnicos e ingenieros realizarían un estudio técnico-económico para la selección de los materiales y de esta manera reducir los costos de inversión.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

ANTECEDENTES

Para el cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado se recurrió a investigaciones precedentes relacionadas con el tema fundamental del mismo las cuales se citan a continuación:

El trabajo especial de grado de BALSECA, Celiano. (1988) que lleva por nombre “DISEÑO DE LA JAULA DE FARADAY PUESTA A TIERRA DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL (ESPOL)”, desarrollada en Guayaquil – Ecuador, en el cual especificó todos los detalles técnicos para la

construcción del blindaje y la puesta a tierra de un laboratorio de alta tensión. El diseño del edificio del laboratorio se fundamentó en investigaciones de las condiciones ideales en las que deben trabajar los equipos y componentes que allí se encontrarán, además de diferentes mediciones para garantizar el buen funcionamiento del sistema de puesta a tierra que se implementó. Este trabajo aporta a los investigadores fundamentos para la evaluación de la Jaula de Faraday, así como conocimientos acerca del sistema de puesta a tierra que le corresponde a la misma.

Por otro lado BLANCO, Andrés (2001) en el artículo publicado en la Revista “Ciencia al Día”, de la Universidad de el Valle, titulado “EN UNIVALLE SE PRUEBAN CABLES DE ALTA TENSIÓN”, resalta la importancia de los cables de alta tensión para el desarrollo de la industria de cualquier país del mundo, los cuales, cuando van subterráneamente, tienen un aislamiento para protegerlos de piedra, arena u otros elementos, que debe ser de alta calidad para garantizar un servicio óptimo e impecable para quien lo utilice. Afirma que debido a esto se implementó una prueba para medir la calidad del aislamiento del producto, indispensable para su buen funcionamiento bajo tierra, llamada “descargas parciales”, dando una breve explicación de la misma y de su gran importancia. Por medio de este artículo, los investigadores conocieron algunos sitios en donde ya se está implementando la prueba de descargas parciales, sus fundamentos y la importancia de la misma.

En el caso del trabajo especial de grado de NATERA, Marcos. RODRIGUEZ, J. (2002) titulado “DISEÑO DE TUTORIAL MULTIMEDIA DE ANÁLISIS DE RUIDO ELÉCTRICO E INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS”, para optar al título de Ingeniero Electricista de la Universidad de Carabobo, se desarrolló un sistema multimedia que implica la utilización de imágenes en movimiento, sonidos y video facilitando la interfaz usuario-máquina, con el objetivo de que se facilite la comprensión de la parte electromagnética del ruido eléctrico y las interferencias electromagnéticas. Este desarrollo aporta a los investigadores conocimientos básicos sobre la Teoría de Campos Electromagnéticos, lo cual amplía sus conocimientos asociados a este tema.

Asimismo GÓMEZ, Maria (2005), en la ponencia llamada “DETECCIÓN DE EFECTO CORONA EN AISLAMIENTOS DE MEDIA Y ALTA TENSIÓN”, que dictó en conjunto con un grupo de Ingenieros en el 1er Congreso Uruguayo de Mantenimiento, Gestión de Activos y Confiabilidad, (URUMAN 2005), en Montevideo, Uruguay, describe uno de los modos de falla más comunes del aislamiento de media y alta tensión, que comienza con la presencia de dicho efecto corona. Indica que este modo de falla se ha incrementado en los nuevos aislamientos y ha producido una vuelta atrás en el uso de algunos compuestos, que podían disminuir la confiabilidad de la instalación y que, ante esta dificultad, se ha desarrollado una nueva tecnología en la detección de corona, lo que ha comenzado a utilizarse en los últimos años. Adicionalmente, describe brevemente el origen de los efluvios y la teoría de este nuevo método predictivo. Fundamentalmente, se resalta su utilización en Colombia desde hace aproximadamente varios años. Por medio de esta ponencia, los investigadores obtuvieron información adicional sobre el efecto corona y la prueba de descargas parciales.

También GUERRERO, José; MONTIEL, A (2005), en su trabajo realizado para la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, titulado “SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA LOS SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES”, estudiaron varios aspectos relacionados con los sistemas de puesta a tierra, como la resistividad y tipo de terreno, las fosas y acondicionamiento del cableado, las varillas de interconexión, especialmente las de tipo COPPERWELD y CHEM-ROD® y las normativas que los rigen. Adicionalmente, dan información sobre los elementos de supresión transitorios y las protecciones contra descargas atmosféricas. La ayuda que esta investigación aporta al trabajo de grado que se desarrolló radica en los aspectos de interés que se deben conocer y estudiar al momento de diseñar o verificar un sistema de puesta a tierra.

Del mismo modo GUERRERO, José. GUTIERREZ, C. (2006), en su trabajo especial de grado titulado “DISEÑO, CONSTRUCCION E IMPLEMENTACION DE UN MEDIDOR DE CAMPO MAGNETICO”, diseñaron un dispositivo capaz de medir los distintos niveles de

campos magnéticos, con la finalidad de implementarlo en distintos casos, como lo son las líneas de transmisión, generadores eléctricos, motores eléctricos, entre otros y así establecer un control y diagnóstico de la fuente que produce dicho campo y verificar que estos valores obtenidos por el equipo de medición no sean perjudiciales para el hombre. La contribución de este trabajo a los investigadores sirve de apoyo para la extensión del estudio de los campos magnéticos.

Conjuntamente APONTE, Guillermo. AGUIRRE, L., en su artículo publicado en la edición No 19 de la Revista Energía y Computación, de la escuela de Ingeniería de la Universidad de el Valle, en Colombia, implementaron satisfactoriamente la prueba de descargas parciales en el laboratorio de alta tensión de esta institución, teniendo en cuenta que por las características de la etapa de detección, ésta se empleará inicialmente para mediciones en cables de media y alta tensión. Además, demostraron que las descargas son fenómenos fuertemente afectados por una gran diversidad de factores, que varían con la forma de aplicación del voltaje y que dependen de la exposición previa a condiciones térmicas, eléctricas o de envejecimiento. Esta implementación, ofrece a los investigadores nociones prácticas del ensayo de descargas parciales, además de afianzar los pocos conocimientos adquiridos sobre esta prueba.

Finalmente AREVALO, Liliana., en su Tesis de Maestría Meritoria para optar al título de Magíster en Ingeniería Eléctrica énfasis en Alta Tensión, titulada "COMPORTAMIENTO DE LA CARGA ESPACIAL DEL EFECTO CORONA EN UN ARREGLO DE CILINDROS COAXIALES", en la Universidad Nacional de Colombia, basó su investigación en encontrar una posible explicación a la componente de corriente directa, producida en la corona para las dos polaridades en un arreglo de cilindros coaxiales. La tesis demuestra que no todos los procesos secundarios ocurren en el arreglo de cilindros coaxiales. Se analizó la geometría de la descarga y se compararon dos geometrías diferentes. Adicionalmente, muestra cómo el canal de la descarga cambia la magnitud de las partículas y de la corriente externa del circuito. Con esta investigación, se logró ampliar el conocimiento de los investigadores acerca del proceso de descargas parciales por efectos corona.

PERTURBACIÓN ELECTROMAGNÉTICA (EMI)

La perturbación o interferencia electromagnética (EMI), es cualquier fenómeno electromagnético que puede degradar el funcionamiento de un sistema o afectar de forma maligna a la materia viviente o inerte. También se puede decir que la perturbación electromagnética puede presentarse en forma de ruido. Si un voltaje de ruido causa una operación inapropiada en un circuito, es una interferencia electromagnética. El ruido eléctrico no puede ser eliminado pero sí puede ser reducido en magnitud, hasta no causar interferencia. **Fuente: Lluís FERRER. Introducción a la compatibilidad electromagnética. Barcelona, España.**

Elementos necesarios para que se presente un problema de Interferencia Electromagnética

Tres elementos son necesarios para que se presente un problema de interferencia. Primero, la existencia de una fuente de perturbación (Interferencia Electromagnética), segundo, un circuito receptor que sea susceptible a la perturbación; tercero, un canal de acople que permita transmitir

la perturbación de la fuente al receptor. En la figura 2, se muestran los elementos necesarios para que se presente un problema de interferencia electromagnética.

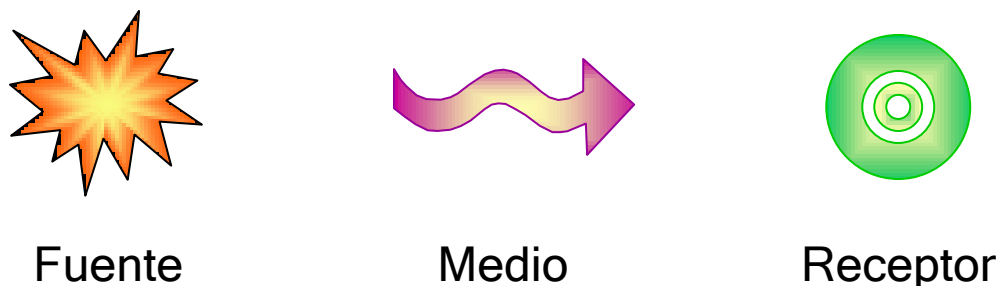


Fig. 2 Elementos presentes en un problema de interferencia electromagnética.

Por lo tanto, hay tres formas de eliminar una propagación de la perturbación:

- ▶ Suprimiendo la fuente perturbadora.
- ▶ Haciendo al receptor insensitivo a la interferencia, es decir, menos sensible a las emisiones.
- ▶ Eliminando el medio de transmisión de la perturbación de la fuente al receptor, haciendo el camino de acoplamiento menos efectivo.

No siempre se puede identificar la fuente de perturbación y algunas veces no es posible eliminarlas, ya que son señales activas del sistema. En estos casos sólo se puede actuar sobre el camino de acoplamiento o haciendo la víctima más inmune.

Entre las principales causas por las que las interferencias electromagnéticas cada vez cobran más interés, se pueden remarcar las siguientes:

- ▶ Aumento de los equipos electrónicos, tanto en la industria como en el hogar (Fuentes de EMI).
- ▶ Equipos más grandes y más complejos.
- ▶ Aumento de sistemas de telecomunicación (radio, móviles, etc.).

- Disminución del margen de ruido de los sistemas digitales (disminución de la tensión de trabajo).

Tipos de EMI

Transitorios

Con el término de “perturbaciones transitoria” nos referimos a las sobretensiones por impulsos acopladas en los circuitos eléctricos que se encuentran en forma conducida en los cables de alimentación y en las entradas de control y señal de los equipos eléctricos o electrónicos.

Se originan de la conmutación rápida de los interruptores mecánicos y, sobre todo, electrónicos. Cuando se conmuta un interruptor, la tensión en sus bornes pasa con mucha rapidez de su valor nominal a cero y viceversa, generando variaciones bruscas y elevadas de la tensión (dv/dt) conducida a través de los cables.

Características de los transitorios normalizados (Tipo IEC 1000-4-4)

Los elementos significativos de estas perturbaciones son:

- ✗ El muy bajo tiempo de subida del impulso aproximadamente 5 mseg.
- ✗ La duración del impulso aproximadamente 50 mseg.
- ✗ Lo repetitivo del fenómeno: ráfagas de impulsos durante aproximadamente 15 mseg.
- ✗ La frecuencia de repetición: sucesión de ráfagas aproximadamente cada 300 mseg.
- ✗ La muy baja energía de los impulsos aproximadamente 1×10^{-3} Julios.
- ✗ La muy alta amplitud de la sobretensión aproximadamente 4 kV.

En la figura 3 se muestra un ejemplo de una representación temporal de un transitorio con impulsos y en la figura 4 con ráfagas de impulsos.

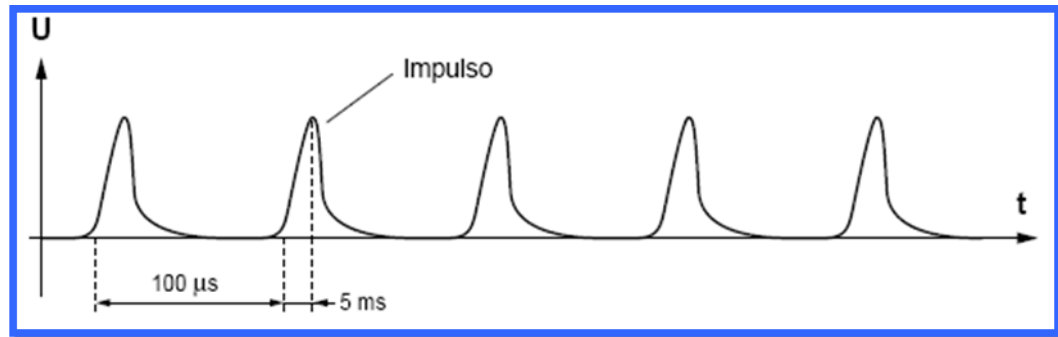


Fig. 3 Representación temporal del transitorio con impulsos.

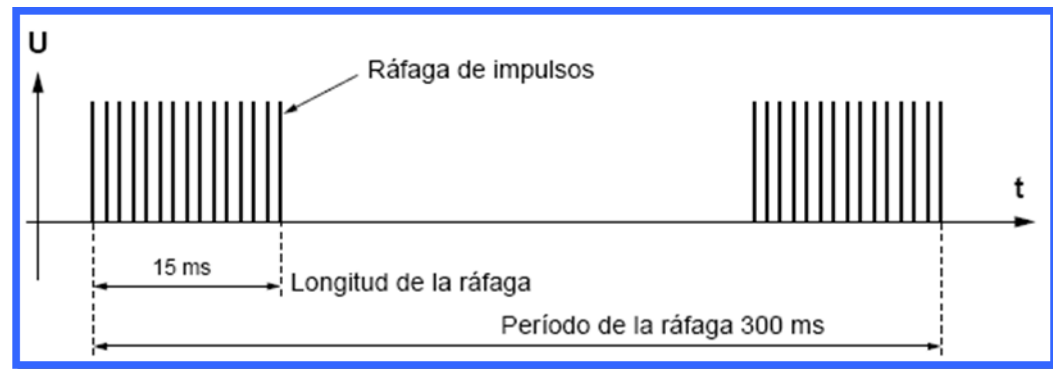


Fig. 4 Representación temporal del transitorio con ráfagas de impulso.

Según el tipo de la señal transitoria considerada, el espectro puede ser de banda ancha 0 - 100MHz o más. En la figura 5 se muestra la representación espectral del transitorio.

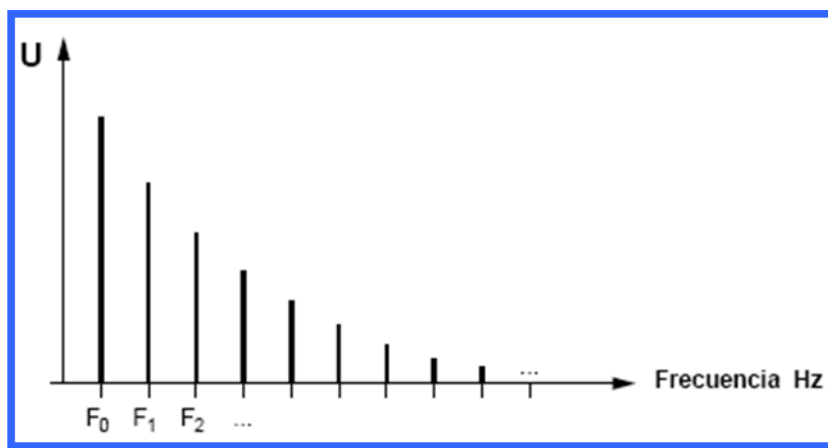


Fig. 5 Representación espectral del transitorio.

Armónicos

Con independencia de su forma, una señal periódica puede descomponerse matemáticamente en una suma de señales sinusoidales con amplitudes y fases diferentes, cuya frecuencia es un múltiplo entero de la fundamental, la cual es la frecuencia más baja y útil de la señal. Los armónicos se obtienen de la descomposición de una señal en una serie de FOURIER y son perturbaciones de tipo baja frecuencia (BF) que se transmiten principalmente por conducción.

Se originan por todas las cargas (receptores) no lineales (alumbrado fluorescente, rectificador, entre otros) que consumen una corriente no sinusoidal y, por tanto, generan corrientes armónicas. En la figura 6 se muestra la forma de onda de la corriente consumida por un tubo fluorescente.

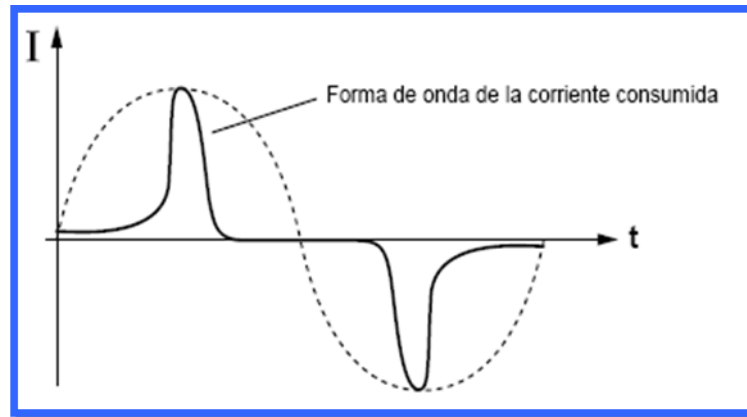


Fig. 6 Forma de onda de la corriente consumida por un tubo fluorescente.

En la figura 7 se observa la representación temporal de los armónicos, mientras que en la figura 8 la representación espectral.

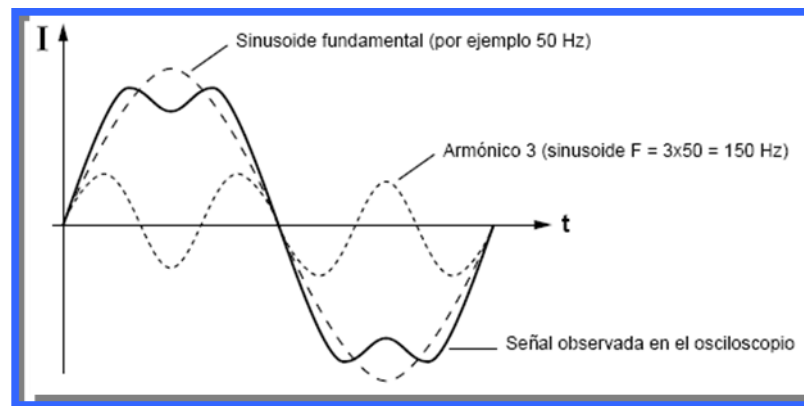


Fig. 7 Representación temporal de los armónicos.

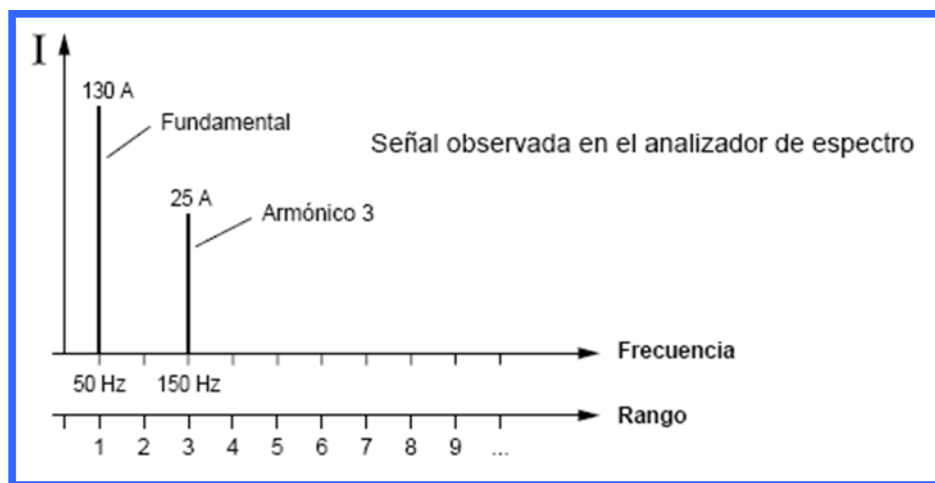


Fig. 8 Representación espectral de los armónicos.

Descargas Electrostáticas

Con el término “descarga electrostática” nos referimos a los impulsos de corriente que recorren un objeto cualquiera cuando este objeto conectado a masa entra en contacto (directo o indirecto) con otro cuyo potencial con respecto a la masa del anterior es elevada.

Las cargas electrostáticas proceden del intercambio de electrones entre los materiales o entre el cuerpo humano y los materiales. La combinación de materiales sintéticos (plásticos, tela...) y un ambiente seco favorece este fenómeno.

Características de las descargas electrostáticas normalizadas (Tipo IEC 1000-4-2)

Los elementos significativos de estas perturbaciones son:

- ✗ El bajo tiempo de subida del impulso aproximadamente 1 nanoseg.
- ✗ La duración del impulso aproximadamente 60 nanoseg.
- ✗ El carácter aislado del fenómeno: 1 descarga.
- ✗ La muy alta tensión que origina la descarga (2 - 15 kV)

En la figura 9 se observa la representación temporal de las descargas electrostáticas, mientras que en la figura 10 la representación espectral.

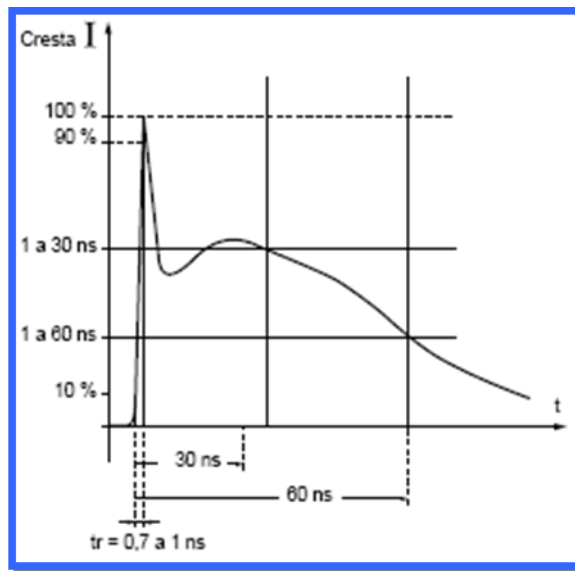


Fig. 9 Representación temporal de una descarga electrostática.

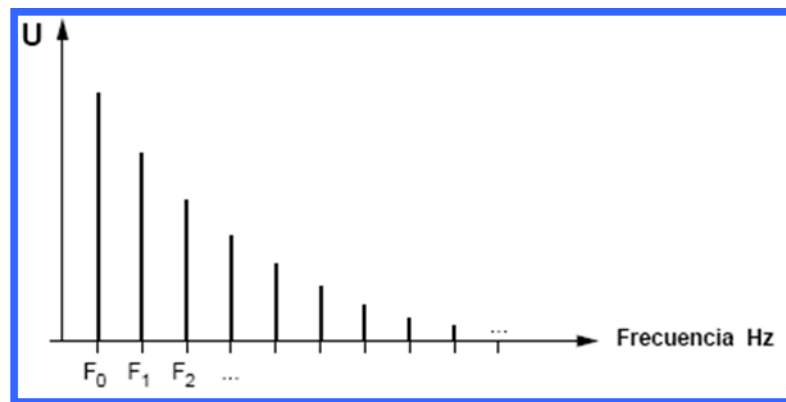


Fig. 10 Representación espectral de una descarga electrostática.

Fuentes principales de EMI

Fuentes intencionadas

Son fuentes generadas por los equipos creados por el hombre, tal como:

- ✗ Teléfonos móviles.
- ✗ Radares
- ✗ Emisores de Televisión
- ✗ Emisores de Radiodifusión
- ✗ Walkie-talkie como lo muestra la figura 11

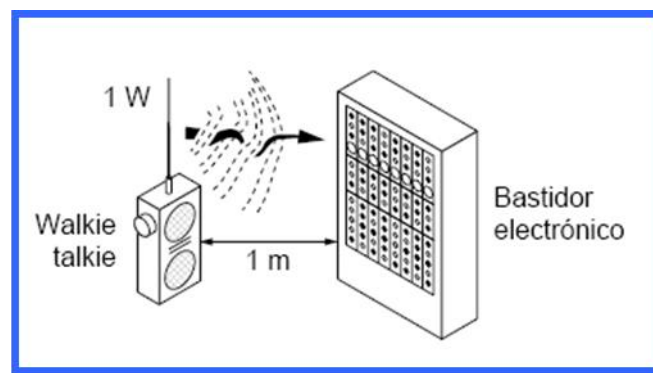


Fig. 11 Ilustración de las perturbaciones emitidas por Walkie-talkie.

Fuentes no intencionadas

Son debidos a perturbaciones accidentales o permanentes tales como las que se describen en el cuadro N° 1.

Cuadro N° 1.

Fuentes principales de perturbaciones electromagnéticas no intencionadas

TIPOS	PRINCIPALES FUENTES	ILUSTRACIÓN
Sobretensiones transitorias	Conmutación carga inductiva por contacto seco. Motores síncronos (fase conmutación escobillas).	
Armónicos	Puentes rectificadores (soldadura por puntos) Alumbrado fluorescentes. Maquina descongeladora.	
Descargas electrostáticas	Combinación de materiales sintéticos (plástico, telas) y un ambiente seco favorecen este fenómeno.	

Fuente: Catalogo didáctico. Compatibilidad electromagnética. HIMEL, 2000.

En el grafico 1 se muestra la distribución espectral de las perturbaciones electromagnéticas, en donde se observa algunas de las fuentes principales que las originan y en que ancho de banda frecuencial se generan, además de ilustrar el espectro de frecuencia de las perturbaciones conducidas y radiadas.

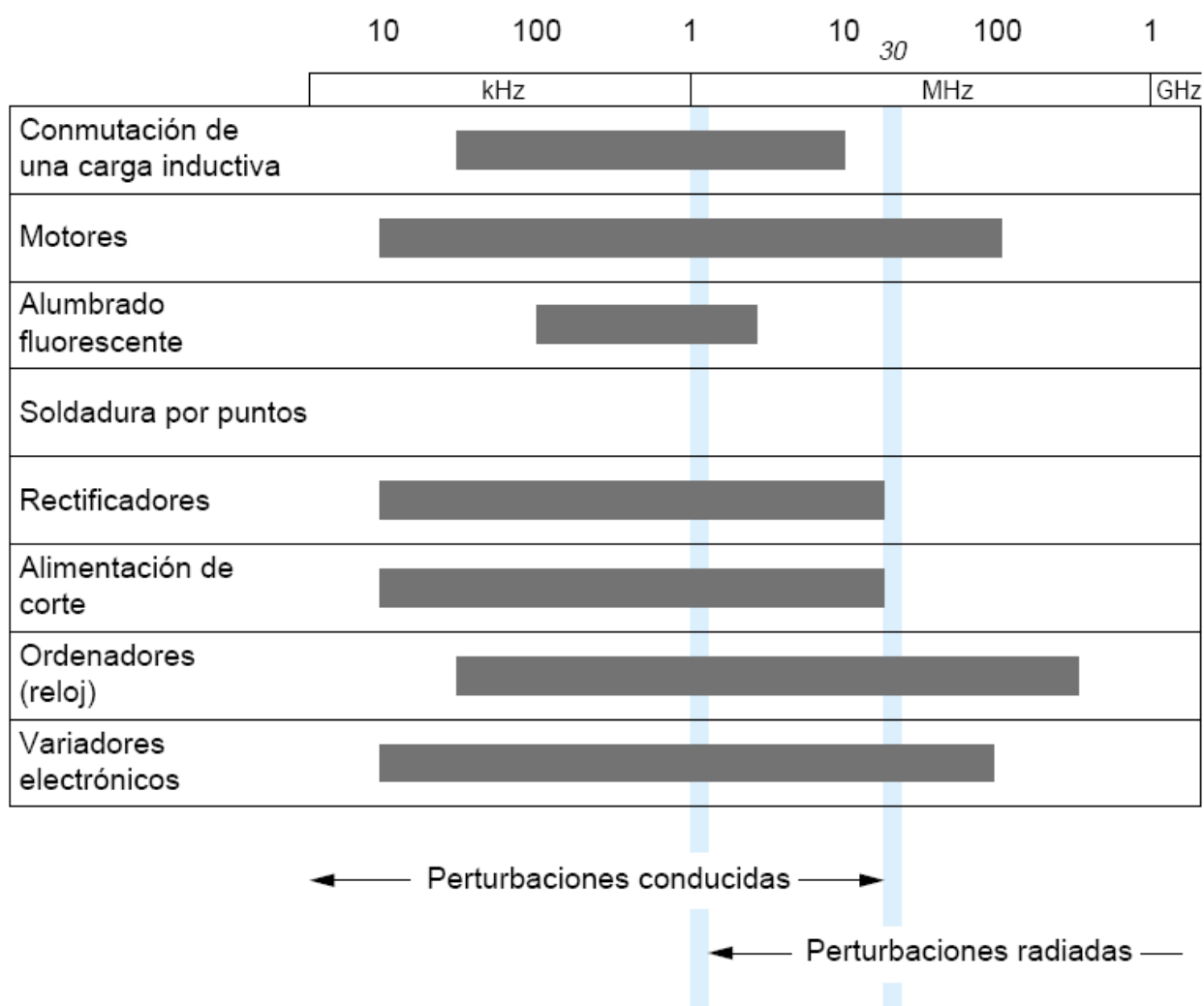


Gráfico 1. Distribución espectral de las perturbaciones electromagnéticas. Manual didáctico 2000. Compatibilidad Electromagnética. SCHNEIDER ELECTRIC.

Mecanismos de propagación de EMI

Para analizar correctamente los fenómenos de la Compatibilidad Electromagnética, es esencial identificar el modo de transmisión de las perturbaciones.

Cuando un dispositivo sensible está alimentado por una fuente de energía que alimenta a varios equipos (red de distribución), las perturbaciones generadas por los equipos de potencia (motores, hornos) le son transmitidas por las líneas de alimentación comunes.

Existe otro tipo de acoplamiento por conducción en los circuitos de masa y de tierra. Todos los conductores de masa electrónica (tarjeta) están conectados a la masa y a la tierra de la instalación a través de conductores eléctricos de impedancia (Z) no nula. Como consecuencia, se produce una diferencia de potencial entre la tierra y las masas y entre las mismas masas. Estas diferencias de potencial provocan la circulación de corrientes perturbadoras por los diferentes circuitos.

También pueden producirse acoplamientos por radiación, cuyo resultado es el mal funcionamiento de los equipos cercanos.

Por tanto, según el medio de propagación que utilice la perturbación o interferencia electromagnética, para perjudicar el funcionamiento de un equipo o la calidad de una señal, se puede establecer una clasificación de las interferencias en: conducidas, acoplamiento capacitivo, acoplamiento inductivo y radiadas. Esta clasificación se muestra detalladamente en la figura 12.

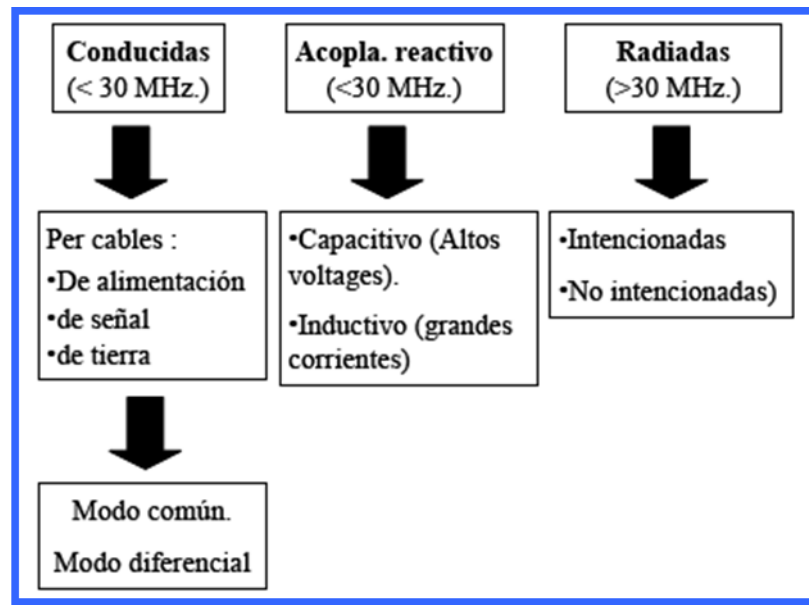


Fig. 12 Tipos de propagación de las interferencias electromagnéticas.

Interferencias conducidas

Se propagan a través de cables, ya sean de alimentación, señal o tierra desde la red de alimentación hacia el equipo o aparato que se puede ver afectado. En la figura 13, se observa un ejemplo de interferencias conducidas.

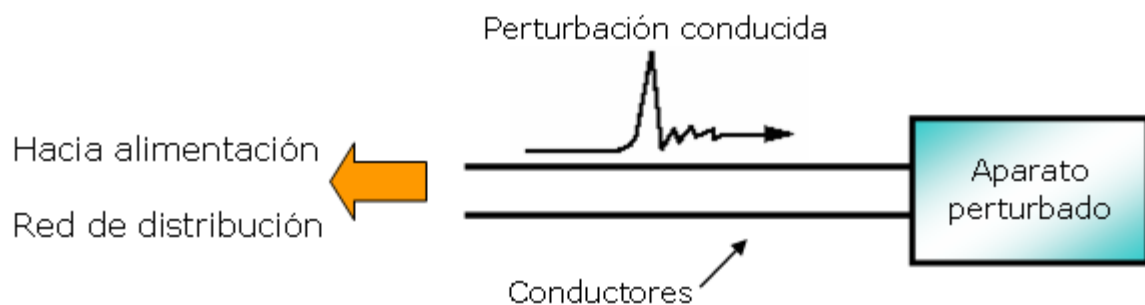


Fig. 13 Interferencias conducidas.

Para una conexión bifilar (2 hilos), una señal (útil o parasita), puede desplazarse de dos formas: modo común y modo diferencial.

Modo común

Las perturbaciones de modo común representan el principal problema de la Compatibilidad Electromagnética, ya que su trayectoria de propagación es difícil de identificar. En este caso, las interferencias se propagan por conductores activos y la tierra del sistema, principalmente por acoplamientos capacitivos, como se muestra en la figura 14, por lo cual los puntos de interés son aquellos en los que se presenten grandes variaciones de tensión en el tiempo (dv/dt).

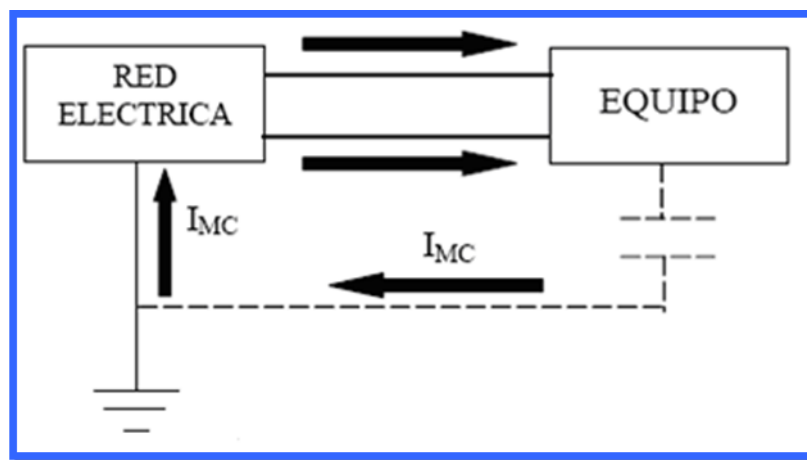


Fig. 14 Interferencias en modo común.

Modo diferencial

La corriente de modo diferencial (o modo serie) se propaga por uno de los conductores, pasa a través del aparato provocando o no un fallo en su funcionamiento y regresa por otro conductor. Esta propagación se puede observar en la figura 15. Las interferencias en modo diferencial, principalmente son debidas a espiras de corriente que presentan grandes variaciones de corriente en el tiempo (di/dt) y sólo se propagan por conductores activos del sistema.

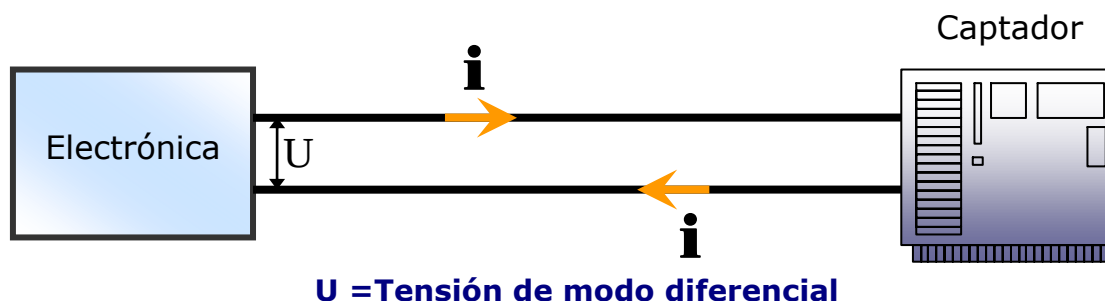


Fig. 15 Acoplamiento de modo diferencial.

Interferencias por acoplamiento capacitivo

Siempre existe una capacidad no nula entre un circuito eléctrico (cable, componente) y otro circuito cercano (conductor, masa...). Cualquier diferencia de potencial variable entre estos dos circuitos, genera una corriente eléctrica que circula de uno hacia otro a través del aislante (el aire...), formando un condensador llamado capacidad parásita.

Este acoplamiento también se llama diafonía capacitiva. El principio teórico se puede resumir de la siguiente manera: *“Si el campo eléctrico generado por una tensión fuente aplicada entre dos conductores atraviesa otro conductor cercano (conductor afectado) se inducirá en él una corriente parásita, la cual podrá provocar a la vez una tensión parásita”*. **Fuente: Introducción a la compatibilidad electromagnética, Lluís Ferrer i Arnau, UPC 2001 (14).**

En la figura 16 se muestra un ejemplo de acoplamiento capacitivo; si se aplica una diferencia de potencial V_F al circuito 1 se inducirá una corriente parásita al circuito 2 que circulará de un circuito a otro por medio de las capacidades parásitas entre los conductores 1 y 2 (CP_1 y CP_2) y que a su vez originará una tensión parásita (V_I).

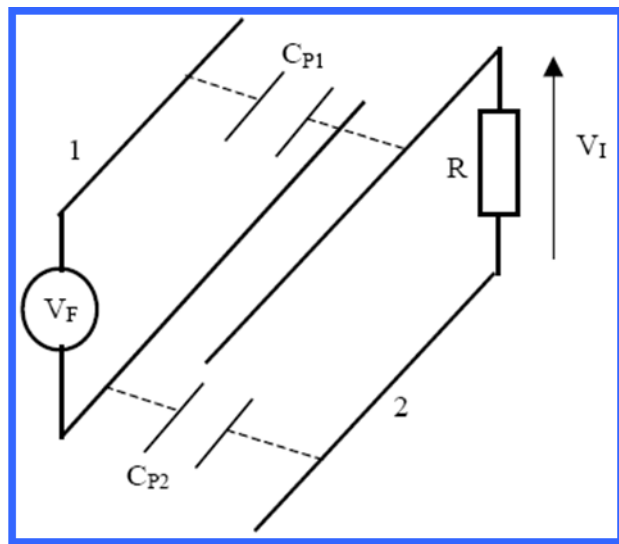


Fig. 16 Ejemplo de acoplamiento capacitivo.

La tensión parásita será mayor:

- ▶ Cuanto mayor sea la variación respecto al tiempo de V_F o cuanto mayor sea su frecuencia lo cual genera un mayor campo eléctrico.
- ▶ Cuanto menor sea la distancia entre el conductor fuente y el conductor afectado, ya que mientras más cerca se encuentren mayor será el campo eléctrico que atraviese al conductor perturbado.
- ▶ Cuanto mayor sea la longitud de los dos circuitos enfrentados.

La forma de reducir la diafonía capacitiva es utilizar cables apantallados. Recordando, si la pantalla es un buen conductor, la superficie apantallada se convierte en una área equipotencial en donde el campo eléctrico en el interior es nulo.

El valor de la capacidad parásita formada por las dos partes del circuito es:

- ▶ Proporcional a la superficie « S » que forman los dos circuitos
- ▶ Inversamente proporcional a la distancia « d » entre los dos circuitos.

Aunque estas capacidades parásitas son totalmente despreciables a 60 Hz, tienen una importancia considerable en alta frecuencia (AF) y provocan fallos en el funcionamiento de las instalaciones.

Interferencias por acoplamiento inductivo

También llamada “diafonía inductiva”. Para que se produzca necesitamos un hilo conductor que lleve una corriente que al variar, creará un campo electromagnético que, a corta distancia, se puede considerar puramente magnético y una espira, en la que se inducirá una fuerza electromagnética (f.e.m.) perturbadora, como se muestra en la figura 17.

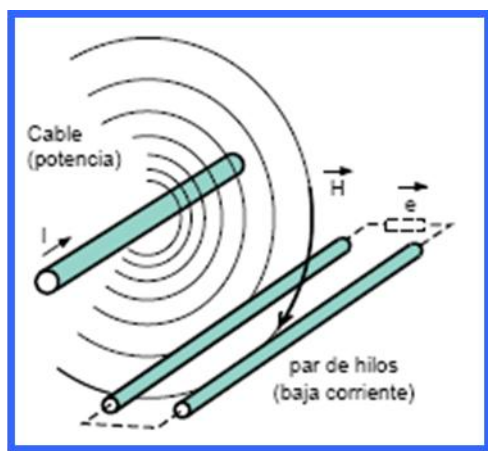


Fig. 17 Elementos para que se produzca un acoplamiento capacitivo.

El principio teórico es la conocida “Ley de Faraday”. Es evidente que la corriente circulante debe ser alta y generada principalmente por los circuitos de potencia (que conducen corrientes elevadas mayores a 10 Amperios).

En la figura 18 se presenta otro ejemplo de la diafonía inductiva. Según la Ley de Faraday, la f.e.m. inducida en el bucle ($\mathcal{U}$) es proporcional a la variación respecto al tiempo del flujo de campo magnético que lo atraviesa.

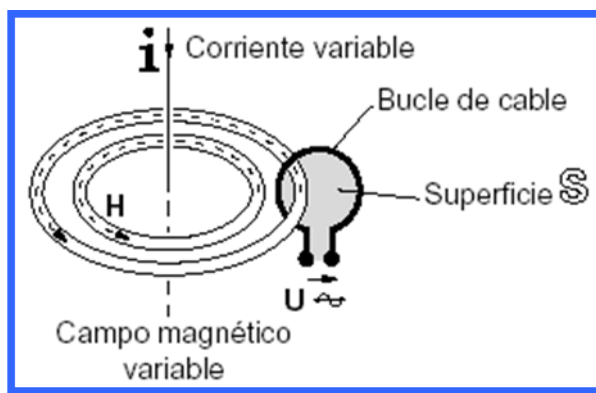


Fig. 18 Ejemplo de diafonía inductiva.

Se sabe que el flujo magnético que atraviesa la espira y en consecuencia la f.e.m, será mas elevada cuanto mayor sea:

- ▶ El valor de la corriente i .
- ▶ El área del bucle de cable.

Por otra parte, su derivada temporal será mayor, cuanto mayor sea la frecuencia de la corriente generadora del campo magnético.

Sien embargo existen formas de reducir el acoplamiento inductivo y son:

- ▶ Reducir el área de la espira de cable y esto se puede conseguir trenzando el cable.
- ▶ Colocar lo mas cercano posible el cable que lleva la corriente perturbadora y el cable de retorno de esta corriente (los cuales irán en sentido contrario). De esta forma se anulará el campo magnético (H) que se crea.
- ▶ Verificando que el cable perturbador se encuentre perpendicular a la espira de cable, lo cual no permitirá que exista flujo que atravesase a este último y por lo tanto no se producirá en él perturbación.

Acoplamiento por radiación electromagnética

Las perturbaciones radiadas se transmiten por el medio ambiente (aire). Los acoplamientos capacitivos e inductivos que se han visto anteriormente, también se llaman “de campo cercano” y el acoplamiento por radiación electromagnética se denomina “de campo lejano”.

La frontera entre los dos campos es cuando el dispositivo afectado está a una distancia igual o superior a $\lambda/2\pi$, siendo λ la longitud de onda de la perturbación; por tanto, lo que marca la diferencia es la distancia y la frecuencia.

En campos cercanos, grandes dV/dt pueden provocar acoplamientos capacitivos y grandes di/dt acoplamientos inductivos y hay que estudiarlos por separado, pero, para campo lejano el campo eléctrico y magnético van juntos en forma de radiación electromagnética y hay que estudiarlos como tal. Un ejemplo de aplicación, es el mostrado en la figura 19.

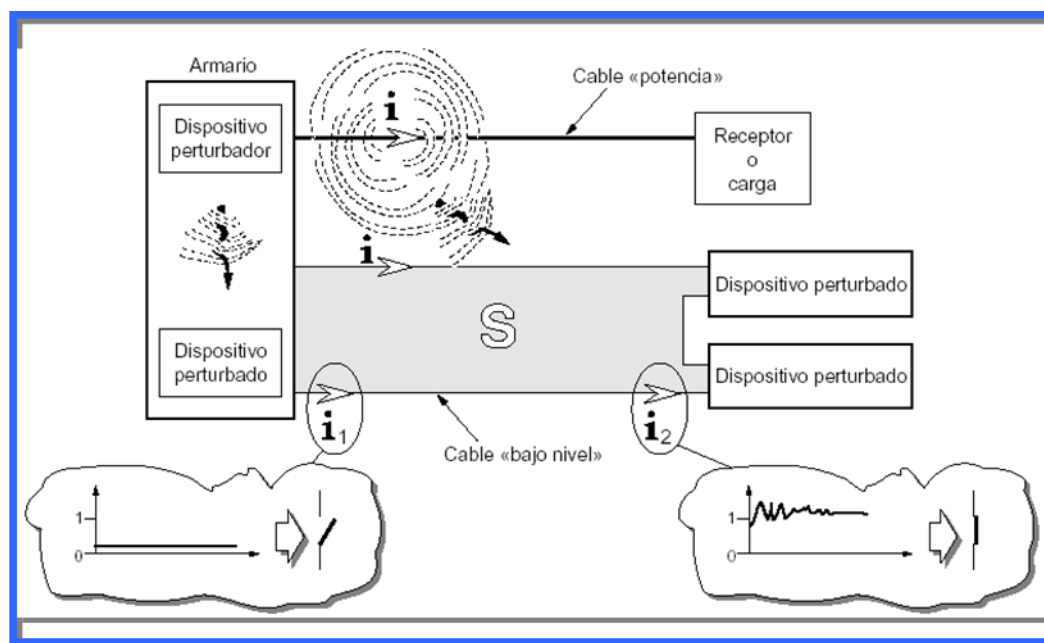


Fig. 19 Acoplamiento por radiación.

Se observa que existe un dispositivo perturbador el cual genera un campo electromagnético que induce perturbaciones radiadas en los dispositivos que se encuentran en las zonas adyacentes.

Otro efecto que debe ser tomado en el caso de los acoplamientos radiados es el efecto de antena de un conductor.

Los conductores son antenas a las que se puede acoplar el campo radiado. Además, estos conductores también pueden emitir perturbaciones radiadas, cuando los recorre una corriente de alta frecuencia (AF). Este efecto se muestra en la figura 20.

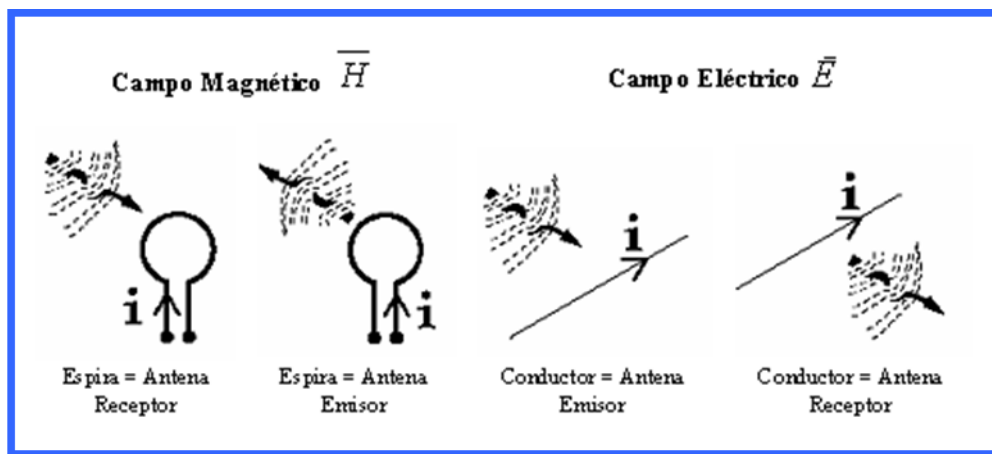


Fig. 20 Efecto antena de un conductor.

Desacoplamiento de las perturbaciones

Las perturbaciones de la red de alimentación, tales como los transitorios rápidos, procedentes por ejemplo de sobretensiones de maniobra, pueden transferirse al secundario del transformador y perturbar los productos conectados a éste, gracias a la capacitancia parasita que se genera entre los devanados primario y secundario del transformador de alimentación principal, tal como se muestra en la figura 21.

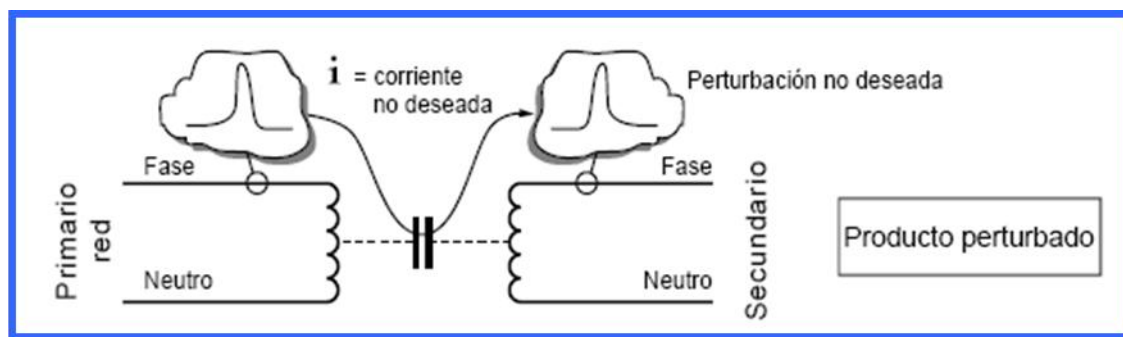


Fig. 21 Fenómeno de acoplamiento de perturbaciones por medio de capacitancia parasita.

En corriente continua o baja frecuencia, la resistencia de aislamiento entre los devanados primario y secundario es mayor o igual a 10.000 ohmios, por lo tanto, la capacitancia parasita es despreciable.

En alta frecuencia, la resistencia de aislamiento entre el primario y secundario depende de la capacidad parasita formada entre ellos. Para un transformador pequeño con una potencia menor a 500KVA, la capacidad parasita es menor o igual a 50×10^{-12} faradios, y en los transformadores mayores que esa potencia, es decir, mas grandes, dicha capacitancia es mayor a 1000×10^{-12} faradios; entonces, para un transformador grande con capacitancia parasita de 1000×10^{-12} faradios, la impedancia entre devanados es de 100 ohmios a una frecuencia de 2000 Hz.

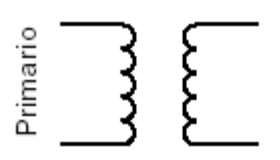
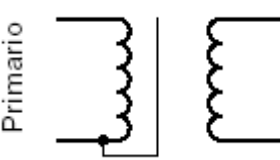
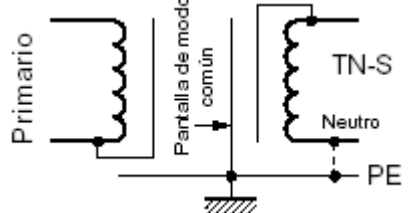
Sin embargo, existe un modo de desacoplar las perturbaciones y es a través de un transformador de aislamiento, el cual tiene como ventaja que:

- ▶ Permite cambiar de régimen de neutro en cualquier punto de la instalación.
- ▶ Garantiza un buen aislamiento galvánico, pero solamente en baja frecuencia (BF). Para garantizar un aislamiento galvánico adecuado en alta frecuencia (AF), será necesario utilizar un transformador de pantalla doble.
- ▶ Bloquea y conduce las corrientes de modo común hacia las masas.
- ▶ Permite abrir las espiras de masa.

El cuadro N° 2 muestra un esquema de las características y tipos de transformadores de aislamiento.

Cuadro N° 2.

Tipos de transformadores de Aislamiento

Transformador	Representación	Aislamiento	
		BF	AF
Normal		OK	Ineficaz
Pantalla Simple		OK	Medio
Pantalla Doble		OK	Bueno

Fuente: Manual didáctico 2000. Compatibilidad Electromagnética. SCHNEIDER ELECTRIC.

Elementos supresores de perturbaciones

Filtros

La función de los filtros es dejar pasar las señales útiles y eliminar la parte no deseada de las señales transmitidas. Esto se puede observar en la figura 22.

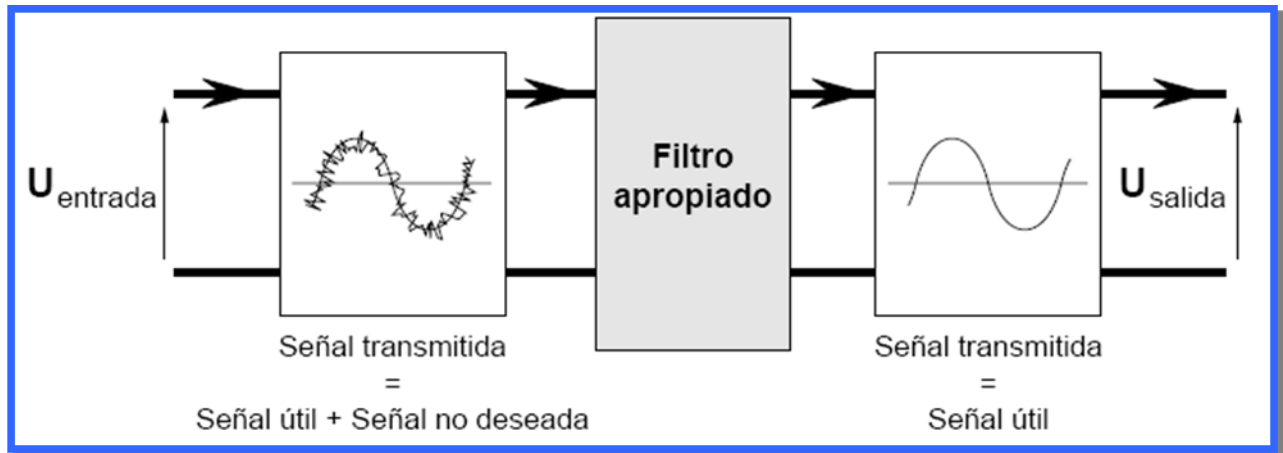


Fig. 22 Filtrado de una señal no deseada.

Dependiendo del campo de utilización se encuentran en las frecuencias:

- ▶ Filtros antiarmónicos $F \leq 2,5 \text{ kHz}$.
- ▶ Filtros RFI (Radio - Perturbaciones conducidas) $F \leq 30 \text{ MHz}$.

En cuanto al tipo se encuentran:

- ▶ Filtros de modo diferencial.
- ▶ Filtros de modo común.
- ▶ Filtros completos que garantizan el filtrado de modo común y diferencial.

Tecnología:

- ▶ Pasivos.
- ▶ Activos.

Funciones principales de un filtro pasivo:

- ⚡ Servir de barrera contra las perturbaciones: inductancia en serie ($Z = L\omega$)
- ⚡ Canalizar las perturbaciones: capacidad en paralelo $Z = 1/ C\omega$
- ⚡ Combinar ambas

Se puede observar en la figura 23 un esquema simple de un filtro pasivo que posee las características antes descritas:

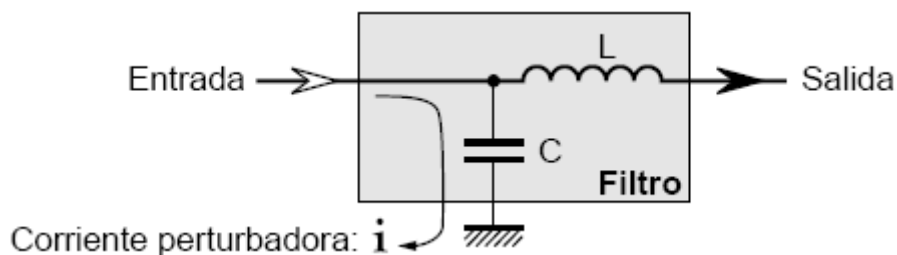


Fig. 23 Esquema de un filtro pasivo LC.

En la figura 24 se muestra el diagrama circuital de un filtro pasivo en modo diferencial, conectado a su vez en las dos líneas:

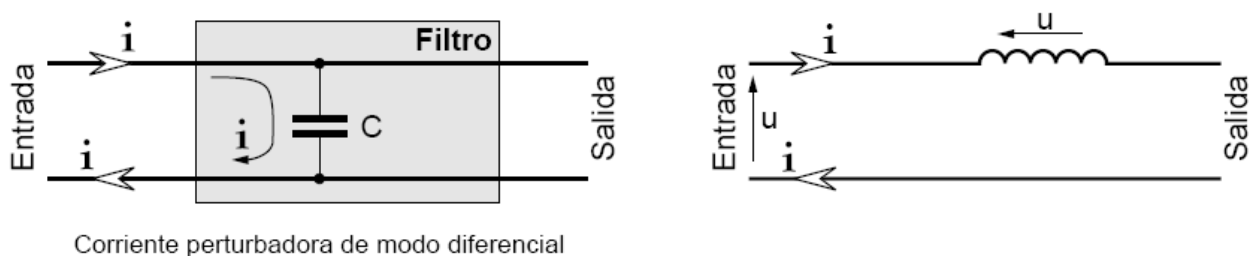


Fig. 24 Filtro pasivo en modo diferencial.

En la figura 25, se muestra el diagrama circuítal de un filtro pasivo en modo común:

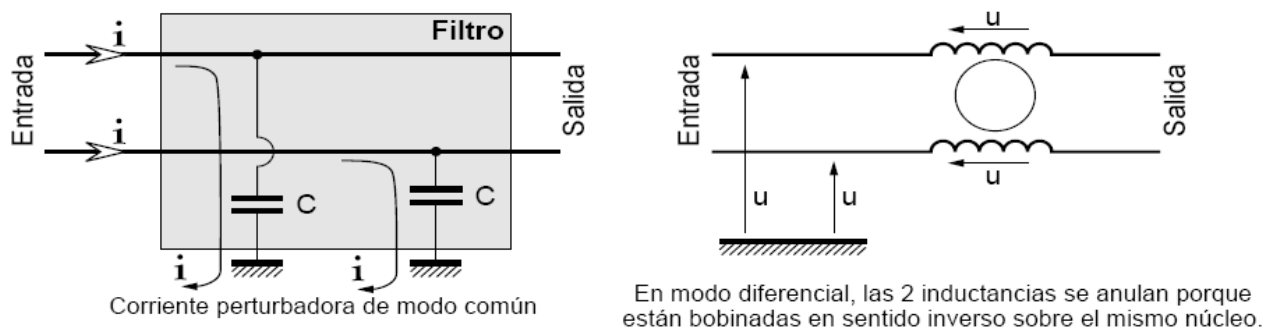


Fig. 25 Filtro pasivo en modo común.

Ferritas

Las ferritas son materiales cerámicos ferromagnéticos, compuestos por hierro, boro y bario, estroncio o molibdeno. Éstas poseen una alta permeabilidad magnética, lo cual les permite almacenar campos magnéticos con más fuerza que el hierro. Por lo general se emplean como filtros en modo común para alta frecuencia (AF). En la figura 26 se puede observar la disposición de una ferrita en modo común.

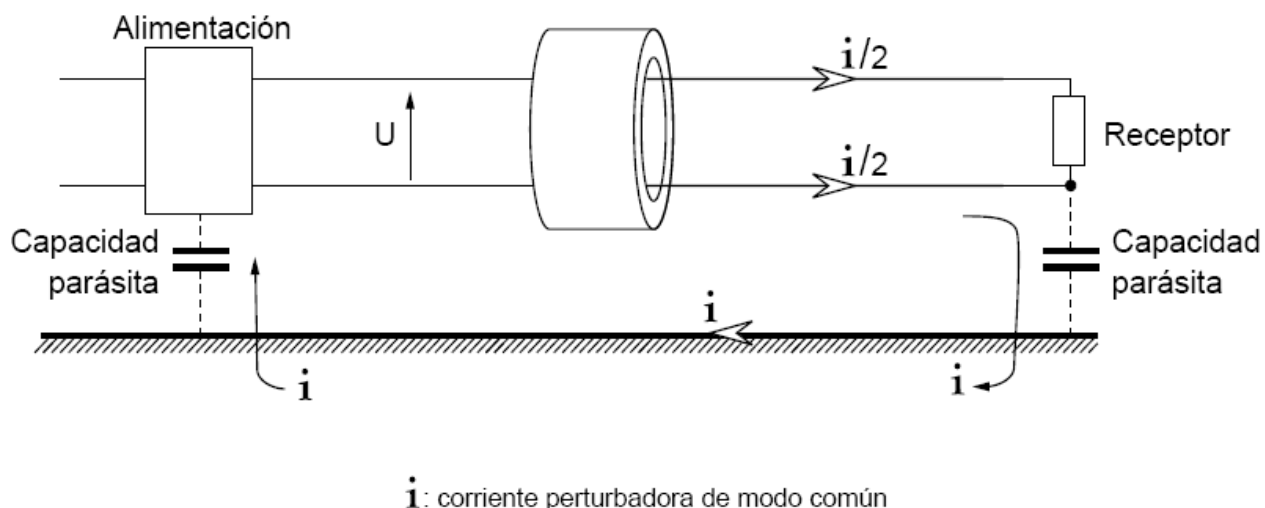


Fig. 26 Disposición de una ferrita en modo común.

La ferrita utiliza dos principios:

- ↻ Inductancia en modo común.
- ↻ Absorción de las perturbaciones «AF» de modo común por calentamiento inducido.

Estos dos principios generan una impedancia de modo común cuya eficacia depende de su relación con la impedancia del circuito por proteger.

CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

Los campos eléctricos y magnéticos radiados, proporcionan otra forma de acoplamiento de ruido. Todos los elementos circuitales, incluyendo los conductores, radian campo electromagnético siempre y cuando existan cargas en movimiento. Además de esta radiación involuntaria, también se cuenta con el problema de radiación intencional, de fuentes tales como estaciones transmisoras, radares, etc. Cuando el receptor está cerca de la fuente (campo cercano), tanto el campo eléctrico como el magnético es considerado separadamente. Cuando el receptor está lejos de la fuente (campo lejano), la radiación es considerada como una combinación eléctrica y magnética o radiación electromagnética. *“La fuerza ejercida sobre una carga en reposo, es distinta cuando la carga está en movimiento. Decimos que en esta situación existe un campo magnético”*. **Fuente:** Diseño de la Jaula de Faraday y puesta a Tierra del Laboratorio de Alta Tensión de la ESPOL”, Celiano Balceca, 1988 (78)

Si se considera una carga de prueba, la fuerza ejercida en cada punto, colocando la carga en reposo, se denomina “intensidad de campo eléctrico”, presente en ese punto. Si la carga (q) en el mismo punto, esta animada de una cierta velocidad (v), la fuerza ejercida es distinta a la del campo eléctrico.

De lo expuesto se desprende que la fuerza que se ejerce sobre una carga en movimiento se compone de la fuerza estática o eléctrica y de la fuerza dinámica o magnética. La ecuación total de la fuerza es la 2.2.1:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} + q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (\text{Fuerza de Lorentz}) \quad (2.2.1)$$

El magnetismo y la electricidad no son cosas independientes y deben ser considerados siempre en conjunto como un campo electromagnético completo.

Las ecuaciones de Maxwell, que describen a este campo electromagnético, se resumen en el cuadro N° 3:

Cuadro N° 3.

Ecuaciones de Maxwell en forma diferencial

	De la ley de ampere	De la ley de faraday	De la ley de gauss	De la ley de gauss
	Corriente eléctrica	Potencial eléctrico	Flujo eléctrico	Flujo magnético
Dimensiones	Área	Área	Volumen	Volumen
Caso general	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \partial \vec{D} / \partial t$	$\nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t$	$\nabla \times \vec{D} = \rho$	$\nabla \times \vec{B} = 0$
Espacio libre	$\nabla \times \vec{H} = \partial \vec{D} / \partial t$	$\nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t$	$\nabla \times \vec{D} = 0$	$\nabla \times \vec{B} = 0$
Variación armónica	$\nabla \times \vec{H} = (\sigma + j\omega\epsilon) \cdot \vec{E}$	$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H}$	$\nabla \times \vec{D} = \rho$	$\nabla \times \vec{B} = 0$
Estacionario	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}$	$\nabla \times \vec{E} = 0$	$\nabla \times \vec{D} = \rho$	$\nabla \times \vec{B} = 0$
Estático	$\nabla \times \vec{H} = 0$	$\nabla \times \vec{E} = 0$	$\nabla \times \vec{D} = \rho$	$\nabla \times \vec{B} = 0$

Fuente: Purcell, Edward M., *Electricity and Magnetism*, McGraw-Hill (1985)

En donde, tanto para la ecuación (2.2.1), como para la tabla I:

$\vec{E}$ = intensidad de campo eléctrico (volt/m).

$\overline{D}$ = densidad de flujo eléctrico (coulomb/m²).

ϵ = permitividad del medio. Para el vacío $\epsilon = \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ (Faradio/m).

δ = densidad de carga (coulomb/m³).

$\overline{B}$ = densidad de flujo magnético o inducción magnético (Newton/amperio-m).

$\overline{H}$ = campo magnético o vector H (ampere/m).

μ = permeabilidad del medio. Para el vacío $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (Henry/m).

$\overline{J}$ = densidad de corriente (ampere /m²).

ω = frecuencia angular = $2 \pi f$.

σ = conductividad eléctrica (siemens/m).

f = frecuencia (Hz).

La Ley de Gauss para campos eléctricos siempre es valida tanto para campos dinámicos como estáticos: El flujo de $\vec{E}$ a través de cualquier superficie cerrada es proporcional a la carga que hay dentro.

La Ley de Faraday, considera el efecto eléctrico de campos magnéticos variables.

La Ley de Gauss para campos magnéticos, considera que como no hay cargas magnéticas, el flujo de B a través de cualquier superficie cerrada es siempre cero.

La Ley de Ampere, con la generalización de Maxwell, considera el efecto magnético de corrientes estacionarias y de campos eléctricos variables.

COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA (CEM)

Es la capacidad de un dispositivo, equipo o sistema para funcionar en un entorno electromagnético de forma satisfactoria y sin que produzca perturbaciones (electromagnéticas)

intolerables para cualquier otro dispositivo situado en el mismo entorno. En la figura 27 se muestra un esquema de la compatibilidad electromagnética.

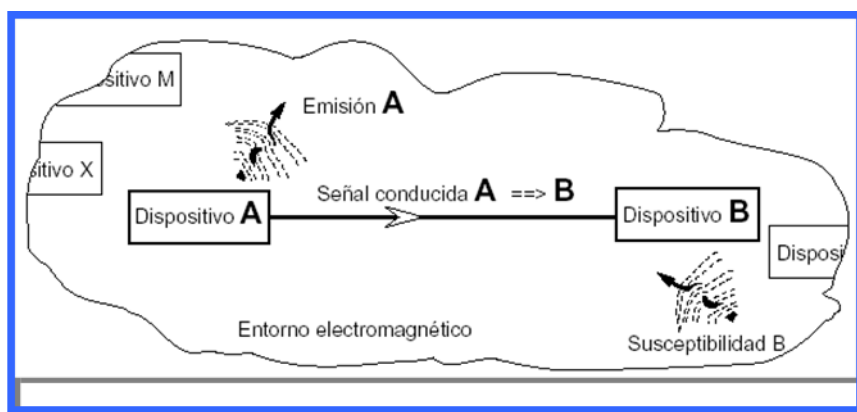


Fig. 27 Esquema de la compatibilidad electromagnética.

Se observa que existe un dispositivo A que emite perturbaciones que se propagan de forma radial y por conducción, y un dispositivo B que se encuentra expuesto a tales perturbaciones. Existe compatibilidad electromagnética en este sistema si las perturbaciones emitidas son tolerables para el dispositivo B de manera tal que no se vea afectado en su función por las mismas.

Nivel de inmunidad de un dispositivo

El nivel de inmunidad de un dispositivo o circuito, es la capacidad que tiene de operar en un ambiente contaminado de ruido eléctrico, sin degradación y con un definido margen de seguridad. Es lo contrario a la susceptibilidad.

Emisiones Electromagnéticas

Las emisiones se presentan debido a causas potenciales de interferencia que un circuito puede producir. El propósito de limitar las emisiones es controlar la energía electromagnética emitida, y

a su vez, el ambiente electromagnético, en el cual otros equipos puedan operar. Controlando las emisiones de un circuito se puede eliminar los problemas de interferencia para otros sistemas, obteniendo un ambiente electromagnético compatible. El grafico 2 muestra los distintos niveles de perturbación permitidos.

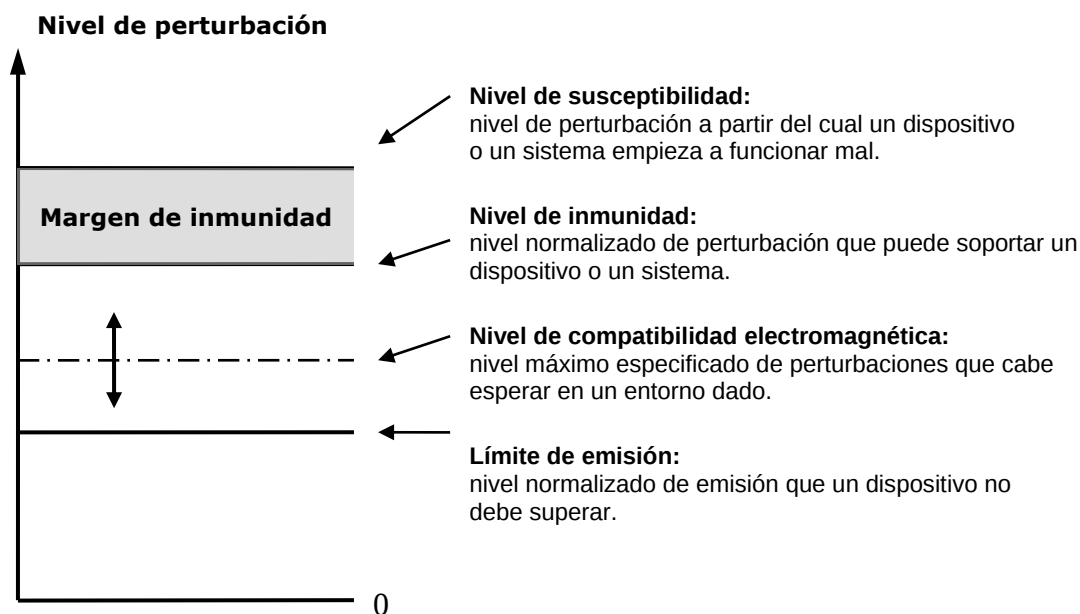


Gráfico 2. Niveles de perturbación permitidos. *Manual didáctico 2000. Compatibilidad Electromagnética. SCHNEIDER ELECTRIC.*

Esto significa que el nivel de inmunidad de cada aparato debe ser tal que su entorno electromagnético no lo perturba, mientras que su nivel de emisión de perturbaciones debe ser lo suficientemente bajo como para no perturbar los aparatos situados en su entorno.

BLINDAJE ELECTROMAGNÉTICO

El blindaje electromagnético es una forma de eliminar las interferencias electromagnéticas. Se define como la estructura metálica colocada alrededor de un circuito o componente para suprimir un campo eléctrico o magnético dentro de la región circundada.

Importancia del Blindaje Electromagnético

Las perturbaciones electromagnéticas están comprendidas en un campo de frecuencias que abarcan desde las décimas de KHz hasta pocos MHz, penetrando en la zona en donde se encuentran ubicados los equipos e instrumentos, a través de techos, pisos, paredes y por los cables de energía eléctrica y todo tipo de tubería o ductos metálicos que no poseen un adecuado sistema de puesta a tierra y que actúan como antenas en el exterior de esta zona y como emisores en el interior de la misma.

Por consiguiente, resulta imprescindible realizar un proyecto de blindaje electromagnético adecuado en lugares en donde se instalan equipos sensitivos, destinados a captar señales y realizar pruebas de mucha validez en los procesos de investigación, control de calidad, comunicaciones, etc., que deben estar exentos a perturbaciones electromagnéticas.

Jaula de Faraday

Cuando se trata de blindar un recinto cerrado contra un campo eléctrico externo, la “Jaula de Faraday” representa un blindaje perfecto. Basta con que el material de construcción de la “Jaula de Faraday” sea un buen conductor eléctrico para que la estructura se convierta en una superficie equipotencial y el campo eléctrico en el interior de la misma es nula.

En presencia del campo electromagnético la situación se complica, ya que, bajo ciertas circunstancias, las ondas electromagnéticas pueden penetrar fácilmente en los recintos en donde no podría el campo electroestático.

Cuando una onda electromagnética se propaga a través de un material de buena conductividad eléctrica, las corrientes eléctricas inducidas en dicho material transforman la energía electromagnética de la onda en energía calorífica y, por consiguiente, la intensidad de campo electromagnético puede presentar una atenuación considerable conforme la onda va penetrando en el material. Puede demostrarse que en el caso de una onda plana que penetra en un buen

conductor, la intensidad de campo decrece, debido a las pérdidas denominadas de absorción, que corresponde a la ley exponencial que se muestra en la ecuación 2.2.2 :

$$e^{-\sqrt{f\mu\pi\sigma} * x} \quad (2.2.2)$$

Fuente: Balceca Celiano, *Diseño de la Jaula de Faraday y puesta a tierra del laboratorio de alta tensión de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL (ESPOL) Guayaquil Ecuador (1968)*

En donde la variable x representa el espacio recorrido por la onda electromagnética dentro del material conductor, f es la frecuencia de la onda, μ la permeabilidad magnética del material y σ su conductividad eléctrica.

Análisis de la ecuación (2.2.2)

De la expresión de pérdidas por absorción se deduce, que una alta permeabilidad (μ) del material conductor influye favorablemente para alcanzar una mayor atenuación, resultado que es fácil prever si se tiene en cuenta que, mientras más alta sea dicha permeabilidad magnética, más intensas serán las corrientes inducidas en el material y por lo tanto mayores las pérdidas por absorción.

La frecuencia de la onda (f) presenta un efecto análogo aumentando las pérdidas por absorción y por consiguiente, la atenuación del campo electromagnético, a medida que aumenta la frecuencia.

De esta manera, se puede notar que el blindaje electromagnético de cierto recinto puede consistir básicamente en un recubrimiento total formado de material ferromagnético (buen conductor y alta permeabilidad magnética).

Para bajas frecuencias (longitudes de onda mucho mayores que las dimensiones de las salas que se pretenden blindar), resulta práctico proyectar el blindaje a base de malla metálica en lugar

de lamina, ya que las corrientes inducidas debidas al campo magnético en la estructura metálica que forma el blindaje y que circulan alrededor del recinto blindado, pueden envolver a dicho recinto por los elementos que forman la malla de manera análoga a como circulan las corriente eléctricas por un solenoide, logrando una mayor atenuación.

De lo dicho anteriormente, se concluye que la Jaula de Faraday es un tipo de blindaje electromagnético que cumple con los siguientes cometidos:

- ▶ Evitar que las perturbaciones externas ingresen al interior de la región circundada.
- ▶ Proteger al personal de operación y a los visitantes que se encuentren en el exterior de la Jaula de Faraday del campo eléctrico producido en el interior de la misma.

Características ideales del diseño de una Jaula de Faraday

La Jaula de Faraday, es un blindaje electromagnético que se realiza mediante el uso de láminas o mallas metálicas.

El blindaje a través de láminas metálicas se realiza cubriendo toda el área a proteger con las mismas, unidas a través de soldaduras o utilizando uniones atornilladas. La atenuación lograda para cada frecuencia se presenta como una función de las dimensiones del recinto blindado, el espesor de la lámina y las propiedades eléctricas (conductividad) y magnéticas (permeabilidad) del material de dicha lamina.

Cuando se utilizan mallas metálicas para el blindado se deben recubrir con éstas, las paredes, techo y piso del recinto a blindar. Las mallas se unen unas a otras por soldadura o uniones entrelazadas de alambres de la misma, de tal forma que se garantice una buena conexión y continuidad. La atenuación lograda en este caso para cada frecuencia se presenta como una función de las dimensiones del recinto blindado, el calibre del alambre que forma la malla, el espaciamiento entre alambres y la conductividad eléctrica del material de la malla.

Otra opción es realizar el blindaje combinando lámina y mallas metálicas, debidamente unidas. En ese caso, se puede utilizar láminas para el blindaje de paredes, techo, piso y malla para el blindaje de las ventanas y puertas.

Al seleccionar el blindaje debe buscarse una combinación de material (lámina o malla de hierro, aluminio, cobre, etc.) y espesor utilizados que, juntos con los procedimientos de construcción, resulte en la solución más económica para obtener el nivel de atenuación requerido. Una vez decidida la configuración esencial del blindaje, aún deben atenderse una serie de detalles, que también son básicos para que el blindaje resulte eficaz.

Se debe asegurar que el blindaje recubra tanto las paredes, como el techo y el piso de la sala blindada, procurando la mejor unión eléctrica posible (preferentemente, por medio de soldadura).

Las puertas y ventanas también deben quedar recubiertas con el material del blindaje. Cuando el blindaje se construye con laminas metálicas las ventanas pueden quedar recubiertas con malla, procurando una buena unión eléctrica entre esta y la lámina. Las puertas deben quedar unidas con el blindaje general, por medio de arreglos de pletinas flexibles.

Toda la tubería y ductos metálicos que entran a la sala (tuberías de agua, gas, aire acondicionado, etc.), deben quedar unidos eléctricamente con el blindaje en los puntos de penetración.

Los cables de energía eléctrica que entran a la Jaula de Faraday, ya sea para iluminación o para alimentación de instrumentos, deben ir blindados por medio de malla coaxial o bien instalados en ductos. En cualquier caso, el blindaje de los cables debe quedar unido eléctricamente con el blindaje de la sala, por un extremo y con el blindaje de los instrumentos que alimentan, por el otro.

De la misma forma, deben quedar blindados los cables que salgan de la sala o interconecten diferentes salas entre si, con el objetivo de que los blindajes de la sala, los instrumentos y los cables formen una sola superficie cerrada. Los instrumentos o equipos deben estar unidos al blindaje de la sala por medio del blindaje de los cables que los alimenten.

Es conveniente que el blindaje de los cables de energía se prolongue también fuera de la sala, si es posible, hasta la misma toma de tierra principal de la instalación eléctrica. Los mismos ductos en que van elaborados normalmente los cables pueden servir para este propósito, si se procura que existan adecuadas uniones eléctricas en las conexiones de los diferentes tramos del tubo.

Los cables de tierra de la instalación eléctrica, deben quedar tendidos por el interior de los ductos en donde se encuentran canalizados los cables de energía.

El blindaje debe quedar conectado a tierra y para esto deben respetarse las siguientes reglas:

- ▶ El blindaje debe estar conectado a la misma tierra del circuito eléctrico que penetra en el interior del mismo.
- ▶ La conexión a tierra del blindaje y la del circuito eléctrico contenido en el interior del mismo, debe efectuarse en un punto común. Este punto debe estar situado lo más cerca posible a la toma de tierra principal de la instalación eléctrica y, a partir del mismo, el blindaje debe quedar aislado de los cables de tierra del circuito eléctrico.

CONSIDERACIONES APLICABLES AL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN

Mediciones extremadamente sensitivas son realizadas frecuentemente en laboratorios de alta tensión. Los componentes contruidos para alto voltaje (aisladores, descargadores de sobre tensión etc.) también pueden ser sometidos a mediciones de descarga parcial. El transformador de

pruebas, el capacitor de medida y los otros equipos requeridos para realizar dicha medición deben estar en una instalación apropiada, prácticamente libres de perturbaciones.

Las mediciones de descarga parcial, en particular, pueden ser perturbadas cuando el arreglo del circuito de alto voltaje se comporta como una antena logrando captar ondas electromagnéticas externas. Además, como resultado en los procesos de descargas disruptivas ocurridas en el objeto de prueba por medio del circuito de medición se producen ondas electromagnéticas de alta frecuencia que pueden causar perturbación en las transmisiones de radio, televisión y telecomunicaciones en los alrededores del área de pruebas del laboratorio.

Cuando se realizan mediciones de descargas parciales al objeto de prueba, el problema del ruido eléctrico externo es crítico. El ruido externo afecta directamente a la sensibilidad de las mediciones de descarga parcial haciendo que su nivel se mantenga bien abajo del nivel de los resultados de prueba esperados.

Se sabe que el ruido puede ser introducido dentro del circuito de pruebas, básicamente en cuatro formas distintas:

- ▶ Ruido que viaja a lo largo de conductores eléctricos (ruido conducido).
- ▶ Ruido introducido por acoplamiento capacitivo.
- ▶ Ruido introducido por acoplamiento inductivo.
- ▶ Radiación electromagnética (ruido radiado).

Una eliminación casi completa de interferencias mutuas entre la instalación de alta tensión y el medio ambiente con el fin de asegurar el apropiado funcionamiento de las mediciones de descarga parcial, y también, lo que es más importante, el prevenir riesgos a personas, instalaciones y aparatos, de la zona real de peligro del circuito de alto voltaje, se realiza usando un blindaje metálico continuo constituyendo una Jaula de Faraday. Además, una gran atenuación de los campos electromagnéticos por parte del blindaje, buena protección para evitar riesgos

personales y excelente visibilidad, se logran si se utiliza para el blindaje una malla conductora, suspendida sobre o dentro de las paredes de la Jaula de Faraday, además de la ventaja económica que significa el hacer el blindaje con malla que con hojas de metal. Cabe destacar, que es necesario que las mallas tengan solidez mecánica.

Un requerimiento técnico es que la Jaula de Faraday tenga una puerta de acceso al área de pruebas de alta y media tensión, la cual debe ser construida del mismo material del que se hizo el blindaje y, además, tener un enclavamiento de seguridad que evite la alimentación del área de pruebas si la puerta de entrada no esta bien cerrada.

CABLES DE POTENCIA

Los cables para media y alta tensión son siempre del tipo de “campo radial”, debido a que el diseño de pantallas en el conductor y el aislamiento, no permiten que existan componentes tangenciales del campo eléctrico, con el fin de evitar descargas superficiales. Los cables de potencia constan de los siguientes elementos: conductor, pantalla, aislante, componente semiconductor, componente metálica y chaqueta, los cuales se indican en la figura 28.

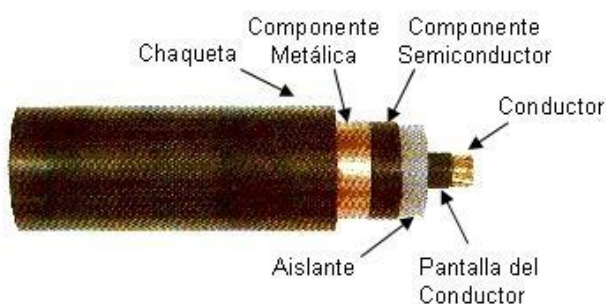


Fig. 28 Construcción de un cable de potencia.

Aislamiento en cables de potencia

Es el elemento encargado de soportar el voltaje aplicado al conductor central y es el directamente responsable de la vida útil del cable. En los cables de potencia, el aislamiento usado actualmente es a base de polímeros, los cuales, de acuerdo a su comportamiento frente al calor, se dividen en dos grupos:

- ▶ Termoplásticos: Son materiales que se ablandan con el calor, lo que permite moldearlos repetidas veces sin que pierdan sus propiedades plásticas. Entre estos se encuentran el PVC, el polietileno, el nylon y el polipropileno.
- ▶ Termofijos o termoestables: Son materiales que después de someterlos a la acción del calor para darles forma, no pueden ser moldeados nuevamente ni recuperados. En los cables de potencia, el material más empleado es el polietileno reticulado (XLPE), que se obtiene a partir del polietileno por procedimientos químicos que consiguen eliminar la condición termoplástica y mejorar las propiedades mecánicas, químicas, ambientales y de trabajo a mayores temperaturas; otros materiales de este tipo son el caucho- propileno-etileno (EPR) y el caucho vulcanizado (EPDM).

El aislamiento en un cable es más efectivo si su espesor es mayor. Esto lo define el nivel de aislamiento. Un cable con nivel de aislamiento 100 %, tiene aplicación en sistemas aterrizados provistos de protección, de modo que las fallas a tierra se clarifiquen en menos de un minuto; un cable con nivel de aislamiento 133 % se diseña para sistemas no aterrizados.

Pruebas del aislamiento

Para verificar la calidad del aislamiento de los cables de potencia se realizan una serie de pruebas, las cuales se pueden agrupar en:

- ▶ **Pruebas de rutina**: permiten el control de calidad de materiales que se emplean en la producción, para que pueda haber seguridad de que la calidad de los cables acabados esté dentro de las especificaciones estándar.

- ▶ **Pruebas de diagnóstico:** permiten determinar los requisitos del sistema de cables para poderlos cargar hasta sus límites, ayudando a prevenir salidas y suspensiones inesperadas, o se pueden usar con fines de mantenimiento.

Las pruebas más importantes que se le realizan a los cables son: pérdidas dieléctricas, rigidez dieléctrica, impulso, tensión aplicada, resistencia de aislamiento y descargas parciales.

DESCARGAS PARCIALES (DP'S)

Las descargas parciales son pequeños arcos, que involucran una porción del material cuando es energizado. En la fabricación de un aislante, cantidades diminutas de gas de baja rigidez dieléctrica quedan aprisionadas dentro del mismo constituyendo cavidades de forma y tamaño muy variado. Al energizar el material y como resultado de la diferencia de potencial a través de la cavidad, el esfuerzo en ella puede alcanzar el valor disruptivo del gas ahí encerrado, presentándose una descarga a través de las paredes opuestas y en la dirección del campo eléctrico. Estas descargas, que no puentean completamente los electrodos, se llaman “descargas parciales”. Aunque su magnitud y energía disipada son pequeñas, ellas ocasionan deterioro progresivo y pueden llevar a la falla total del material a largo plazo. Se distinguen cuatro tipos de descargas parciales:

- ▶ **Descargas internas (figura 29 (a)):** ocurren en oclusiones de baja rigidez dieléctrica, usualmente cavidades llenas de gas.
- ▶ **Descargas superficiales (figura 29 (b)):** se presentan cuando existe una componente del campo paralelo a una superficie dieléctrica, como en las terminaciones de cables.
- ▶ **Descargas corona (figura 29 (c)):** se presentan en los gases cerca de las puntas agudas donde la concentración del campo eléctrico es lo suficientemente alta para causar ruptura parcial del gas circundante.

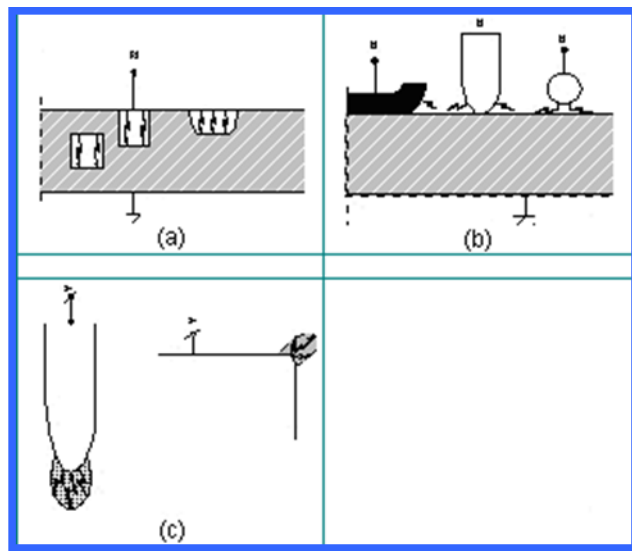


Fig. 29 Clasificación de las descargas parciales.

Secuencia de las Descargas Parciales

Según la figura 30, el alto voltaje a través del dieléctrico es V_a y el voltaje a través de la cavidad, V_c ; V_c' es el voltaje en la cavidad sino sufriera ruptura. Cuando V_c alcanza el valor de ruptura U^+ , se presenta una descarga en la cavidad. El voltaje entonces cae a V^+ donde la descarga se extingue. Después de esto, el proceso se repite varias veces hasta que V_a llega a su valor pico, y V_c cae ahora a U^- antes de que ocurra una nueva descarga, debido a que el campo eléctrico principal y el campo de las cargas superficiales en las paredes de la cavidad que quedaron después de la última descarga se contrarrestan. Las descargas en la cavidad ocasionan impulsos de corriente en los terminales de la muestra, como se observa en la figura 31, que se concentran en las regiones donde el voltaje aplicado pasa por cero. Cuando ocurre una descarga en una cavidad de un cable, la carga de la misma se divide por la mitad y ambos pulsos viajan en direcciones opuestas sufriendo distorsión en magnitud y forma (más no en su área), y reflejándose en un terminal abierto. El circuito equivalente de un cable bajo estas condiciones se muestra en la figura 30 (a), donde C_c , C_b y C_a son las capacitancias de la cavidad, del aislamiento en serie con la misma y del aislamiento sano, respectivamente. Normalmente

$C_b \ll C_c \ll C_a$ y C_a es aproximadamente igual a la capacitancia del cable. Si el cable es muy largo, C_a se cambia por su impedancia característica, como se muestra en la figura 30 (b).

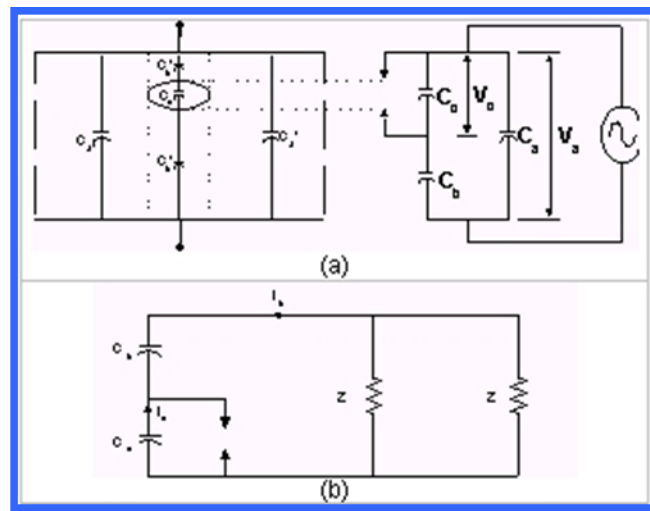


Fig. 30 Circuito equivalente de un cable con DP's

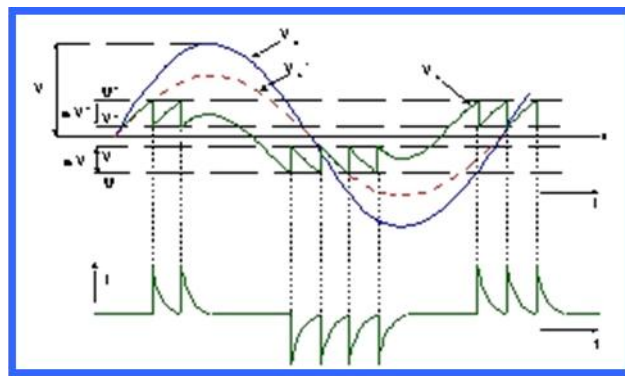


Fig. 31 Secuencia de las descargas parciales.

Equipo para la detección eléctrica de DP's

El objetivo fundamental de la evaluación de descargas es comprobar en una prueba no destructiva, si el aislamiento tiene una expectativa de vida suficiente.

Es posible medir la carga eléctrica causada por la descarga de la cavidad, debido a que generan impulsos de voltaje repetitivos de alta frecuencia que pueden ser descubiertos por un amplificador electrónico de características adecuadas. Para pruebas de equipo de media tensión con elevadas capacidades, se utiliza un circuito resonante paralelo, con el fin de reducir drásticamente la potencia reactiva exigida al circuito de alimentación. El funcionamiento de este equipo está basado en la compensación de la carga capacitiva, mediante un reactor cuya inductancia puede ajustarse entre límites prefijados como muestra la figura 32.

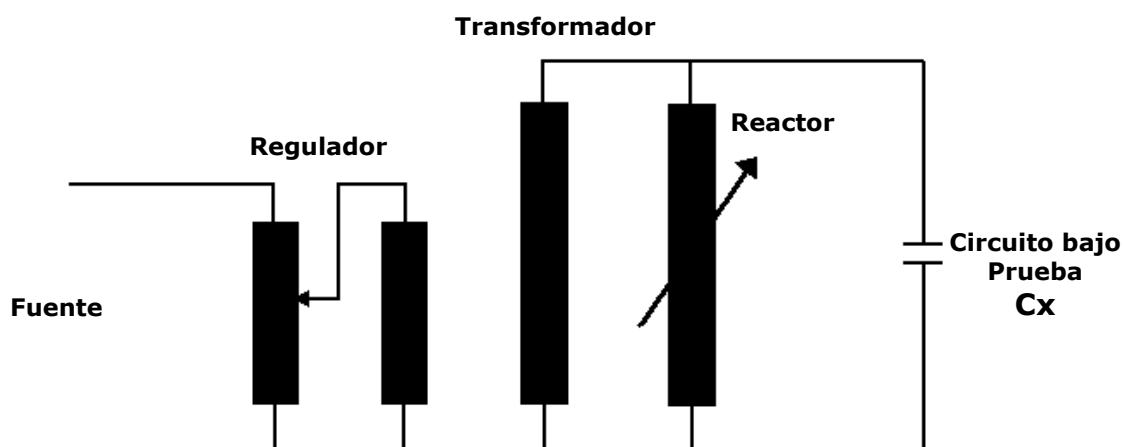


Fig. 32 Circuito resonante paralelo

Aquí el objeto bajo prueba C_x está conectado al punto de tierra del sistema. El circuito consta básicamente de los siguientes elementos:

- ▶ **Transformador de aislamiento:** filtra los disturbios de la red externa entregando una onda completamente sinusoidal.
- ▶ **Variac:** permite una variación muy fina del voltaje aplicado al primario del transformador elevador.
- ▶ **Transformador elevador:** suministra la tensión de prueba al circuito de medición. Incluye el reactor variable de puesta en resonancia.

- ▶ **Filtro de alto voltaje Z:** bloquea las señales de alta frecuencia en ambos sentidos, de la fuente hacia el circuito de medición (interferencia) y del circuito de medición a la fuente (señales de las descargas parciales).
- ▶ **Divisor de voltaje capacitivo / condensador de acople Ck:** ofrece un camino de baja impedancia a las señales de descargas parciales hacia el circuito de detección. Además, permite llevar la señal de voltaje de prueba hasta los equipos de medida.
- ▶ **Impedancia de medición Zm:** obtiene un valor de tensión para llevarlo al elemento detector.
- ▶ **Objeto (cable) de Prueba Cx:** representa una capacitancia que se debe tener en cuenta al llevar el sistema a resonancia. Sus terminales se conectan al circuito a través de vasos aislados en aceite con el fin de evitar descargas superficiales.
- ▶ **Consola de control:** incluye los controles encargados de la aplicación del voltaje de prueba y de la puesta en resonancia.
- ▶ **Equipo detector:** transforma y amplifica los pulsos de descargas detectados y muestra los resultados en un osciloscopio y un registrador X – Y (pC vs. kV de prueba).

Todos los elementos antes mencionados, se muestran en la figura 33, y se encuentran apantallados dentro de una Jaula de Faraday, que se observa en la figura 34, con el fin de aislar los disturbios electromagnéticos externos.

Los equipos van conectados a tierra en un sólo punto común, con el fin de evitar mallas de tierra que generan perturbaciones.

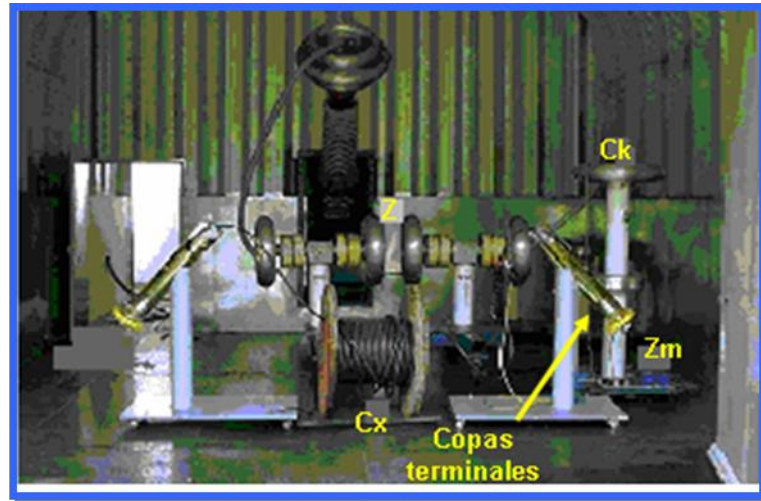


Fig. 33 Elementos del circuito de medición.



Fig. 34 Jaula de Faraday

Cuando se presenta una descarga parcial en el cable de prueba, se produce un desplazamiento de carga hacia tierra proveniente del voltaje almacenado en C_k , generándose pulsos de corriente a alta frecuencia; la impedancia Z evita que estos pulsos vayan a la fuente y hace que circulen por la bucla formada por C_k , Z_m y C_x ; Z_m lleva estos pulsos hacia el detector en donde se visualizan.

Los pulsos de corriente de alta frecuencia de las descargas se magnifican y superponen sobre la señal de prueba sinusoidal de 60 Hz para visualizarlas en un osciloscopio. Dependiendo del ángulo y la forma de los pulsos sobre la onda de prueba, se puede obtener una interpretación del tipo de las descargas. Entonces, combinando la escala cíclica de tiempo con una medida proporcional a las descargas, se forma una elipse cuya parte superior representa la parte negativa de la onda seno, y la inferior, la parte positiva, como se muestra en la figura 35.

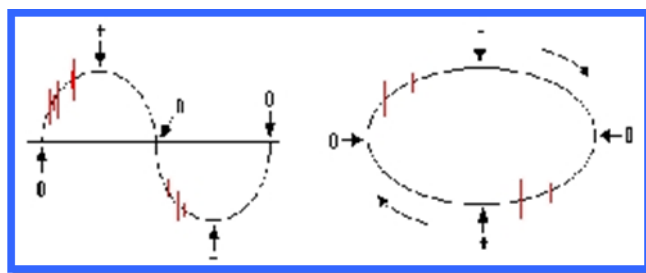


Fig. 35 Equivalencia de la onda de voltaje de prueba y la elipse del osciloscopio.

La calibración del circuito de detección es simple; consiste en aplicar una carga conocida a la muestra, que será simulada por un escalón. Así, la magnitud de la descarga puede determinarse superponiendo este pulso a la señal del osciloscopio y comparándolo con los pulsos detectados de descarga. Puede realizarse internamente aplicando el pulso de calibración por medio de la impedancia de medición (Z_m) o externamente a través del cable de prueba.

Evaluación de las DP's

Existen varios medios de ayuda para determinar el tipo de descarga que se presenta, entre éstos se tienen:

- **Oscilograma:** Los patrones de descarga que se observan en un osciloscopio dan una indicación del tipo y origen de las descargas. Por ejemplo, en la figura 36 (a) se tiene un patrón que corresponde a descargas internas en el material aislante. En él, los pulsos en

ambos semiciclos son simétricos en ubicación y magnitud; en la figura 36 (b) se tiene un patrón de descargas internas en la frontera con un electrodo, ya que se observan que los pulsos en los dos semiciclos difieren en magnitud y número.

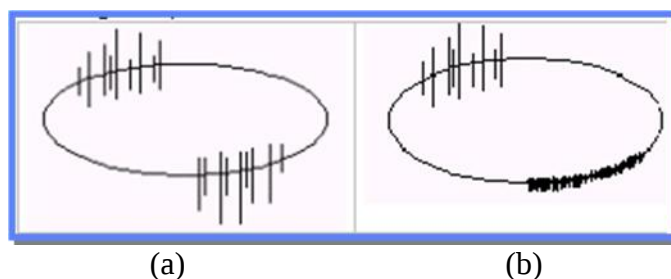


Fig. 36 Ejemplos de oscilogramas.

- **Diagrama X – Y:** La magnitud de la descarga parcial se registra como función del voltaje de prueba. Es útil para evaluar los voltajes de iniciación y extinción de las descargas. En la figura 37 se muestra un ejemplo de un diagrama X – Y correspondiente a descargas internas en el aislamiento.

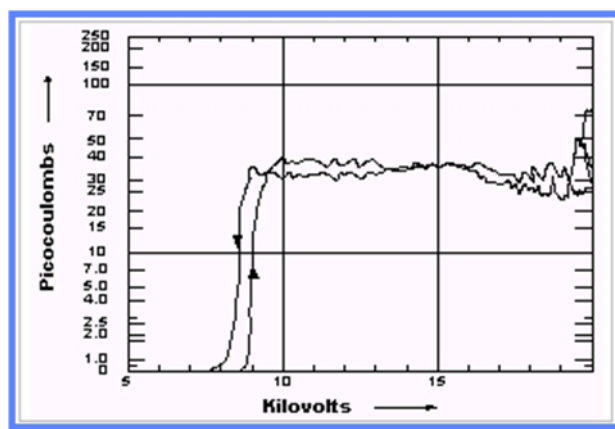


Fig. 37 Ejemplo de un diagrama X – Y

En muchos casos, dos descargas de diferente tipo pueden presentar iguales oscilogramas, pero se diferencian en su diagrama X-Y, esto es resultado de que en algunos casos la magnitud de la

descarga y el voltaje de extinción cambian con el tiempo de aplicación del voltaje (efecto del tiempo), además del carácter o la ubicación de la descarga (ambiente) lo que puede determinar cambios en torno a la muestra.

SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

Los sistemas de puesta a tierra proveen un camino de baja impedancia para el retorno de la corriente de carga (o falla) a su fuente de poder. El camino puede no ser el camino intencional, y puede haber más de un camino o existir caminos alternos no evidentes.

En general, existen diversos sistemas de puesta a tierra en una misma instalación o planta, con características y requerimientos diferentes, siendo los más frecuentes la puesta a tierra para equipos de fuerza, la puesta a tierra para descargas atmosféricas y la puesta a tierra de instrumentos, equipos electrónicos y computadoras. A continuación se indican las características principales y los criterios fundamentales de estos sistemas.

Puesta a Tierra del Sistema de Potencia

La puesta a tierra para el sistema de potencia provee dos caminos de retorno a la fuente, uno intencional como el neutro y otro no intencional, como la conexión de masa a tierra de los equipos de fuerza, como lo muestra la figura 38. Los mismos deben manejar altas corrientes pero a baja frecuencia, 60 HZ. El neutro debe manejar esta corriente todo el tiempo mientras la carga es alimentada por lo que se debe considerar y/o manejar como otro conductor vivo del sistema de alimentación. La conexión masa a tierra sólo debe manejar corriente durante una falla o cortocircuito a tierra accidental y no debe ser utilizada para alimentar cargas. Estas fallas pueden durar desde milisegundos hasta permanente, dependiendo de la amplitud de la corriente. Para evitar circulación de corrientes de carga por el conductor de masa a tierra, el neutro se conecta a tierra sólo en el tablero de distribución o transformador.

Los criterios fundamentales en la puesta a tierra de potencia son mantener baja resistencia y proveer suficiente capacidad de corriente para los niveles de falla.

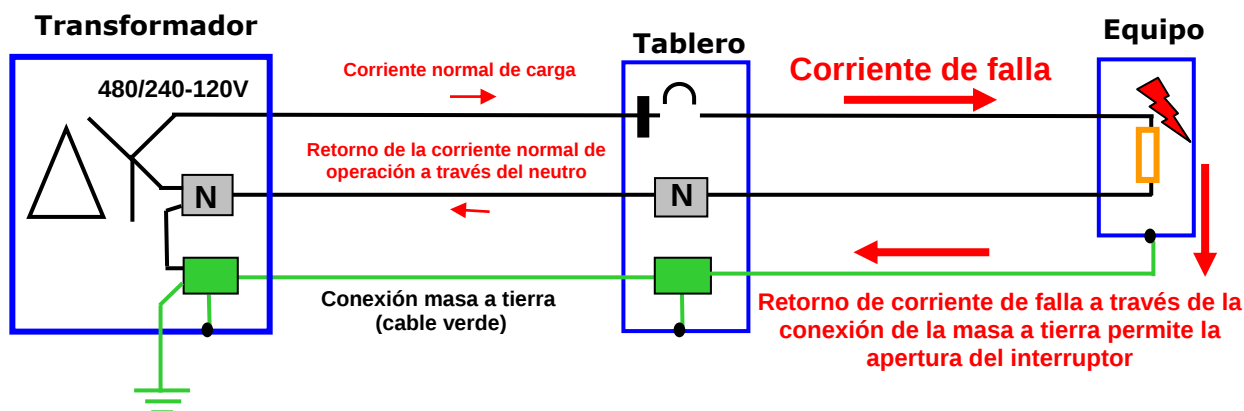


Fig. 38 Puesta a tierra del sistema de potencia.

Puesta a tierra de equipos electrónicos, instrumentos y computadoras

La puesta a tierra de equipos electrónicos, instrumentos y computadoras provee un camino de retorno para las corrientes de potencia y/o señal, en caso de utilizar un sistema de referencia puesto a tierra para las señales de bajo nivel (conexión a tierra del terminal negativo o positivo de la fuente de poder). Este camino debe manejar pequeñas corrientes desde miliamperios a Amperios, a frecuencias desde DC a KHZ (señales analógicas) o MHZ/GHZ (señales digitales).

Algunos equipo electrónicos, por diseño, se comunican con otros equipos a través de los cables de datos. La figura 39 muestra como frecuentemente estos cables de datos llevan sus propios conductores de referencia los cuales pueden estar conectados a la misma puesta a tierra de seguridad del equipo, formando lazos y, por consiguiente, voltajes indeseables o ruido.

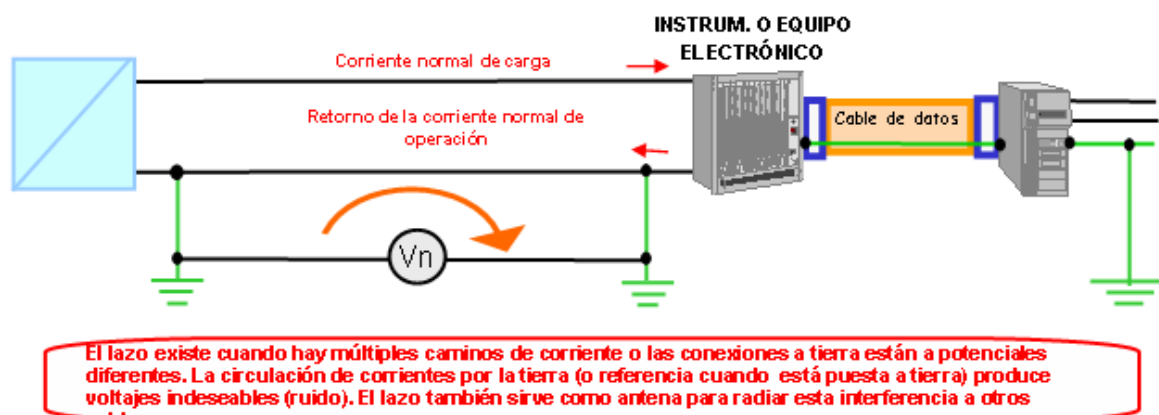


Fig. 39 Ejemplo de lazo de tierra causado con la puesta a tierra de equipos electrónicos

Los criterios fundamentales en la puesta a tierra de equipos electrónicos o sensitivos, cuando un terminal de la fuente de referencia está puesto a tierra, son eliminar lazos de tierra susceptibles a campos magnéticos y a diferencias de potencial en la tierra, y mantener baja resistencia e inductancia a fin de minimizar las tensiones producidas (ruido) al circular corriente en el sistema de puesta a tierra.

Interconexión de Sistemas de Puesta a Tierra

Todos los sistemas de puesta a tierra indicados en los puntos anteriores y cualquier otro no mencionado, deben estar interconectados entre sí. Cuando ocurre una descarga atmosférica, la corriente que fluye hacia la tierra produce una elevada tensión en el punto de drenaje (es decir, en el sistema de puesta a tierra para descargas atmosféricas), con relación a la tierra remota o la tierra separada; ésta es la razón por la cual parte de la corriente de la descarga atmosférica fluye hacia la tierra remota o separada a través de las partes conductivas (cables de datos o potencia, tuberías, pantallas, etc.). El flujo de esta corriente en las pantallas de los cables genera una tensión entre los conductores internos y la pantalla, lo cual causa daños catastróficos en los equipos conectados al sistema de puesta a tierra separada, como muestra la figura 40.

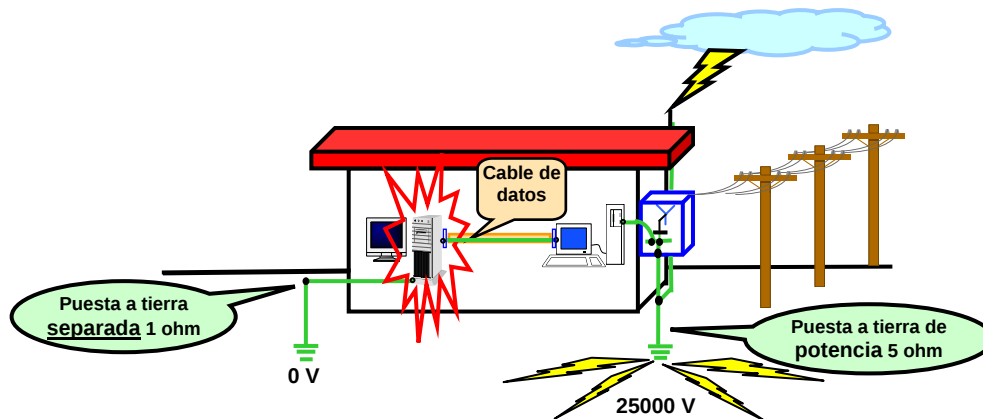


Fig. 40. Daños en equipos electrónicos cuando hay sistemas de puesta a tierra separados.

PROPÓSITOS DE LA PUESTA A TIERRA

En cualquier tipo de equipo o sistema, la puesta a tierra tiene dos propósitos básicos:

- **Referencia de voltaje:** la puesta a tierra de una parte del sistema de potencia provee una referencia de voltaje contra la cual otros circuitos son comparados. *No siempre se conecta a la tierra.*
- **Seguridad:** la conexión a tierra de las partes metálicas, chasis y carcasas de equipos, armadura y pantallas de cables, tuberías y canales porta cables, evita la presencia de tensiones peligrosas en partes accesibles del equipo o instalación que puedan poner en peligro la seguridad del personal, como muestra la figura 41. *Siempre se conecta a la tierra.*

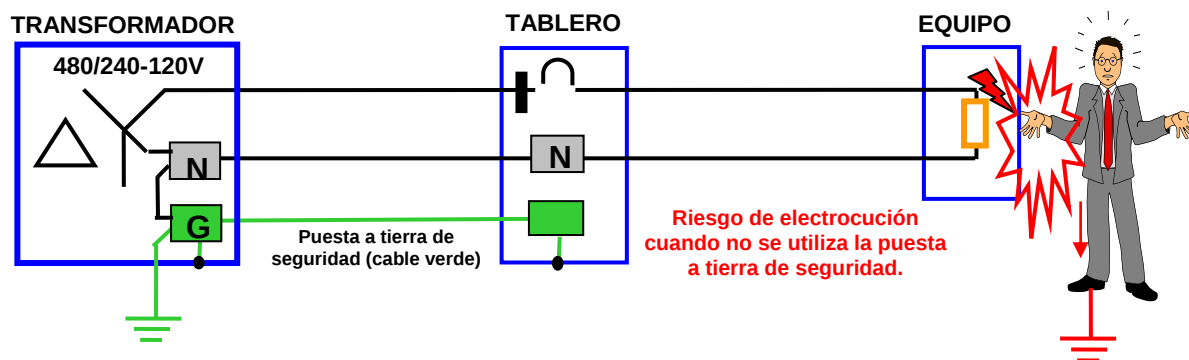


Fig. 41 Riesgo a las personas cuando **NO** se utiliza la puesta a tierra de seguridad

SISTEMA DE REFERENCIA DE VOLTAJE

Hay dos tipos de sistemas de referencia de voltaje, dependiendo de la conexión a tierra de la fuente de alimentación o fuente de poder:

- ▶ Sistema de referencia flotante
- ▶ Sistema de referencia puesto a tierra

Sistema de referencia flotante

Cuando los equipos electrónicos son alimentados por un sistema de referencia DC flotante, la referencia, común o camino de retorno está completamente aislado de la tierra (no se conecta a tierra en ningún punto). Esto permite eliminar lazos de tierra y aislar la referencia de la señal de interferencias electromagnéticas, corrientes y tensiones parásitas (o ruido) en la tierra y de dispositivos ruidosos tales como motores y relés. A altas frecuencias se degrada este aislamiento debido al acoplamiento capacitivo, por lo que frecuentemente se utilizan opto-aisladores y transformadores de aislamiento entre los diversos equipos electrónicos, tal como se muestra en la figura 42.

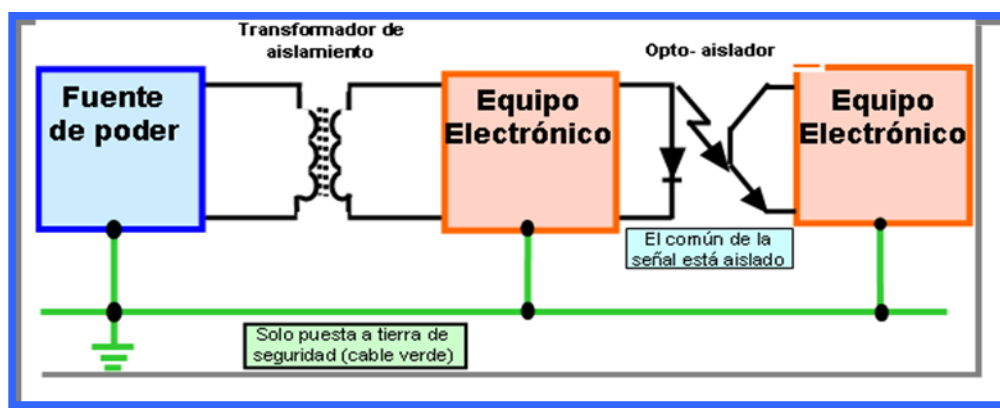


Fig. 42 Sistema de referencia flotante

En este sistema sólo se requiere la puesta a tierra de seguridad. En ninguna circunstancia se debe dejar flotante el chasis del equipo electrónico, primero debido a la seguridad del personal y segundo, en condiciones de descargas atmosféricas o fallas a tierra en el sistema de potencia existirá una diferencia de potencial que puede causar daños severos en los equipos electrónicos con chasis flotante.

Sistema de referencia conectado al sistema de puesta a tierra

Cuando los equipos electrónicos son alimentados por un sistema de referencia puesto a tierra, el común o referencia o camino de retorno (terminal positivo o negativo) está puesto a tierra en la fuente de alimentación, como muestra la figura 43. A diferencia del sistema flotante, el sistema de referencia puesto a tierra es susceptible al flujo de corrientes que entran al sistema de puesta a tierra en cada conexión de la referencia a tierra o lazo del común. Estas corrientes causan voltajes (ruido en la tierra) que pueden afectar la operación del equipo electrónico. También se requiere la puesta a tierra de seguridad.

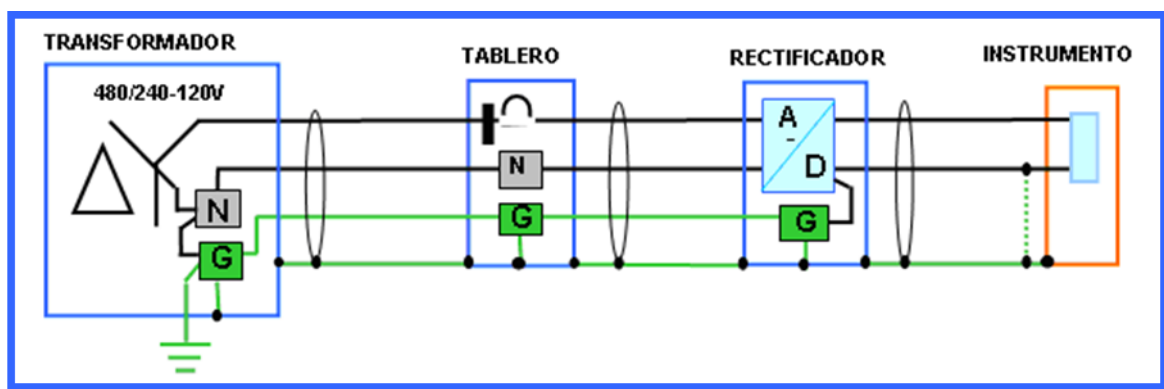


Fig. 43 Sistema de referencia puesto a tierra

PUESTA A TIERRA DE SEGURIDAD

La puesta a tierra de seguridad consiste en la conexión al electrodo de puesta a tierra del sistema de potencia de todas las partes metálicas no conductoras de corriente (tales como chasis, conduits, armaduras y pantallas de cables, *racks*, carcasas, canales y bandejas porta cables, conectores, etc.), que pueden entrar en contacto accidental con partes energizadas. Los conductores de puesta a tierra deben proveer suficiente capacidad y baja impedancia para las corrientes de falla, a fin de evitar tensiones de toque y paso superiores a lo permitido por normas y daños a equipos, en caso de descargas atmosféricas y fallas a tierra del sistema eléctrico, así como permitir la operación adecuada de los dispositivos de protección de sobrecorriente.

Para la puesta a tierra de seguridad se utiliza un conductor suplementario aislado, color verde según el CEN, tendido con los conductores de fase y neutro y en paralelo con el *conduit*, armadura o canal porta cable. El propósito de este conductor es aumentar la efectividad del sistema de puesta a tierra, ya que dicho conductor permite la circulación de corriente a tierra cuando las conexiones metálicas (entre conduits, armaduras, chasis, tableros, cajas de conexión, etc.) no son efectivas o adecuadas o presentan alta impedancia. De no estar disponible este conductor de puesta a tierra las corrientes, que en un momento dado circulan por las superficies metálicas puestas a tierra, toman caminos no deseados, tales como a través de los equipos electrónicos y los cables de datos o comunicación que los interconectan.

La frecuencia de los pulsos de corriente o tensión presentes en la tierra en un momento dado determina el comportamiento del sistema de puesta a tierra. A baja frecuencia, la baja resistencia e impedancia inductiva permiten igualar potenciales entre partes puestas a tierra. A altas frecuencias (como en el caso de las descargas atmosféricas), la impedancia inductiva es mucho mayor que la impedancia resistiva lo cual no permite igualar potenciales entre partes puestas a tierra. Por lo anterior, la puesta a tierra de seguridad debe ser diseñada para condiciones de alta frecuencia de las descargas atmosféricas.

MÉTODOS DE PUESTA A TIERRA

Puesta a tierra en un sólo punto

Este método consiste en conectar a tierra los conductores de puesta a tierra (referencia o común y/o puesta a tierra de seguridad) en un punto único. Frecuentemente, se ha interpretado erróneamente este punto como una barra aislada, la cual se conecta a un electrodo de tierra aislado o separado del sistema de puesta a tierra de potencia. El propósito de este método es eliminar lazos de tierra que producen corrientes y tensiones indeseables o ruido mediante la conexión a tierra en un sólo punto. Es efectivo en telecomunicaciones y señales analógicas de baja frecuencia, menor a 300 KHZ, sensibles al ruido. No es realizable para señales de alta frecuencia debido al acoplamiento capacitivo entre partes metálicas el cual termina formando lazos de tierra a través de caminos no intencionales, como el equipo electrónico o cables de datos, perdiéndose la efectividad de la puesta a tierra en un sólo punto, como se muestra en la figura 44.

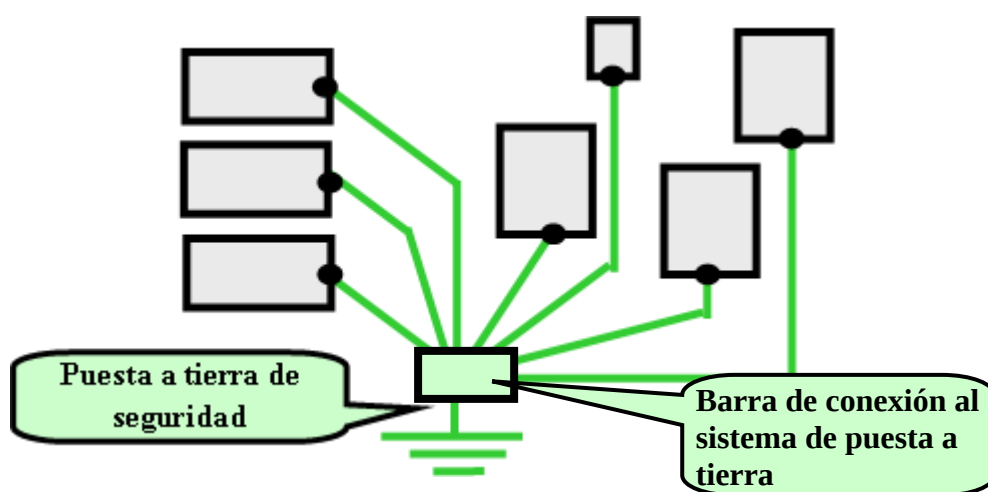


Fig. 44 Sistema de referencia puesto a tierra en un sólo punto.

En caso de conexiones y/o terminaciones inadecuadas o de alta impedancia del conductor de puesta a tierra aislada, las corrientes que circulan por las superficies puestas a tierra toman otros caminos no deseados, tales como a través del equipo electrónico y los cables de datos asociados,

en lugar del conductor de puesta a tierra aislada. A medida que aumenta la longitud del conductor de puesta a tierra aislada, aumenta la reactancia inductiva y por ende, las diferencias de potencial entre el equipo electrónico (con puesta a tierra aislada) y otros objetos puestos a tierra lo cual puede causar daños severos en los componentes electrónicos en caso de descargas atmosféricas y fallas a tierra del sistema eléctrico.

La efectividad y propósito de la tierra aislada se pierde cuando dentro de un mismo equipo existen otras conexiones (intencionales o no) a partes puestas a tierra no aislada o de seguridad, tales como en el caso de cables de datos con pantallas puestas a tierra y chasis conectado a racks o gabinetes puestos a tierra de seguridad. Un ejemplo de ambas conexiones a tierra dentro de un mismo equipo se muestra en la figura 45.

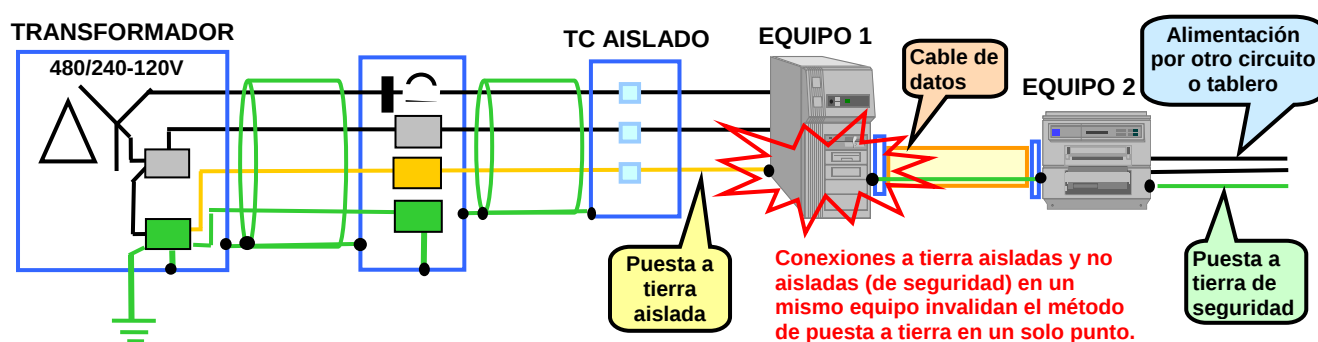


Fig. 45 Puesta a tierra aislada y de seguridad en un mismo equipo

Puesta a tierra en múltiples puntos

Este método consiste en conectar los conductores de puesta a tierra de seguridad y referencia o común (en caso de sistemas de referencia puesto a tierra) en múltiples puntos, a una estructura metálica tipo malla la cual se denomina GRS (Ground Reference Structure) o SRS (Signal Reference Structure) cuando la referencia de la señal se conecta a tierra como se observa en la figura 46. El propósito de este método es reducir diferencias de potencial entre equipos o partes puestas a tierra para un rango amplio de frecuencias. Al reducir diferencias de potencial entre partes puestas a tierra de un sistema, se reduce la posibilidad de lazos de tierra. Este esquema

requiere que todos los objetos metálicos que interceptan al GRS estén efectivamente conectados al mismo (estructuras metálicas, chasis de equipos, armaduras, pantallas de cables, cajas de conexión, etc.), a fin de obtener un plano único de referencia de tierra. El diseño adecuado de la malla o GRS permite obtener un camino de baja impedancia para altas frecuencias. Adicionalmente, minimiza la ocurrencia de descargas laterales en caso de descargas atmosféricas.

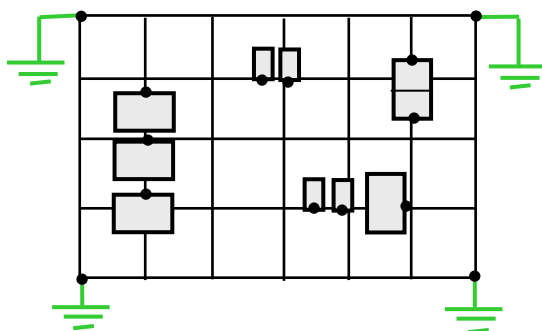


Fig. 46 Puesta a tierra en múltiples puntos

RESISTIVIDAD Y TIPO DE TERRENO

De acuerdo a procedimientos físicos establecidos, la resistencia ohmica es posible determinarla teóricamente, por medio de la formula 2.2.3:

$$R = R_o * l / A \quad (2.2.3)$$

En donde:

R: Resistencia

R_o: Resistividad

l: Longitud

A: Área

Sin embargo, para el caso de medir la resistencia del terreno de un sistema, no es posible aplicar directamente esta expresión, debido a que la resistividad del suelo no es uniforme y tiene múltiples variantes de acuerdo a las capas heterogéneas que lo componen.

La resistividad de la tierra en su conjunto puede variar entre 20 ohm-m hasta 20.000 ohm-m dependiendo de las características propias del terreno. Debido a esto, las mediciones de la resistividad del terreno se realizan mediante la utilización de un instrumento diseñado especialmente para tal efecto, llamado "Telurómetro".

Este instrumento, tiene un rango de medición de 0,1 a 999 ohm y consta de 4 estacas de acero de 25 cm de largo y 2 cm de diámetro, las cuales son enterradas directamente al suelo y conectadas al instrumento a través de cables de cobre de 2mm de diámetro y 20m de largo.

En la resistividad del terreno influyen varios factores que pueden variarla, entre los más importantes se encuentran: naturaleza del terreno, humedad, temperatura, salinidad, estratigrafía, compactación y las variaciones estacionales.

Uno de los factores más importantes que afecta la impedancia del sistema de tierra es la impedancia del medio en el cual está situado el electrodo, es decir, el terreno. La resistividad del terreno se expresa en [ohm-metro]. Algunos valores típicos se indican en la tabla I.

Tabla I.

Valores típicos de resistividad de algunos terrenos

Tipo de terreno	Resistividad (ohm-metro)	
	DESDE	HASTA
Agua de mar	0.1	1
Tierra vegetal/arcilla húmeda	5	50
Arcilla, arena y grava	40	250
Creta (tiza) porosa	30	100
Piedra caliza cristalina	300	400
Roca	1000	10000
Roca ígnea	2000	
Concreto seco	2000	10000
Concreto húmedo	30	100
Hielo	10000	100000

Fuente: Traducido de IEEE, Std. 142-1991

Los dos factores principales que afectan el valor de resistividad del suelo son la porosidad del material y el contenido de agua. “Porosidad” es un término que describe el tamaño y número de huecos dentro del material, lo cual está relacionado con el tamaño de sus partículas y diámetro del poro. Varía entre 80-90% en el sedimento de lagos, hasta 30 - 40% en el caso de arena y arcilla no consolidada y, menos de eso, en piedra caliza consolidada.

Es muy poco frecuente encontrar terreno que puede describirse como terreno uniforme para propósitos de puesta a tierra. Se utiliza el terreno hasta una cierta profundidad, que corresponde a aquella hasta la cual pueden fluir las corrientes de falla a tierra. Puede ser una delgada capa de terreno superficial, si hay capas de rocas más abajo. Si un electrodo se instala en la superficie, entonces la distancia, espesor y resistividad real de cada una de las capas serán factores importantes que afectan el valor de su resistencia a tierra.

La temperatura y el contenido de agua tienen una influencia importante en la resistividad del terreno y luego en el comportamiento del sistema de tierra. Un incremento en el contenido de agua provoca una reducción drástica de la resistividad, hasta alcanzar un 20% del nivel original, cuando el efecto tiende a estabilizarse. Minerales y sales disueltas en el agua pueden ayudar a reducir aún más la resistividad, particularmente cuando éstas están produciéndose en forma natural y no terminan diluyéndose en el tiempo. El contenido de agua varía estacionalmente y es probable que origine variaciones en la impedancia del sistema de tierra.

Medición de la resistividad del suelo

La resistividad del terreno se mide fundamentalmente para encontrar la profundidad y grueso de la roca en estudios geofísicos así como para encontrar los puntos óptimos para localizar la red de tierras de una subestación, sistema electrónico, planta generadora o transmisora de radiofrecuencia. Asimismo, puede ser empleada para indicar el grado de corrosión de tuberías subterráneas. En general, los lugares con resistividad baja tienden a incrementar la corrosión.

En este punto es necesario aclarar que la medición de la resistividad del terreno no es requisito para hacer una malla de puesta a tierra. Aunque para diseñar un sistema de tierras de gran tamaño es aconsejable encontrar el área de más baja resistividad para lograr la instalación más económica. El perfil de la resistividad del suelo determinará el valor de la resistencia a tierra y la profundidad de nuestro sistema de puesta a tierra.

Para medir la resistividad del suelo se requiere de un telurómetro que se muestra en la figura 47 (llamado en otros países: terrómetro) o *Megger* de tierras de cuatro terminales.



Fig. 47 Megger de Cuatro Terminales. Cortesía AVO International.

Los aparatos de mayor uso, de acuerdo a su principio de operación, pueden ser de dos tipos: del tipo de compensación de equilibrio en cero y el de lectura directa.

Los telurómetros deben inyectar una corriente de frecuencia que no sea de 60 Hz, para evitar que se midan voltajes y corrientes que no se deban al aparato sino a ruidos eléctricos. Por ejemplo, si estamos cerca de una subestación o de una línea en servicio y vamos a realizar mediciones de resistividad y resistencia de tierra, con un aparato de 60 Hz, dichos sistemas van a inducir corrientes por el suelo debido a los campos electromagnéticos de 60 Hz y darán una lectura errónea.

De igual manera sucede cuando los electrodos de prueba están mal conectados o tienen falsos contactos, darán señales falsas de corriente y voltaje. Si hay corrientes distintas a las que envió el aparato, éste leerá otras señales de voltaje y corriente que no son las adecuadas.

También, estos aparatos pudiesen tener oscilaciones en sus lecturas y no es posible leerlas. Un aparato de mayor tecnología, lleva conductores blindados, coaxiales, tiene sistemas de filtraje, de análisis y mide lo que detecta, pero esa información la analiza, la filtra y luego la deduce. Por ejemplo, para hacer una medición, manda una señal de 100 Hz y mide; luego manda otra señal de 150 Hz y vuelve a medir y puede seguir enviando otras altas frecuencias hasta que los valores van siendo similares, forma una estadística y obtiene un promedio.

Los telurómetros son analógicos o digitales y deben contener cuatro carretes de cable calibre #14 AWG normalmente. Para enrollamiento rápido se recomienda construir un sistema devanador que permita reducir el tiempo de la medición. También traen cuatro electrodos de material con la dureza suficiente para ser enterrados en la tierra. Son de una longitud aproximada de 60 cm y un diámetro de 16 mm. Además de lo anterior, se hace necesario contar con una cinta no metálica de 50 m aproximadamente.

Los telurómetros tienen cuatro terminales, dos de corriente (C1, C2) y dos de potencial (P1, P2) y están numerados en el aparato C1 P1 P2 C2. Deben estar certificados y probados en el campo con una resistencia antes de realizar las mediciones.

Como la medición obtenida por un telurómetro es puntual se deben hacer mediciones en un sentido, en otro a 90 grados del primero, y, en el sentido de las diagonales. En la medición de resistividad de un terreno, es común encontrar valores muy dispares, causados por la geología del terreno, por lo que es una práctica común de una tabla con lecturas, el eliminar los valores que estén 50% arriba o abajo del promedio aritmético de todos los valores capturados.

Método de Wenner

En 1915, el Dr. Frank Wenner del "U.S. Bureau of Standards", desarrolló la teoría de este método de prueba, y la ecuación que lleva su nombre.

Con objeto de medir la resistividad del suelo se hace necesario insertar los cuatro electrodos en el suelo. Se colocan en línea recta y a una misma profundidad de penetración, las mediciones de resistividad dependerán de la distancia entre electrodos y de la resistividad del terreno y, por el contrario, no dependen en forma apreciable del tamaño y del material de los electrodos, aunque sí dependen de la clase de contacto que se haga con la tierra.

El principio básico de este método es la inyección de una corriente directa o de baja frecuencia a través de la tierra entre dos electrodos C1 y C2 mientras que el potencial que aparece se mide entre dos electrodos P1 y P2. Estos electrodos están enterrados en línea recta y a igual separación entre ellos. La razón V/I es conocida como “la resistencia aparente”. La resistividad aparente del terreno es una función de esta resistencia y de la geometría del electrodo. En la figura 48, se observa esquemáticamente la disposición de los electrodos, en donde la corriente se inyecta a través de los electrodos exteriores y el potencial se mide a través de los electrodos interiores.

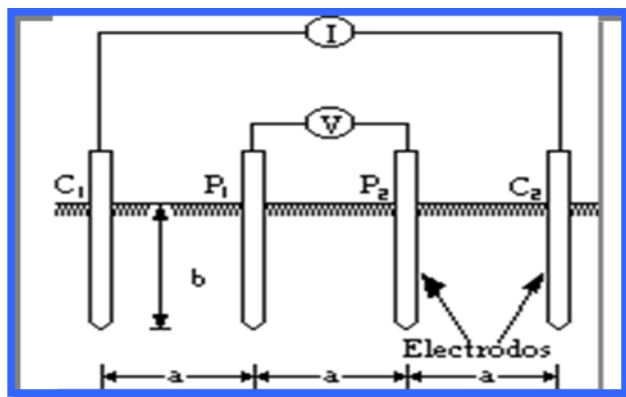


Fig. 48 Disposición de los electrodos en configuración de Wenner.

La resistividad aparente está dada por la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R}{\left\{ 1 + \left[\frac{2 \cdot a}{\sqrt{a^2 + 4 \cdot b^2}} \right] - \frac{2 \cdot a}{\sqrt{4 \cdot a^2 + 4 \cdot b^2}} \right\}} \quad (2.2.4)$$

Donde:

ρ : Resistividad promedio a la profundidad (A) en ohm-m

a: Distancia entre electrodos en metros

b: Profundidad de enterrado de los electrodos en metros

R: Lectura del telurómetro en ohm

Si la profundidad (b) es pequeña comparada con la distancia de separación entre electrodos (a). O sea $a > 20.b$, la fórmula 2.2.5 simplificada se puede aplicar:

$$\rho = 2.\pi.a.R \quad (2.2.5)$$

La resistividad obtenida como resultado de las ecuaciones representa la resistividad promedio de un hemisferio de terreno de un radio igual a la separación de los electrodos.

Como ejemplo, si la distancia entre electrodos (a) es de 3 metros, b es 0.15 m y la lectura del instrumento es de 0.43 ohm, la resistividad promedio del terreno a una profundidad de 3 metros, es de 8.141 ohm-m según la fórmula completa y de 8.105 ohms-m según la fórmula simplificada.

Se recomienda que se tomen lecturas en diferentes lugares y a 90 grados unas de otras para que no sean afectadas por estructuras metálicas subterráneas y que con ellas se obtenga el valor promedio.

Método de Schlumberger

El método de Schlumberger es una modificación del método de Wenner, ya que también emplea cuatro electrodos, pero en este caso la separación entre los electrodos centrales o de potencial (a) se mantiene constante, y las mediciones se realizan variando la distancia de los electrodos exteriores a partir de los electrodos interiores, a distancia múltiplos (n.a) de la separación base de los electrodos internos (a).

La configuración, así como la expresión de la resistividad correspondiente a este método de medición se muestra en la figura 49.

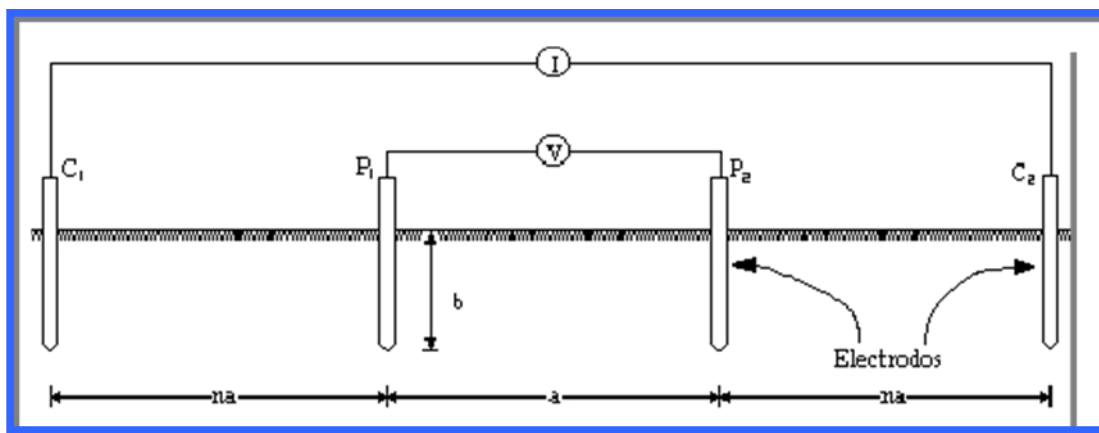


Fig. 49 Disposición de los electrodos en configuración de Schlumberger.

Con esta configuración la expresión para el cálculo de la resistividad está dada por la ecuación 2.2.6.

$$\rho = 2.\pi.R.(n+1).n.a \quad (2.2.6)$$

El Método de Schlumberger es útil cuando se requieren conocer las resistividades de capas más profundas, sin necesidad de realizar muchas mediciones como con el método Wenner. Se utiliza también cuando los aparatos de medición son de poca tecnología. Solamente se recomienda hacer mediciones a 90 grados, para que no resulten afectadas las lecturas por estructuras subterráneas.

ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA

Los electrodos del sistema de aterramiento, consisten en varillas de cobre o un material similar, de una longitud no menor a 2,40 metros y 5/8" mínimas de diámetro, los cuales deben estar enterrados a una profundidad no menor a 2,40 metros. En caso de encontrar rocas en el

terreno, las barras de los electrodos pueden enterrarse en forma oblicua con un ángulo no mayor a 45° de la vertical. Entre estos, podemos nombrar:

- ▶ BARRA COPPERWELD: Esta varilla es una de las más usadas por ser económicamente más accesibles.. Este tipo de electrodo esta hecho de acero y recubierto de una capa de cobre. Su longitud es de 3.05 metros y un diámetro de 16 milímetros. Esta varilla se debe enterrar en forma vertical y a una profundidad de por lo menos 2.4 metros, por norma. También la norma acepta que la varilla vaya enterrada en forma horizontal, siempre y cuando sea en una zanja de mínimo 80cm de profundidad, pero no es muy recomendable. La varilla *copperweld* no tiene mucha área de contacto, pero sí una longitud considerable, con la cual es posible un contacto con capas de tierra húmedas, con lo cual se obtiene un valor de resistencia bajo.

- ▶ BARRA CHEM-ROD®: Esta varilla de aterramiento posee la característica especial de contener sales minerales en su interior las cuales son liberadas para acondicionar el terreno que rodea a la misma, lo cual permite garantizar una excelente resistencia de puesta a tierra durante su período de duración. Cuando las sales se acaban, pueden ser repuesta mediante kits especiales para tal fin. La eficiencia de esta varilla es tan elevada que permite reemplazar hasta diez varillas de aterramiento convencionales por una sola Chem-Rod®. Esto es importante, en terrenos donde se requieran resistencias de tierra muy pequeña y la cantidad necesaria de varillas convencionales se hace excesivamente numerosa. Están disponibles a nivel comercial en varios modelos, una vertical y una horizontal, cada una de estas se utilizara dependiendo del terreno y la capacidad de excavación que se disponga. En la tabla II, se observan las ventajas del electrodo Chem-Rod®, con respecto a otros sistemas de tierra físicos, y la figura 50 muestra una varilla Chem-Rod® colocada en la tierra.

Tabla II.

Cuadro comparativo de sistemas de tierra físicos.

Tipo de electrodo	Resistencia de Terreno (Ohm-metro)				
	9	62	270	3.7K	30K
Terreno sin sistemas de tierra físicos	9	62	270	3.7K	30K
Chem-Rod®	0.2	<2.0	<10	<90	<1K
Varillas	7.2	>22	65	430	<10K

*Fuente: Lightning eliminators and consultants, Inc. (LEC)
Boulder, Colorado, USA*

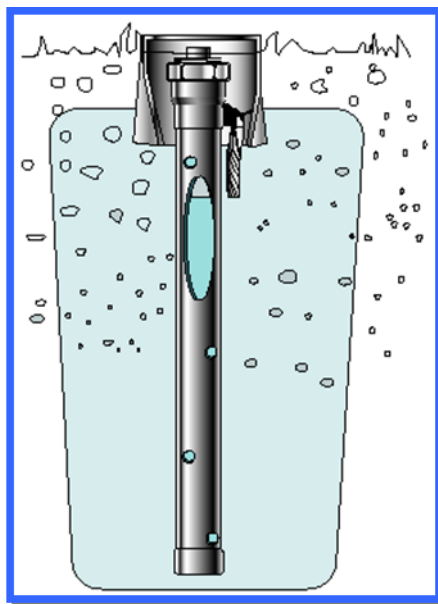


Fig. 50 Barra Chem-Rod® colocada en el suelo.

DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

- ▶ Acoplamiento: “interrelación de dos o más circuitos cuando se establece una transferencia de energía entre ellos. Cuando este acoplamiento se produce por radiación electromagnética se denomina **acoplamiento radiado**. Si se produce a través de conductores o componentes, se denomina **acoplamiento conducido**.”
- ▶ Blindaje Electroestático: “se basa en el hecho de que un exceso de carga colocada en un conductor aislado, se aloja completamente sobre una superficie externa. En condiciones de equilibrio electrostático, el campo eléctrico en todos los puntos del conductor es cero”.
- ▶ Blindaje Magnético: “se define como el recinto constituido por material de alta permeabilidad magnética, utilizado para proteger los instrumentos y conjuntos electrónicos de los efectos de dispersión de campos magnéticos”.
- ▶ Campo radial: “es todo aquel campo que se propaga uniformemente por el medio ambiente”.
- ▶ Compatibilidad electromagnética (CEM): “capacidad de un equipo para no generar interferencias electromagnéticas (emisión), o para no ser afectado por las interferencias producidas por otros equipos (inmunidad). También se entiende por CEM el estudio de los fenómenos de generación, propagación y captación de interferencias electromagnéticas”.
- ▶ Conducción: “acción y efecto de conducir. Acción de transmitir una señal mediante un cable”.
- ▶ Charnela: “bisagra, herraje compuesto de dos planchitas. Parte de un pliegue en la que se unen los dos flancos”.

- ▶ Diafonía: “interferencia de señales que proviene de dos emisores, de dos circuitos o de dos zonas de un mismo registro”.
- ▶ Fuente: “es la capacidad que tiene un dispositivo para entregar continuamente energía”.
- ▶ Inducción electromagnética: “producción de corriente eléctrica en un circuito por efecto de la variación del flujo de inducción magnética que lo atraviesa”.
- ▶ Inducción magnética: “vector que caracteriza la densidad de flujo magnético que atraviesa un material”.
- ▶ Inmunidad: “capacidad de un equipo para no ser afectado en su función por la Presencia de interferencias electromagnéticas”.
- ▶ Interferencia electromagnética (EMI): “son perturbaciones de tipo electromagnético no deseadas, que pueden interferir en el normal funcionamiento de un dispositivo”.
- ▶ Latón: “aleación de cobre y cinc. El latón es un material dúctil y maleable”.
- ▶ Masa de un circuito o sistema: superficie equipotencial conductora que sirve de referencia de tensión para el funcionamiento del circuito o sistema, que no es lo mismo que tierra.
- ▶ Tierra: “sistema de protección. Camino de baja impedancia para que las partes conductoras, accesibles por el usuario, estén a potencial bajo”.
- ▶ Oclusión: “cierre de un orificio, de un conducto o de un canal”.
- ▶ Polímeros: “compuesto químico de elevado peso molecular formado por polimerización”.
- ▶ Receptor: “elemento afectado por una perturbación”.

- ▶ Sistema: Es un conjunto de equipos (accionadores, motores, captadores...) que contribuyen a la realización de una función determinada. Es necesario indicar que, desde un punto de vista electromagnético, el sistema comprende todos los elementos que interactúan, incluidos los dispositivos de desacoplamiento de la red. Las alimentaciones eléctricas, las conexiones entre los diferentes equipos, los dispositivos asociados y sus alimentaciones eléctricas, forman parte del sistema.
- ▶ Susceptibilidad: “capacidad de un equipo para modificar su comportamiento cuando se ve influenciado por interferencias electromagnéticas”.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

MARCO METODOLÓGICO

Debido a que este trabajo de grado es una investigación de tipo documental y de análisis de diseño, la primera parte de los datos aquí presentados son obtenidos del estudio de la documentación y bibliografía recolectada, dotada por el personal a cargo de la empresa, a fin a esta tesis. En el presente capítulo se establecerán el cómo se obtuvieron las bases fundamentales para el desarrollo de **“PROPUESTA PARA LA DISMINUCIÓN DE LAS INTERFERENCIAS ELECTROMAGNÉTICAS PRESENTES EN EL EQUIPO DETECTOR DE DESCARGAS PARCIALES UBICADO EN LA EMPRESA ARALVEN S.A.”**

TIPO DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo especial de grado es una investigación del tipo documental y de análisis de diseño. Parte de la información fue obtenida mediante el estudio de la documentación consultada, además de la comprensión y evaluación de dicha información.

OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN

- ▶ Estudio bibliográfico a través de libros especializados en teoría electromagnética, interferencias electromagnéticas y las normativas que rigen la compatibilidad electromagnética.
- ▶ Análisis de *papers* publicados en Internet, en revistas especializadas y otros.
- ▶ Consulta con especialistas en el área.
- ▶ De trabajos de tesis relacionados.
- ▶ Estudio del contenido programático de la asignatura compatibilidad electromagnética, que se ofrece en la maestría de Ingeniería Eléctrica, dictada en la Universidad de Carabobo.
- ▶ Información recolectada con la empresa ENERGYTECH, especialistas en sistemas de puesta a tierra.

PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

- ▶ Previamente se planteó el tema a desarrollar, que se encuentra en el campo de potencia y de las señales electromagnéticas y que además es un problema que actualmente presenta la empresa ARALVEN S.A.
- ▶ El siguiente paso consistió en investigar sobre los antecedentes del mismo, a través de recursos como Internet, revistas, catálogos, manuales, libros, entrevista con profesores del departamento de potencia y de telecomunicación, trabajos de grado, conjuntamente con la asistencia a las clases de maestría de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo, para analizar y evaluar los puntos necesarios para realizar una eficaz propuesta de solución. Una vez definido el tema se procedió a realizar el anteproyecto.

- ▶ Para la elaboración de marco teórico se utilizaron recursos como libros de interferencias electromagnéticas, Internet, catálogos, papers de compatibilidad electromagnética, catálogos de fabricantes como Himel y Schneider Electric, donde se muestran detalles constructivos de los elementos que integran un blindaje electromagnético, así como sus características ideales de funcionamiento y estándares de organizaciones internacionales como la directiva de compatibilidad electromagnética (89/336/CEE).⁽²⁾
- ▶ Se estudió la prueba de descargas parciales, específicamente para cables de media y alta tensión; el concepto de “descargas parciales” y la importancia del conocimiento de éstas para descartar efectos corona en los cables; el proceso del ensayo, los equipos que lo conforman y el ambiente en el cual se debe desarrollar. Para esto, se utilizó como fundamento material obtenido de Internet y tesis de universidades en donde esta prueba es desarrollada, además de la colaboración del Ingeniero Electricista de la empresa a cargo de la prueba y tutor industrial de este proyecto de grado.
- ▶ Posteriormente, se estudió el comportamiento de la Jaula de Faraday, utilizando material obtenido en Internet acerca del protocolo de funcionamiento de este blindaje, haciendo énfasis en el caso de aislamiento de perturbaciones que inciden en la prueba de descargas parciales. En este caso, los documentos obtenidos en Internet y el apoyo de profesores vinculados al tema fueron de gran ayuda. Asimismo, el tutor industrial facilitó a los investigadores suficiente material de la Jaula actual con la que cuenta la empresa, el diseño y material con el cual está fabricada, para poder realizar la comparación del estado ideal con el real y de esta forma, realizar las recomendaciones necesarias.
- ▶ Se realizó un esquema del conexionado de los cables de potencia, control, medición y puesta a tierra de los equipos que intervienen en la prueba de descargas parciales, de manera que se pudiesen identificar fuentes perturbadoras y los medios de propagación de dichas perturbaciones, además de descartar conexiones erradas que pudiesen estar

poniendo en riesgo la compatibilidad electromagnética dentro de la Jaula. En el cumplimiento de este objetivo, colaboraron profesores de telecomunicación con conocimiento en compatibilidad electromagnética, el tutor industrial de la investigación, los ingenieros de la empresa ENERGYTECH y la información proporcionada por el mismo, además de la formación en este tema que aportó la asistencia a las clases de maestría.

- ▶ Luego, se estudiaron algunos tipos de sistemas de puesta a tierra y su correcto funcionamiento, al mismo tiempo que se analizó el funcionamiento del sistema de puesta a tierra de la Jaula actual, realizando entre otras cosas, mediciones de la resistencia de la puesta a tierra y de la resistividad del suelo. Esto se realizó mediante análisis de información aportada por profesores de potencia, Internet y documentos recolectados en la empresa.
- ▶ Se identificaron los factores que están contribuyendo en el incremento de la perturbación, basado en la información recolectada en el desarrollo de la investigación.
- ▶ Finalmente, se realizó la propuesta para la eliminación del ruido electromagnético presente en el ensayo de descargas parciales, que se realiza en la empresa ARALVEN S.A., la cual está conformada por una serie de recomendaciones, aplicadas a cada uno de los factores que influyen en el problema, además de un nuevo diseño del conexionado eléctrico y del sistema de puesta a tierra, lo cual ejemplifica el grosor de la investigación.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los aislamientos a base de polímeros de los cables de potencia deben cumplir con unas especificaciones de calidad exigentes, especialmente en lo relacionado con su comportamiento a

largo plazo. Las características de estos materiales para soportar el efecto de los agentes externos que los envejecen y debilitan gradualmente, deben ser verificadas mediante pruebas de laboratorio, siendo una de las mas importantes la que mide las descargas parciales en los cables, ya que éstas representan las principales causas de deterioro en el mismo y se presentan en aquellos puntos del material donde existen cavidades, generalmente debidos a problemas en el proceso productivo. Las descargas parciales son pequeños arcos, que involucran una porción del material cuando es energizado; sin embargo, el cable puede continuar con su trabajo durante mucho tiempo, antes de que el deterioro causado por las descargas lo lleve a la falla total.

En la fabricación de un cable de potencia, específicamente en el aislante, cantidades diminutas de aire de baja rigidez dieléctrica quedan aprisionadas dentro del mismo constituyendo cavidades de forma y tamaño variado. Al energizar el cable y como resultado de la diferencia de potencial a través de la cavidad, el esfuerzo en ella puede alcanzar el valor disruptivo del aire encerrado, presentándose una descarga a través de las paredes opuestas y en la dirección del campo eléctrico. Este fenómeno se denomina “descargas parciales”.

DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO DE DESCARGAS PARCIALES REALIZADO EN EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA EMPRESA ARALVEN S.A.

El objetivo fundamental de la evaluación de las descargas parciales es comprobar (en una prueba no destructiva) la calidad del aislamiento. La prueba de descargas parciales, consiste en la aplicación de alto voltaje al cable de potencia, específicamente entre el conductor y la pantalla del cable, a fin de medir la carga eléctrica causada por la descargas en las diminutas cavidades encontradas en el aislamiento. Es posible medir la carga eléctrica causada por la descarga de la cavidad, debido a que generan impulsos de voltaje repetitivos de alta frecuencia que son descubiertos por el equipo detector de descargas parciales utilizado por la empresa y que se muestra en la figura 51.



Marca: PHENIX
Serial No: 04-2421
Model No: PD1R
MFG: 11/2004

Fig. 51 Detector de descargas parciales.

Este dispositivo trabaja en conjunto con los siguientes equipos:

- **Filtro de emisiones electromagnéticas (EMI FILTER):** se muestra en la figura 52 y está ubicado en la alimentación del equipo de descargas parciales para evitar perturbaciones provenientes del sistema de potencia que lo alimenta.



Marca: CORCOM
45AYT6C F7476

Fig. 52 Filtro de emisiones electromagnéticas.

- **Capacitor de acoplamiento (Coupling Capacitor):** ofrece un camino de baja impedancia a las señales de descargas parciales hacia el circuito de detección. Además, permite llevar la señal de voltaje de prueba hasta los equipos de medida. En la figura 53 se muestra la imagen del capacitor de acoplamiento y sus datos de placa.



Marca: PHENIX
Model No: CC75-10
Serial No: 04-2421

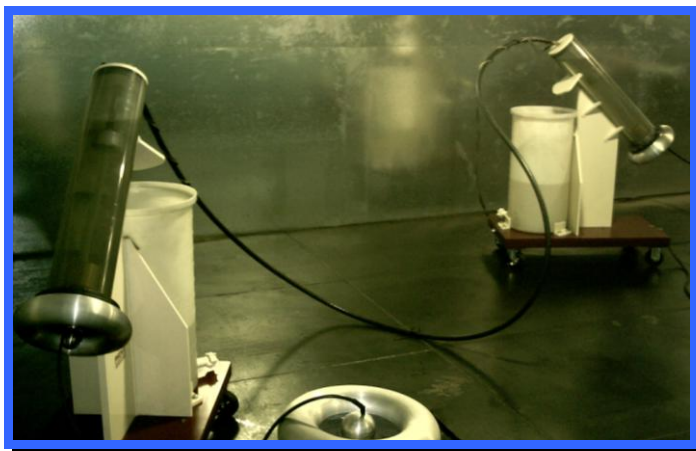
Fig. 53 Capacitor de acoplamiento de impedancia.

- **Impedancia de Medición (CIL4 en serie con RPA1):** obtiene un valor de tensión para llevarlo al elemento detector. Se encuentra ubicada en la parte inferior e interna del capacitor de acoplamiento, como se muestra en la figura 54.



Fig. 54 Impedancia de Medición.

- **Vasos Terminales:** son vasos aislados en aceite, como se muestra en la figura 55, junto a sus datos de placa, que tienen la finalidad de evitar descargas superficiales y que conectan los terminales del objeto de prueba (cable) al circuito.



Copa Terminal 1:

Marca: PHENIX

Model No: OT-75

Serial No: 04-2421

Copa Terminal 2:

Marca: PHENIX

Model No: OT-75

Serial No: 04-2421

Fig. 55 Copas terminales 1 y 2 unidas por el objeto de prueba.

- **Capacitor Calibrador:** la calibración del circuito de detección es simple. Consiste en aplicar una carga conocida a la muestra, que será simulada por un escalón, el cual se debe observar a través del equipo detector de descargas parciales y por medio de los controles del equipo hacer coincidir el valor inyectado con el que muestra el equipo. Se realiza externamente aplicando el pulso de calibración en la impedancia de medición o a través del cable, respectivamente. En la figura 56 se observa el condensador calibrador junto a sus datos de placa.



Marca: PHENIX

Model No: CC75-0.1

Serial No: 04-2421

Fig. 56 Capacitor Calibrador.

En la figura 57 se observa la conexión física de los equipos de medición asociados al equipo detector de descargas parciales.

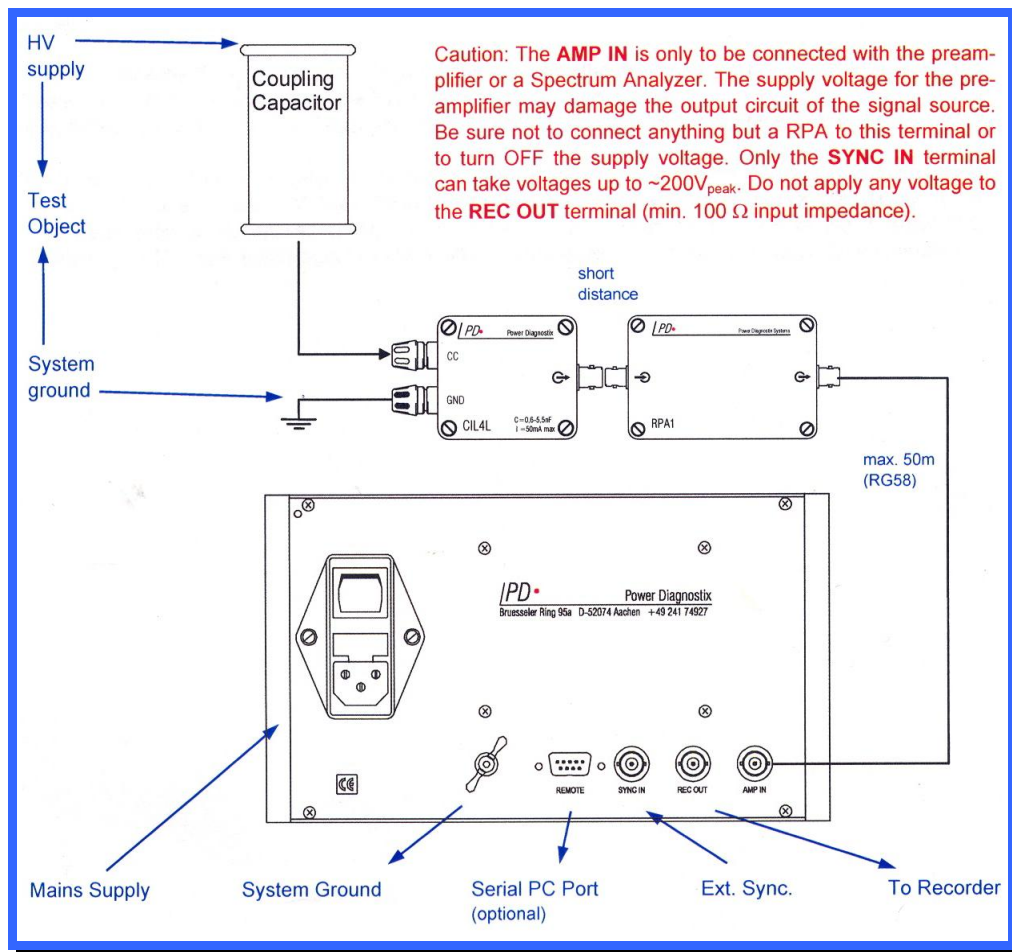


Fig. 57 Esquema físico de conexión de los equipos de medición asociados al DP's.

Además de los equipos que forman parte de la medición de las descargas parciales, también se encuentran ubicados dentro de la Jaula de Faraday los equipos de fuerza, que trabajan en la aplicación de tensión a la prueba y que se muestran a continuación:

- **Transformador de aislamiento:** filtra los disturbios de la red externa entregando una onda completamente sinusoidal. En la figura 58, se observa su imagen y sus datos de placa.



Marca: HIPOTRONICS **Model:** DS1T-15/765-500SR
S.O. No: 003419-00 **Rating:** 480V/480V; 15KVA; 60Hz
Duting: CONTINUOS AT ON LOAD 1HOUR MAX – 50%
DUTING AT 15KVA **Class:** ONAN
Oil Cap: 19GAL. U.S.; 72 LITERS **Weight:** 275LBS; 126KG

Fig. 58 Transformador de aislamiento junto a sus datos de placa.

- **Transformador elevador:** suministra la tensión de prueba al circuito de medición. Incluye el reactor variable de puesta en resonancia. El transformador elevador que se utiliza en la empresa ARALVEN S.A. se muestra en la figura 59, y a un lado sus datos de placa.



Marca: HIPOTRONICS **Model:** 765/35-500SR
S.O. No: 003419-00 **Rating:** 65KV - 500KVA; 60Hz
Taps: 35KV – 500KVA **Class:** OA
Duty: 1HOUR MAXIMUM – 50% DUTY
Oil Cap: 380GAL. U.S.; 1440 LITERS
Weight: 8600LBS; 3910KG

Fig. 59 Transformador elevador de tensión.

- **Derivador:** sirve de medidor de las tensiones aplicadas a la prueba. La figura 60 muestra el derivador utilizado en la empresa y sus datos de placa.



Marca: HIPOTRONICS
Part No: BFR-1599-A314
Capacitance: .001 μ F
Voltage: 100KV
Frecuency: 50/60Hz

Fig. 60 Derivador.

- **Filtro de alto voltaje:** bloquea las señales de alta frecuencia de la fuente hacia el circuito de medición (interferencia) y del circuito de medición a la fuente (señales de las descargas parciales). La figura 61 muestra la imagen del filtro utilizado en la empresa y sus especificaciones técnicas.



Marca: HIPOTRONICS
Model: 2L-5

Fig. 61 Filtro de alto voltaje.

Finalmente, para completar todos los equipos que intervienen en el ensayo de descargas parciales, se encuentran los equipos de control encargados de la aplicación del voltaje de prueba y de la puesta en resonancia del sistema, ubicados al igual que el equipo detector de descargas parciales dentro del cubículo de control que es un anexo de la Jaula de Faraday. Estos equipos son:

- **Interruptor principal (MAIN POWER):** se muestra en la figura 62.



Marca: HIPOTRONICS

Fig. 62 Interruptor Principal (MAIN POWER).

- **Circuito serie resonante (H.V. SERIES RESONANT TEST SYSTEM):** tiene la finalidad de reducir drásticamente la potencia reactiva exigida al circuito de alimentación. El funcionamiento de este equipo está basado en la compensación de la carga capacitiva mediante un reactor cuya inductancia puede ajustarse entre límites prefijados. Por medio de este equipo que se muestra en la figura 63 también se realiza la aplicación de tensión.



Marca: HIPOTRONICS

Model: 765/35-500SR

Código: LE-49

Fig. 63 Equipo serie resonante.

El funcionamiento del equipo serie resonante está basado en la compensación de la carga capacitiva del cable mediante un reactor cuya inductancia puede ajustarse entre límites exigidos

por el objeto de prueba. En la figura 64, se muestra un esquema simplificado d el circuito serie resonante.

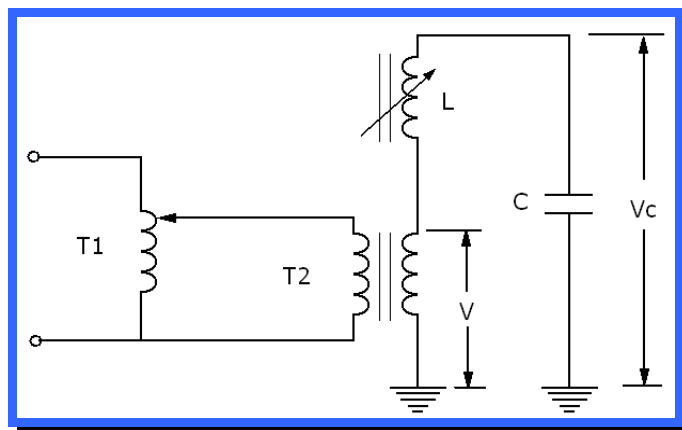


Fig. 64 Esquema del circuito serie resonante

Donde:

T1: autotransformador variable

T2: transformador elevador

L: reactor variable

C: capacitancia del cable en prueba

Todos los elementos antes mencionados se encuentran apantallados dentro de la Jaula de Faraday con el fin de aislar los disturbios electromagnéticos externos.

En la figura 65 se muestra el esquema de conexionado de los equipos que intervienen en el ensayo de descargas parciales de manera que se logre una mejor visualización de la prueba.

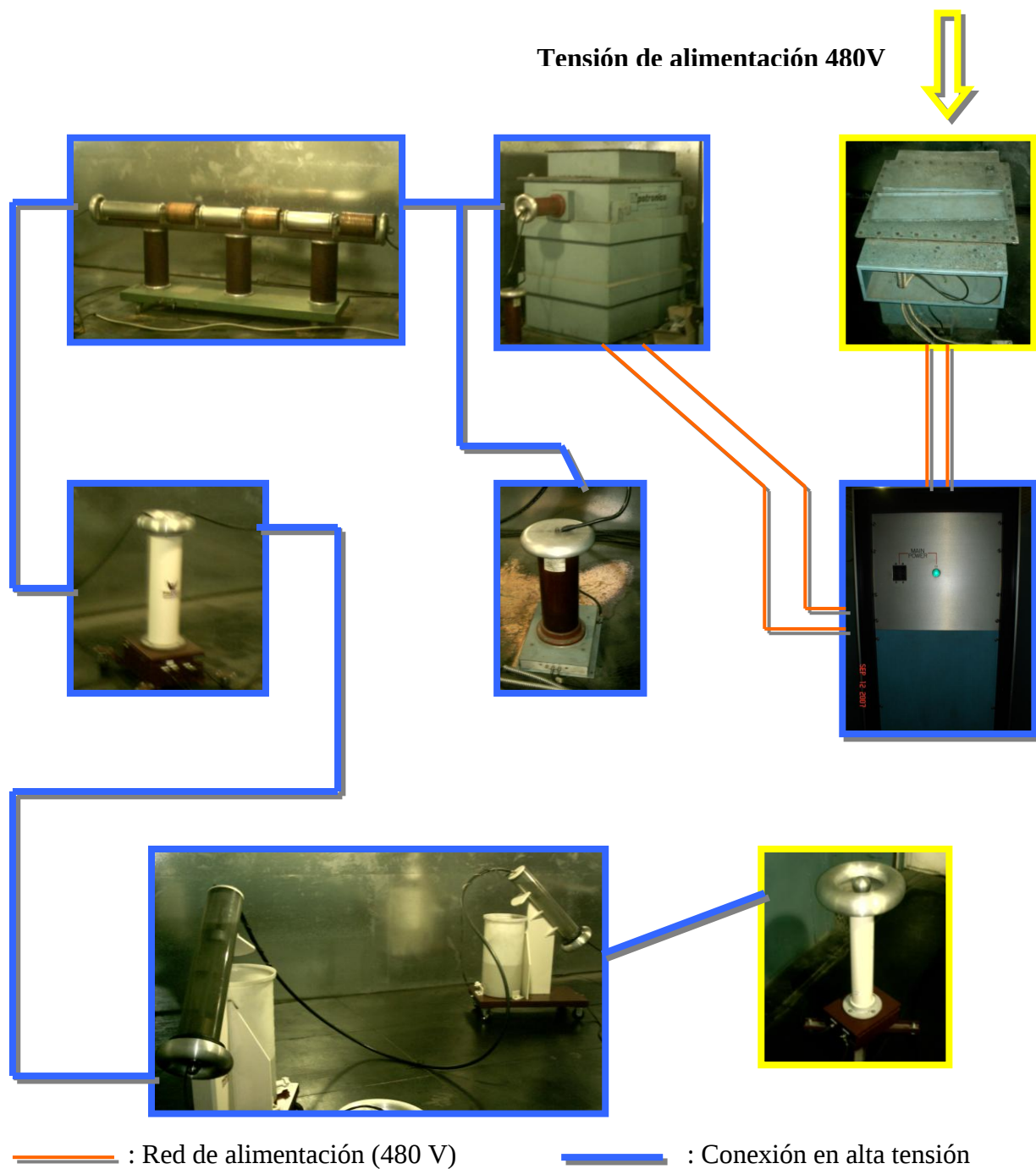


Fig. 65 Conexión de los equipos de la prueba de descargas parciales.

Al producirse una descarga parcial en el cable de prueba producto de una alta tensión aplicada, se crea un desplazamiento de carga hacia la tierra proveniente del voltaje almacenado en el acoplador de impedancia, generándose pulsos de corriente a alta frecuencia; el filtro de alto voltaje evita que estos pulsos vayan a la fuente y hace que circulen hacia los equipos de medición, el acoplador, la impedancia de medición y el objeto de prueba. Esta impedancia de medición es la que lleva estos pulsos hacia el detector en donde se pueden visualizar.

Los pulsos de corriente de alta frecuencia de las descargas se magnifican y superponen sobre la señal de prueba sinusoidal de 60Hz, para visualizarlas en el equipo detector de descargas parciales. Dependiendo del ángulo y la forma de los pulsos sobre la onda de prueba, se puede obtener una interpretación del tipo de las descargas.

ANTECEDENTES DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN

La prueba de descargas parciales se realiza en la empresa ARALVEN S.A., desde hace 20 años. Al momento de la construcción del laboratorio de alta tensión, conformado por la Jaula de Faraday con todos los equipos que intervienen en esta prueba, el lugar de ubicación era más solitario, alejado de los otros equipos de la planta especialmente los motores. Al pasar los años el inventario de máquinas de trabajo fue aumentando reduciéndose el espacio y convirtiéndose en la zona hostil (zona con numerosas maquinas y equipos generadores de perturbaciones electromagnéticas) en la que actualmente se encuentra ubicado dicho laboratorio, como se muestra en la figura 66, mientras que la figura 67 ofrece una idea física del laboratorio.



Fig. 66 Ambiente hostil cercano al laboratorio de alta tensión.



Fig. 67 Jaula de Faraday que conforma el laboratorio de alta tensión de la empresa ARALVEN S.A.

Algunos de los equipos para el desarrollo de la prueba adquiridos en el inicio aún se encuentran en funcionamiento, como lo son: el transformador de aislamiento, el elevador de tensión, el derivador, el filtro de alto voltaje y los equipos de control ubicados en la consola que son, la fuente principal (*Main Power*) y el circuito serie resonante. Los equipos de medición que trabajan en conjunto con el detector de descargas parciales fueron reemplazados hace dos años y medio por uno más efectivo, de mayor precisión y de mejor tecnología. En la figura 68 se muestra el equipo detector de descargas parciales que fue reemplazado.



Fig. 68 Equipo detector de descargas parciales de mayor data.

La razón por la que fueron reemplazados estos equipos, es que se estaba presentando una filtración de ruido considerable que hacia poco efectiva la realización de la prueba.

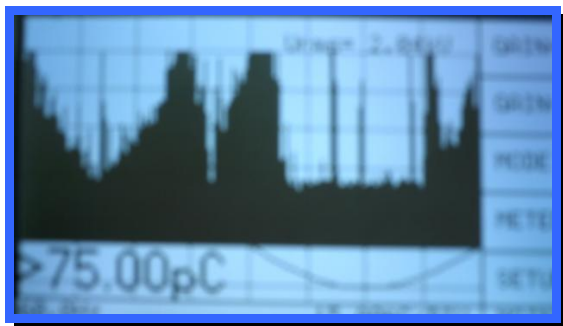
Luego de revisar los equipos, descubrir las fallas en el equipo de medición y reemplazarlo, se observo que aunque efectivamente el equipo de vieja data suministraba lecturas erróneas, la alta precisión del nuevo equipo dejaba al descubierto una alta filtración de perturbaciones electromagnéticas, siendo este el mayor de los problemas para la empresa, la cual lleva los dos años y medio de adquirido el equipo nuevo, intentando dar con la solución de la problemática presentada.

En una practica de ensayo y error, se realizaron intentos para mejorar las condiciones de la prueba. Uno de ellos fue colocar una barra de tierra coperwell en las afueras de la Jaula como la que se observa en la figura 69, ya que el sistema de puesta a tierra con el que cuenta dicha Jaula cuando se encontraba conectado aumentaba aun más las perturbaciones vistas por el equipo detector a tal que no se podía calibrar dicho equipo.

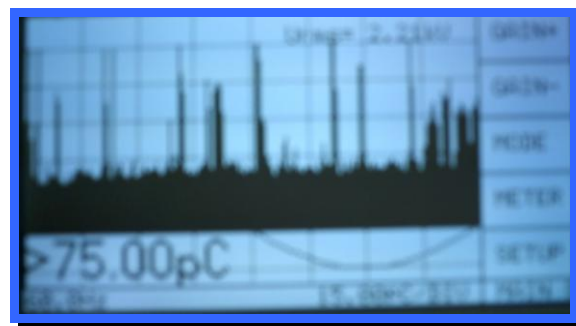


Fig. 69 Barra de tierra coperwell externa.

El colocar una nueva barra como puesta a tierra fue un intento fallido ya que, aunque disminuyó el ruido respecto a los niveles con la conexión de la puesta a tierra principal, como se muestra en la figura 70 (a), aún seguían siendo bastante considerables las perturbaciones percibidas por el detector, como se observa en la figura 70 (b).



(a)



(b)

Fig. 70 (a) Nivel de interferencia al energizar el equipo de descargas parciales con la puesta a tierra de la Jaula conectada (GANANCIA = 15 picocoulomb/divisiones). **(b)** Nivel de interferencia al energizar el equipo de descargas parciales con la puesta a tierra externa conectada (GANANCIA = 15 picocoulomb/divisiones).

Otro de los intentos fue la remodelación de la Jaula de Faraday que consistió en reforzar el piso, paredes y techo desde el punto de vista de blindaje electromagnético con láminas de acero y la construcción de un nuevo cubículo de control donde el operario pudiese monitorear y controlar el proceso de detección de descargas parciales. La mejora en este caso fue poco considerable.

Finalmente, por presentar la Jaula un bajo aislamiento eléctrico con las estructuras metálicas colindantes a ella y la tierra de la planta, se decidió colocar debajo del piso de la misma, entre el piso de concreto y el metálico, láminas de PVC y listones de madera, eliminando así los anclajes existentes del piso metálico y aumentando el aislamiento eléctrico de la Jaula con respecto a las estructura metálicas de la planta y su tierra, pero aun así persistiendo el problema.

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.

La investigación, se basó en tres criterios fundamentales para el efectivo desarrollo de la prueba de descargas parciales, que son; el nivel de inmunidad de la Jaula de Faraday para no verse afectada en su función de blindaje por la presencia de interferencias externas, el conexionado eléctrico, de manera que se verifique el cumplimiento de las normas del código eléctrico nacional (CEN) y se compare con las recomendaciones dadas por el estándar IEEE y por último, el sistema de puesta a tierra para garantizar que el diseño actual cumpla con las condiciones necesarias para el drenaje de las corrientes parasitas o de falla y la equipotencialidad del sistema.

Por ser una de las limitaciones de esta investigación, la falta de equipos para estudiar los fenómenos de interferencias por acoplamientos radiados, se hizo una revisión desde el punto de vista cualitativo de la estructura de la Jaula de Faraday, para descartar cualquier contribución de la misma al problema.

ESTUDIO DE LA INMUNIDAD ELECTROMAGNÉTICA DE LA JAULA DE FARADAY

En esta sección se establecerán las condiciones actuales de la Jaula de Faraday ubicada en la empresa ARALVEN S.A. y, por medio de un cuadro comparativo basado en las condiciones ideales de la misma, se analizará la utilidad de este blindaje.

Diseño actual de la Jaula de Faraday ubicada en la Empresa ARALVEN S.A.

La Jaula de Faraday de la Empresa ARALVEN S.A., está constituida por:

- ▶ El cubículo de control: tiene un volumen aproximado de $38,9\text{m}^3$. Las paredes, están hechas con lámina de acero de 1,5mm de espesor, tienen ventana de vidrio y, adicionalmente, están cubiertas con malla y lámina metálicas. El piso y el techo están hechos con láminas de acero común de bajo carbono con espesor de 3mm. Las dos (2) puertas de acceso al cubículo de control, conjuntamente con sus respectivos marcos, están terminadas en sus bordes, con un arreglo de pletinas de acero inoxidable y contactos de láminas preformadas de acero inoxidable.
- ▶ El piso: Está formado por laminas de acero de 5mm de espesor, unidas entre si y a la estructura de la Jaula por soldaduras corridas ancladas al piso de concreto en donde está construida. Entre el piso de concreto y el metálico, existen láminas de PVC y listones de madera, los cuales eliminan los anclajes existentes del piso metálico. El valor de la resistencia de aislamiento entre la Jaula de Faraday y la tanquilla de distribución de tierra es de $6\text{ M}\Omega$.
- ▶ El techo: está construido con láminas de acero y armadura de tubos metálicos. El área total aproximada del techo es de 56m^2 , y se encuentra a una altura de 3m.

- ▶ Las paredes: están hechas con mallas metálicas recubiertas con láminas de acero de 1.5mm de espesor, soportadas por una estructura metálica.
- ▶ El portón principal de la Jaula: está construido con malla, láminas metálicas y armadura de tubos metálicos. Esta formado por dos hojas corredizas horizontalmente. Su área total aproximada es de $12,9\text{m}^2$. El portón es colgante en su parte superior y encarrilado en su parte inferior. Además, cuenta con un arreglo de pletinas y contactos de láminas preformadas de acero inoxidable para el cierre contra la estructura fija y la unión de las hojas del portón.
- ▶ Cableado de líneas AC: La ducteria de los cables AC relacionados con la alimentación del laboratorio, es de PVC. La alimentación del autotransformador elevador es canalizada por otro ducto del mismo material, el cual primeramente desemboca en la fosa colectiva construida dentro del cubículo de control, para, posteriormente, conectarse al interruptor principal del sistema.
- ▶ Cableado de líneas coaxiales: Los cables coaxiales relacionados con el Equipo Detector de Descargas Parciales, AMP IN y SYNC IN que provienen de la unidad de acoplamiento de impedancia y el terminal de salida del calibrador de capacitancia (OUTPUT), al igual que los cables coaxiales de medición dirigidos hacia el equipo de resonancia, se canalizan hacia el cubículo de control por medio de ductos flexibles de aluminio para efectos de protección externa, en donde desembocan en la fosa de radio frecuencia, ubicada en dicho cubículo, para finalmente conectarse con los equipos de medición que allí se encuentran.

Utilidad de la Jaula de Faraday de la Empresa ARALVEN S.A.

En el Cuadro N° 4 se muestra un resumen de las características ideales en comparación con las que presenta actualmente la Jaula de Faraday de la Empresa ARALVEN S.A., con la finalidad de determinar su utilidad:

Cuadro N° 4

Comparación del funcionamiento ideal versus actual de la Jaula de Faraday

CARACTERÍSTICAS	IDEAL	ACTUAL
Material del blindaje	Buen conductor eléctrico en recintos cerrados.	
Recubrimiento del blindaje	Paredes, techos, piso, ventanas y puertas, con mallas y/o láminas metálicas.	
Unión eléctrica	La mejor posible, preferiblemente por medio de soldadura.	
Unión de las puertas al blindaje general	Por medio de pletinas flexibles.	
Entrada de cables de energía	Blindados por medio de malla coaxial o instalados en ductos.	
Cables de salida de la Jaula	Blindados.	
Cables de tierra de la instalación eléctrica	Tendidos por el interior de los ductos en que van canalizados los cables de energía.	
LEYENDA:  : Bien  : Regular  : Mal		

Fuente: Coronel & Orellana., 2007.

Conclusiones sobre el desempeño de la Jaula de Faraday de la Empresa ARALVEN S.A.

Como resultado del análisis y comparación de las características ideales y actuales de la Jaula de Faraday en cuestión, se concluye que:

- La unión del portón al blindaje de la Jaula, cuenta con un sistema de unión por pletinas flexibles, que se encuentra totalmente deteriorado (ver la figura 71). La unión eléctrica requerida se ha perdido, llegando en algunos puntos a no tener ningún tipo de contacto.



Fig. 71 Sistema de unión por pletinas del portón.

- ▶ Los cables que alimentan a los equipos no se encuentran blindados por lo tanto no están unidos eléctricamente a la Jaula de Faraday lo que disminuye la efectividad del blindaje llegando, en algunos casos, a crearse acoplamientos entre ellos por la falta de apantallamiento.
- ▶ Existe sólo un cable de salida de la Jaula, que va canalizado hacia la barra de tierra externa y que no poseen ningún blindaje, facilitando la entrada de perturbaciones electromagnéticas externas por medio del mismo.
- ▶ Los cables de tierra se encuentran en su totalidad tendidos sobre el piso lo cual no cumple los requerimientos ideales del diseño de la Jaula de Faraday, provocando entre ellos acoplamientos que introducen interferencia en el sistema y colaboran con el problema. Esto se muestra en la siguiente figura 72.

Para el caso de los otros puntos expuestos en el cuadro comparativo, se notó que la mayoría de las características ideales se cumplen, con lo cual se concluye (basados en la inspección visual realizada) que la contribución de acoplamientos radiados a las perturbaciones es poco considerable, a pesar de que existen filtración de interferencias por aquellas zonas de la Jaula que

no han tenido el mantenimiento necesario y por lo cual se ha degradado el blindaje original. Por tanto, se recomienda realizar dicho mantenimiento, en pro de la mejora al blindaje aunque en general, el diseño cumple con la mayoría de las expectativas de esta sección de la investigación.

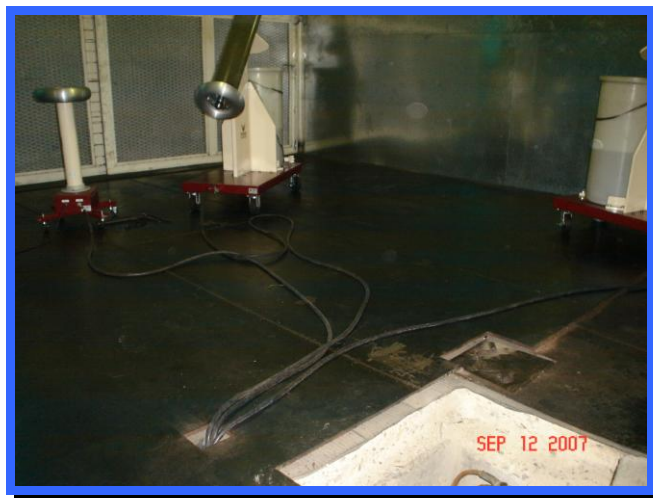


Fig. 72 Cables de tierra tendidos en el piso.

ESTUDIO DEL CONEXIONADO ELÉCTRICO

Esta sección plantea una revisión general realizada a las conexiones eléctricas, su ubicación y cumplimiento de las normas establecidas por el CÓDIGO ELÉCTRICO NACIONAL y considerando las recomendaciones dadas por el estándar IEEE, Std 1100-1999, IEEE, Std 142-1991.

Para el estudio del conexionado eléctrico se levantó el diagrama unifilar del sistema que se muestra en la figura 73, ya que la empresa no contaba con esta información.

En el diagrama unifilar se observa que la alimentación del laboratorio de alta tensión está dada por dos transformadores en serie cada uno de 240V (en el lado de baja) y 50 KVA de capacidad, siendo ésta una subestación independiente del resto de la planta, destinada solamente

para las instalaciones de la prueba. Seguidamente, se observa que la alimentación llega al breaker principal del laboratorio de alta tensión, en donde existe un cable en desuso. Posteriormente, esta alimentación llega al transformador de aislamiento ubicado dentro del laboratorio el cual, por su característica de desacoplar los circuitos, actúa como fuente principal de dicho laboratorio.

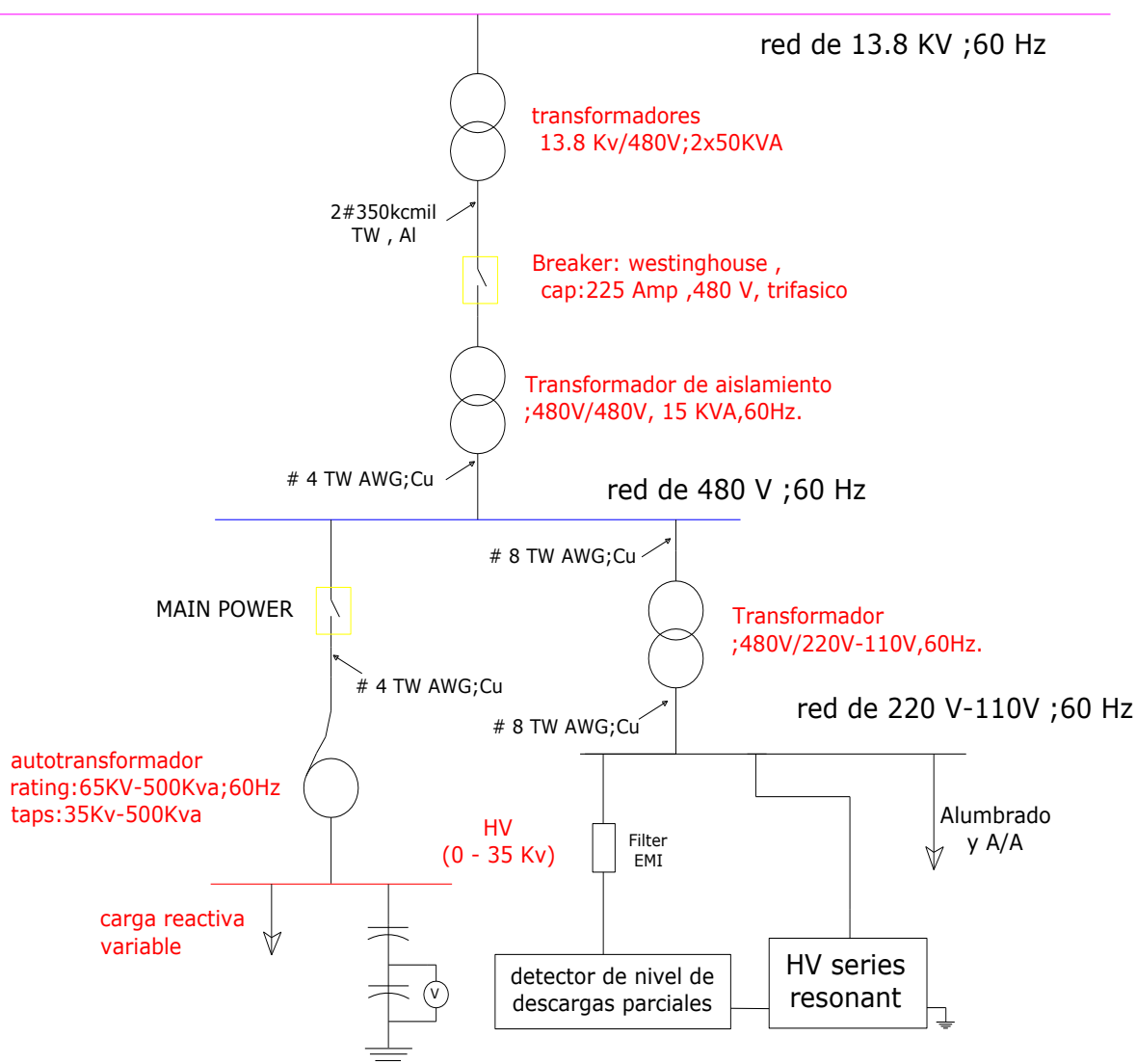


Fig. 73 Diagrama unifilar del sistema de potencia de la Jaula de Faraday.

Por tanto, el estudio del conexionado eléctrico en el laboratorio de alta tensión se realizará a partir de su fuente principal y los puntos a tratar en esta sección serán: Circuito de alimentación en el laboratorio de alta tensión, Circuito de medición y Fosa de radio frecuencia ubicada en el cubículo de control

Circuito de alimentación en el Laboratorio de Alta Tensión

La fuente principal alimenta dos circuitos ramales; uno que va para el transformador de servicios generales y otro que, por medio del interruptor principal (*MAIN POWER*), va al autotransformador elevador. En el plano de conexiones que muestra la figura 74, se observa el circuito de alimentación descrito y sus respectivas conexiones de puesta a tierra.

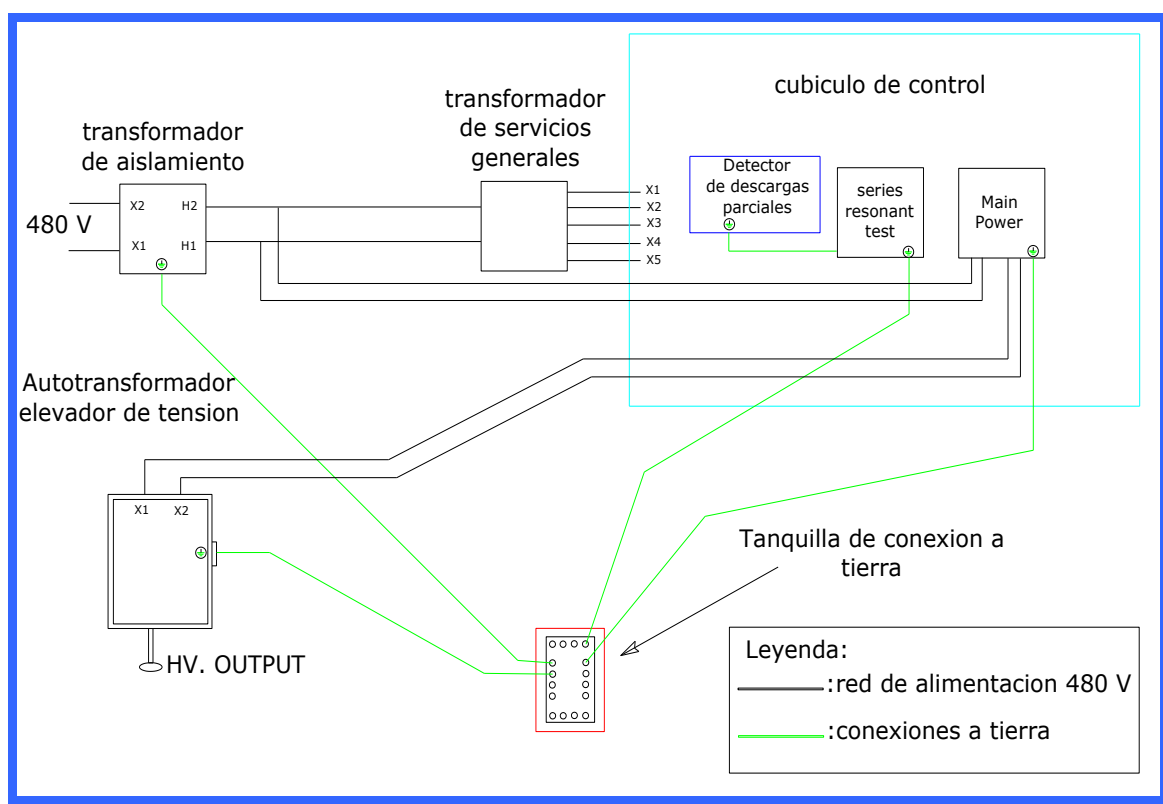


Fig. 74. Esquema del circuito de alimentación y sus conexiones de puesta a tierra.

Según la práctica recomendada por IEEE Std 1100-1999, sección 4.2.2.4 la conexión de un transformador de aislamiento con blindaje electrostático típico es la mostrada en la figura 75.

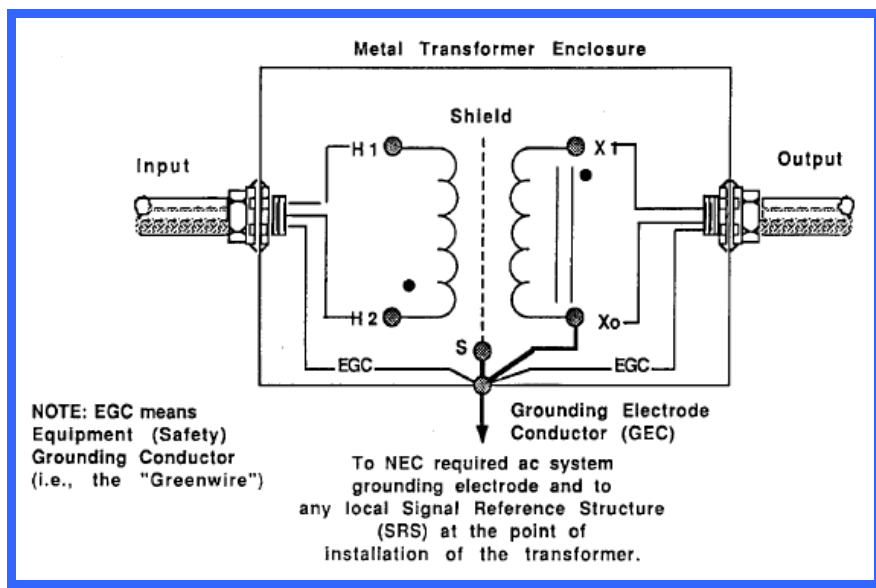


Fig. 75 Esquema de alimentación con puesta a tierra de potencia.

Si se realiza una comparación con lo recomendado se tiene el esquema de la figura 76.

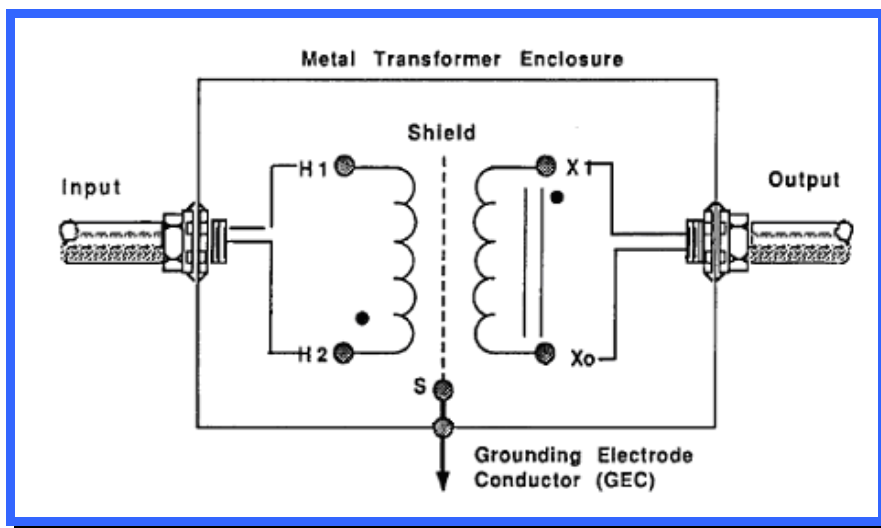


Fig. 76 Esquema representativo del circuito de alimentación actual de la empresa.

Como se observa:

- ✗ El sistema no está provisto de una referencia de tensión conectada a tierra en la fuente principal.
- ✗ El sistema no cuenta con una puesta a tierra debidamente estructurada, en donde se garantice el camino de retorno para las corrientes de falla a la fuente principal.

Por otro lado, para el caso del transformador de servicios generales, se observó que:

- ✗ No tiene el chasis (masa) conectado a la puesta a tierra, como se observa en la figura 77.

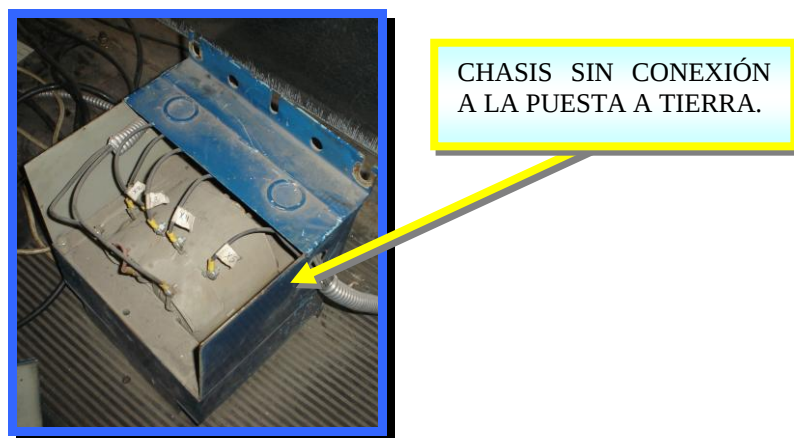


Fig. 77 Salidas de tensión por el lado de baja del transformador de servicios generales.

- ✗ Alimenta equipos como el detector de descargas parciales, el circuito serie resonante y el aire acondicionado sin conexión a tierra, a pesar de ser necesario para los mismos.

Además, se observa en la figura 78, en la zona cercana al transformador de aislamiento, que los conductores de tierra y de alimentación, tienen una ubicación que facilita la proliferación de perturbaciones por acoplamientos entre ellos, incumpliendo las recomendaciones dadas por la IEEE Std 1100-1999, sección 4.6.2.1.3, sección 4.8.2.

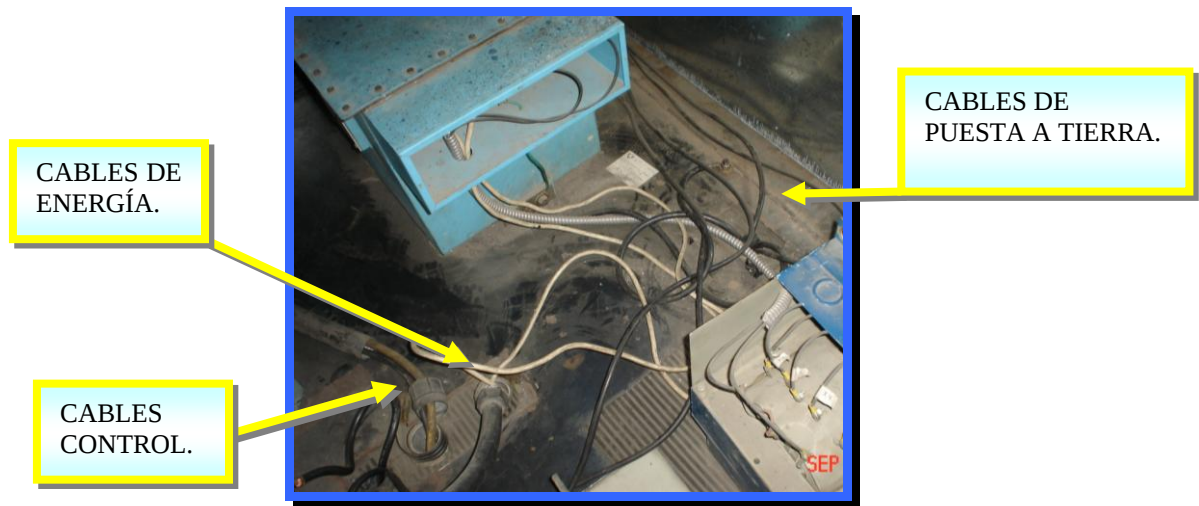


Fig. 78 Cables de conexiones eléctricas.

Circuito de medición

El circuito de medición está compuesto por los equipos que intervienen directamente en el proceso de medición de las descargas parciales, estos son:

- ▶ Derivador
- ▶ Filtro de emisiones electromagnéticas
- ▶ Capacitor de acoplamiento
- ▶ Copas terminales 1 y 2
- ▶ Capacitor calibrador
- ▶ Equipo detector de descargas parciales

Un esquema del circuito de medición actual del laboratorio se muestra en la figura 79.

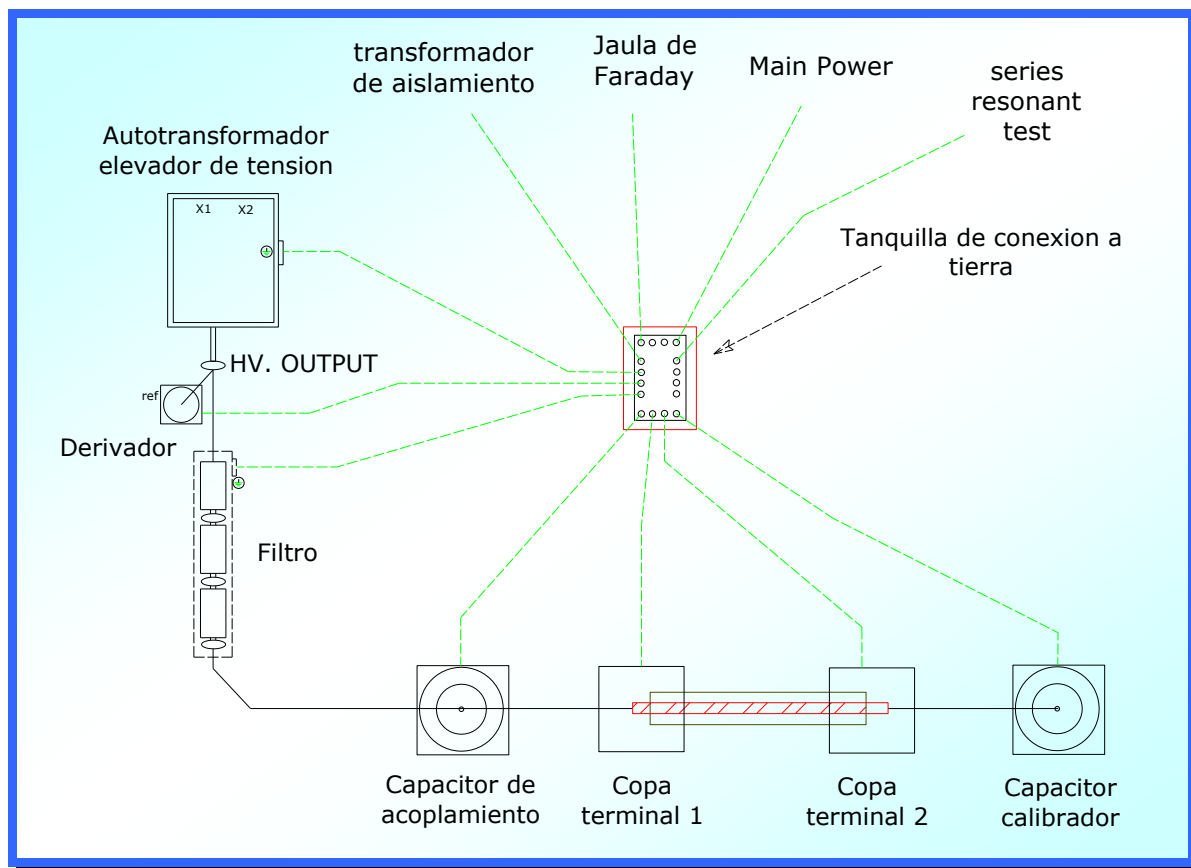


Fig. 79 Conexiones del circuito de medición actual.

Según el manual del equipo detector de descargas parciales marca PHENIX, los equipos de medición se deben conectar, como lo muestra el esquema circuital de la figura 80.

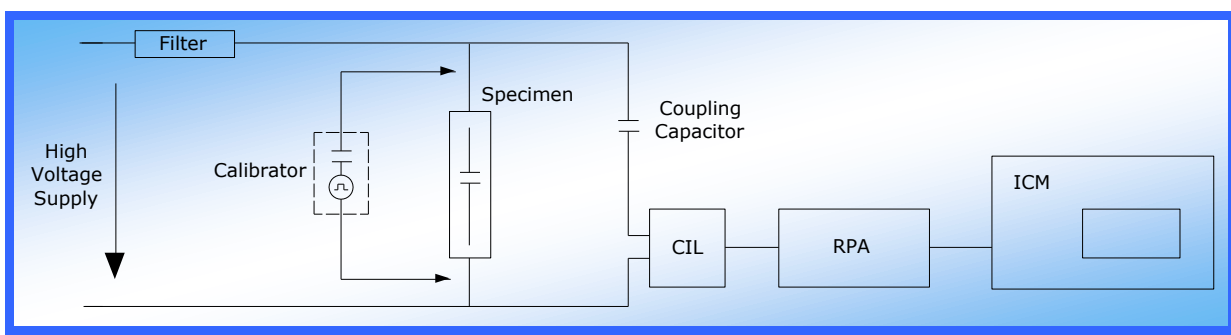


Fig. 80 Esquema circuital de conexión de los equipos de medición.

Basados en el esquema circuital del manual y realizando una comparación con las conexiones del circuito de medición en el laboratorio, se presenta en la figura 81 la situación actual del mismo.

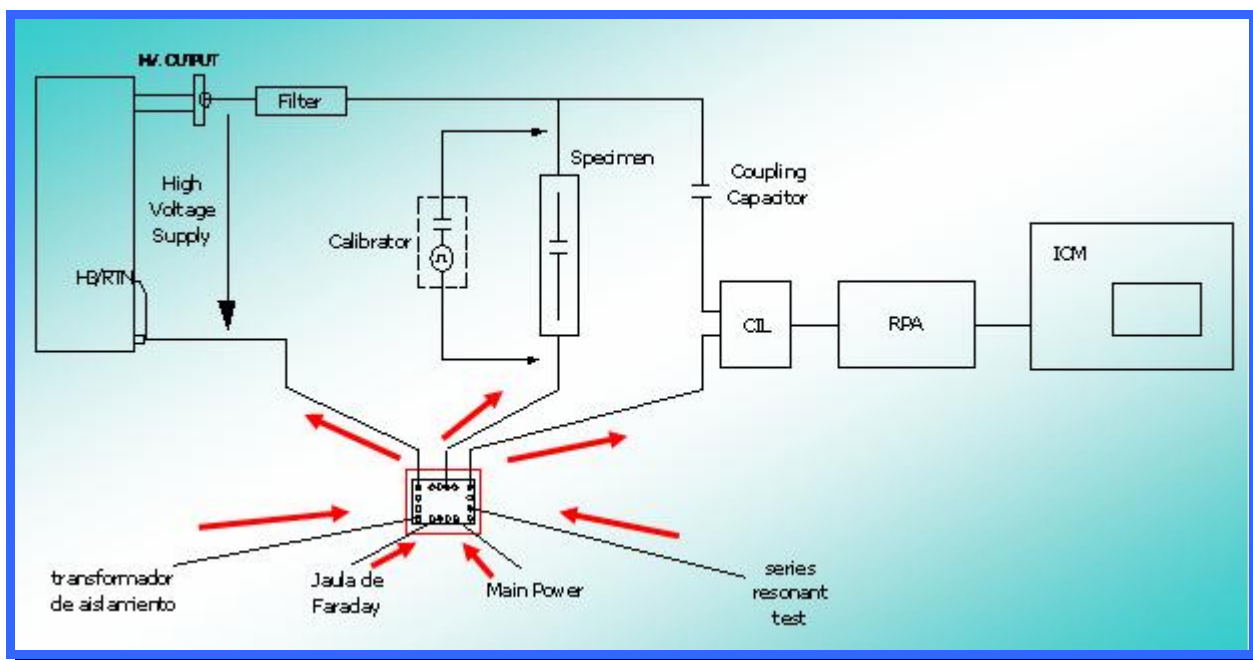


Fig. 81 Situación actual del circuito de medición.

Se observa que:

- ✗ La referencia de tensión de los equipos de medición está unida a la puesta a tierra del sistema en general.
- ✗ El circuito de medición cuenta con una referencia de tensión totalmente contaminada por la circulación de corrientes parasitas, que podrían estar entrando y saliendo de la tanquilla de distribución de manera arbitraria.
- ✗ La tanquilla de distribución funciona como un nodo para las corrientes que convergen en ella ya que se encuentra desconectada del sistema de puesta a tierra del laboratorio.

- ✗ Evidentemente, el equipo detector de descargas parciales (equipo sensible), está detectando la descarga en el objeto de prueba (cable) y todas las corrientes que probablemente se interconecten a la referencia de tensión por medio de la tanquilla de distribución.

Además, se debe destacar:

- ✗ Los cables de conexión a tierra de los distintos equipos se encuentran tendidos sobre el piso sin ninguna canalización ni blindaje hasta llegar a ductos de PVC subterráneos que los canaliza a la tanquilla de distribución. De esta manera se incumple la recomendación dada por IEEE , Std 142-1991 (capítulo 2, sección 2.2.5)
- ✗ Los cables de puesta a tierra del capacitor de acoplamiento, el filtro de alto voltaje, la conexión a la tierra externa y el derivador, se encuentran tendidos sobre el piso, cercanos entre ellos, facilitando la creación de EMI por acoplamiento, como lo muestra la figura 82, lo cual incumple la recomendación de IEEE, Std 1100-1999 (capitulo 4, sección 4.6.2.1).



Fig. 82 Cables de conexión a tierra de varios equipos que intervienen en la prueba.

Finalmente, al analizar el funcionamiento del filtro de alto voltaje y su conexión eléctrica, se observó que tiene la configuración mostrada en la figura 83.

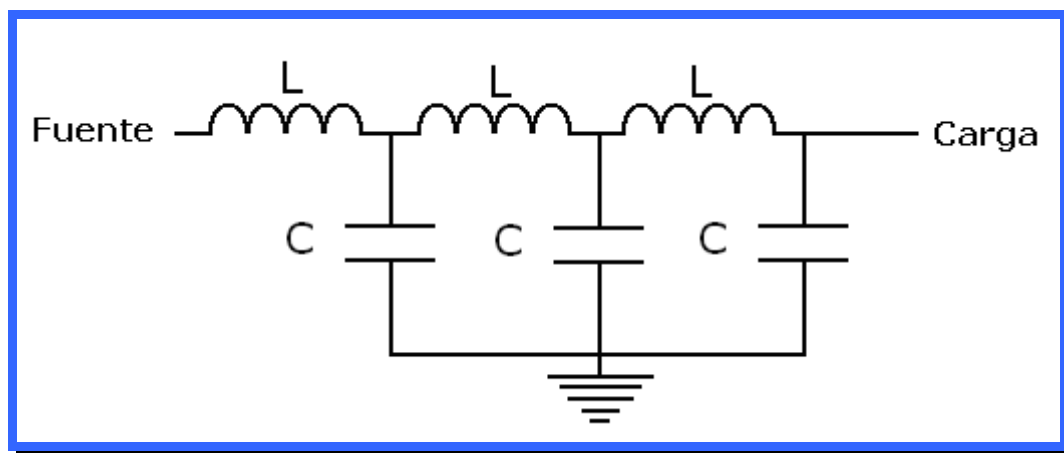


Fig. 83 Configuración actual del filtro de alto voltaje.

Recordando, las inductancias ante señales de alta frecuencia tienen un comportamiento de alta impedancia lo que se traduce en un circuito abierto, mientras que la capacidad actúa como un cable por la baja impedancia que presenta.

Comparando estas afirmaciones con la configuración actual, se puede notar que en el caso de las señales perturbadoras de alta frecuencia procedentes de la fuente, no se garantiza una vía de baja impedancia hacia la misma para su retorno como es debido, por el contrario se le presenta un circuito abierto, lo que puede ocasionar que dicha perturbación retorne por un camino difícil de determinar.

Por otro lado, las descargas parciales se presentan en pulsos de corrientes de alta frecuencia los cuales deben permanecer entre los equipos de calibración, acoplamiento y la impedancia de medición, que a su vez le facilita el camino hacia el equipo detector de descargas parciales.

Para que esto se cumpla, se necesita que el filtro se comporte ante dicha señal como una barrera que impida el paso de la misma a la fuente.

Sin embargo, en la configuración actual se observa que el filtro se comporta ante la señal de descargas parciales como una vía de baja impedancia hacia la tierra del sistema, lo que dificulta la detección de dicha señal a pesar de que todos los equipos involucrados en el ensayo estén conectados en el mismo punto del sistema.

Es claro notar que el filtro actualmente se encuentra conectado de manera inversa lo que produce las consecuencias expuestas anteriormente.

Fosa de radiofrecuencia ubicada en el cubículo de control

La fosa de radio frecuencia ubicada en el cubículo de control, se muestra en la figura 84.

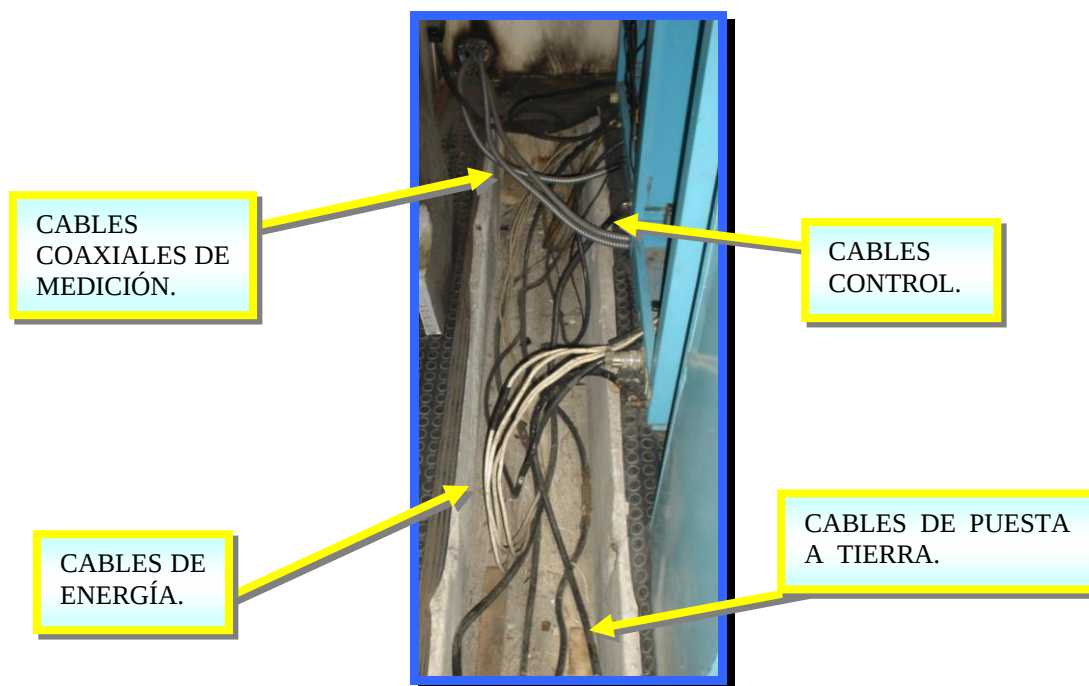


Fig. 84 Fosa de radiofrecuencia ubicada dentro de la consola de control.

En ella se observa:

- ✗ Los cables que pertenecen a las conexiones de alimentación y control de los equipos ubicados dentro de la misma, al igual que la salida de conexiones de puesta a tierra del sistema, es decir, cables de distintos circuitos y con distintos fines, se encuentran cercanos y entrelazados entre ellos, sin ningún tipo de pantalla que pueda evitar la creación de EMI acopladas, pudiendo ser esto una de las causas principales del problema. Además, se incumple con las recomendaciones prácticas dadas por IEEE (Std 1100-1999, sección 4.6.2.1.3; sección 4.8.2).
- ✗ Los cables que entran y salen de la fosa, lo hacen de una manera poco ordenada además de canalizarse en ducterías sin blindaje, como se muestra en la figura 85.



Fig. 85 Entrada y salida de cables a la fosa de radiofrecuencia.

ESTUDIO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

En esta sección se presenta la descripción del sistema de puesta a tierra actual del laboratorio de alta tensión, al igual que las mediciones de resistencia, tanto de las barras como del terreno en

donde se encuentra ubicado, con la finalidad de verificar el estado de funcionamiento de la misma y el total cumplimiento de las normas.

Descripción del actual Sistema de Puesta a Tierra

El sistema de puesta a tierra del laboratorio está constituido por dos barras químicas CHEM – ROD® de 4 pies, unidas por un anillo de cobre desnudo 4/0, como se muestra en la figura 86.

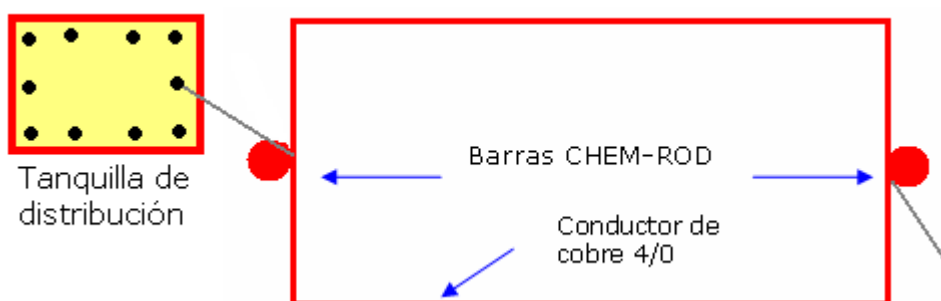


Fig. 86 Diseño del sistema de puesta a tierra actual del laboratorio.

Las barras Chem –Rod® se encuentran empotradas en el suelo, como muestra la figura 87 y están llenas en su interior con sales minerales que se van drenando al terreno, aumentando así la conductividad del mismo.



Fig. 87 Barra CHEM – ROD® del sistema de puesta a tierra de la Jaula de Faraday.

La figura 88 muestra el esquema de instalación de la barra. Cada seis meses o cada año (dependiendo de la humedad del suelo), se debe revisar el nivel de estas sales, quitando el tapón de las barras CHEM – ROD® y, si es necesario, se debe completar el nivel con las sales especificadas (ver manual de mantenimiento de las barras CHEM – ROD® en el anexo A). Sin embargo, cuando no se le dá el mantenimiento adecuado, el sistema de puesta a tierra irá perdiendo su efectividad, variando la resistividad de la misma, de tal manera que las corrientes no se drenen a tierra con facilidad.

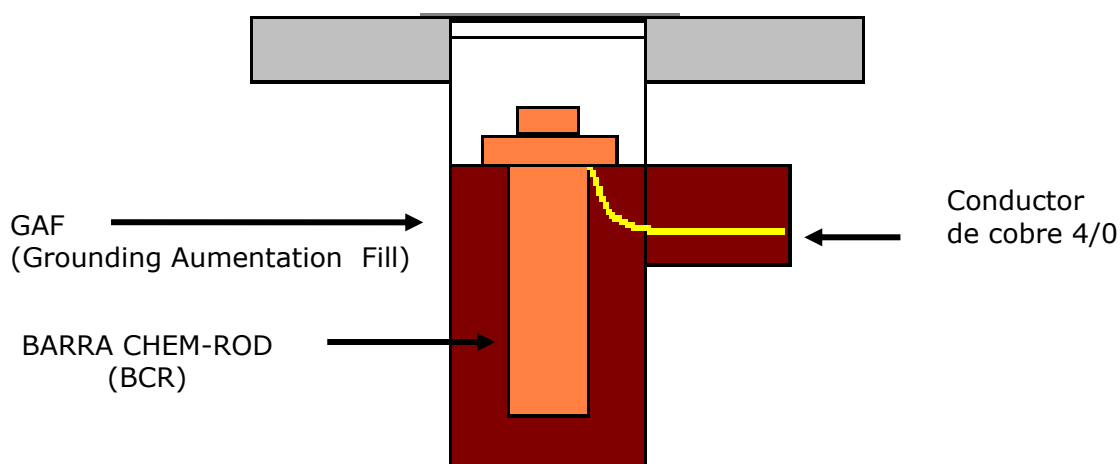


Fig. 88 Barra de CHEM – ROD® una vez instalada.

Cabe destacar que el diseño dispuesto en anillo no favorece la conducción de las corrientes a tierra, debido a que el área del mismo facilita la exposición a campos cercanos, dando origen a corrientes inducidas (corrientes parásitas), las cuales podrían incorporar grandes perturbaciones al sistema.

Como parte del diseño de puesta a tierra se cuenta con una tanquilla de distribución, que se muestra en la figura 89, a la que originalmente se conectan las barras de tierra.

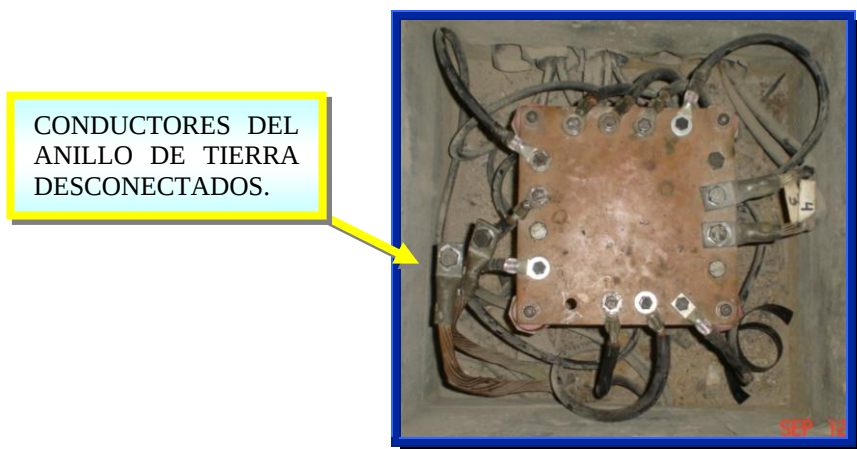


Fig. 89 Tanquilla de distribución del sistema de puesta a tierra de la Jaula de Faraday.

En la tanquilla de distribución se observó que:

- ✗ Llegan todos los cables, tanto de energía, medición y puesta a tierra, al igual que el blindaje de la Jaula, exponiendo a los equipos sensibles, en este caso al detector de descargas parciales, a todas las corrientes parásitas que en ese punto desembocan.
- ✗ La tanquilla se encuentra intencionalmente desconectada del sistema de puesta a tierra.
- ✗ El hecho de que la tierra no esté conectada, genera un nodo entre las conexiones de puesta a tierra que llegan a dicha tanquilla, lo cual hace que todas aquellas corrientes parásitas provenientes de cada uno de los equipos que deberían drenarse en la tierra se redistribuyan hacia otros equipos, creándose de esta manera un grave problema de perturbaciones por conducción.

Medición de la resistencia de puesta a tierra

Para realizar la medición de la resistencia de las barras de puesta a tierra, se implementará el método clásico de tres electrodos o comúnmente llamado “de caída de tensión”. El método consiste en inyectar corriente a través de un electrodo de prueba denominado “de corriente” y medir el potencial mediante otro electrodo auxiliar denominado “de potencial”. Conocido el valor

de tensión y el valor de corriente, el equipo de medición, llamado HERAT TESTER TYPE, MARCA (YEW), obtendrá mediante ley de Ohm el valor de resistencia. Los tres electrodos se deben mantener en una línea recta. En la figura 90 se muestra el esquema de medición del método antes descrito.

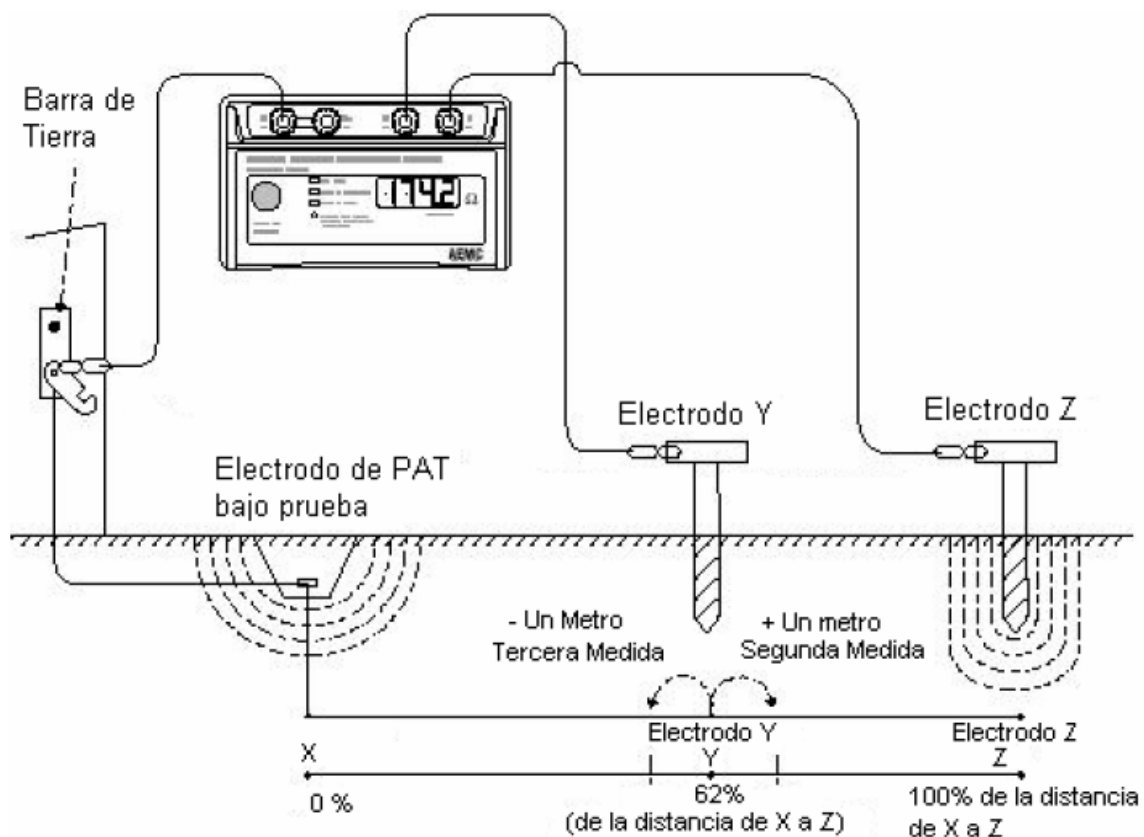


Fig. 90 Disposición de los electrodos para medir la resistencia de puesta a tierra.

Siendo:

A: punto de malla a tierra (electrodo o conductor)

P: electrodo de potencial

B: electrodo de corriente

Resultados de la medición de resistencia del Sistema de Puesta a Tierra

En la figura 91, se observa la distancia real que existe entre las barras CHEM – ROD® y los electrodos de medición del laboratorio. Estos electrodos ya están colocados de manera permanente para efecto de futuras mediciones de la resistencia de puesta a tierra de la Jaula de Faraday.

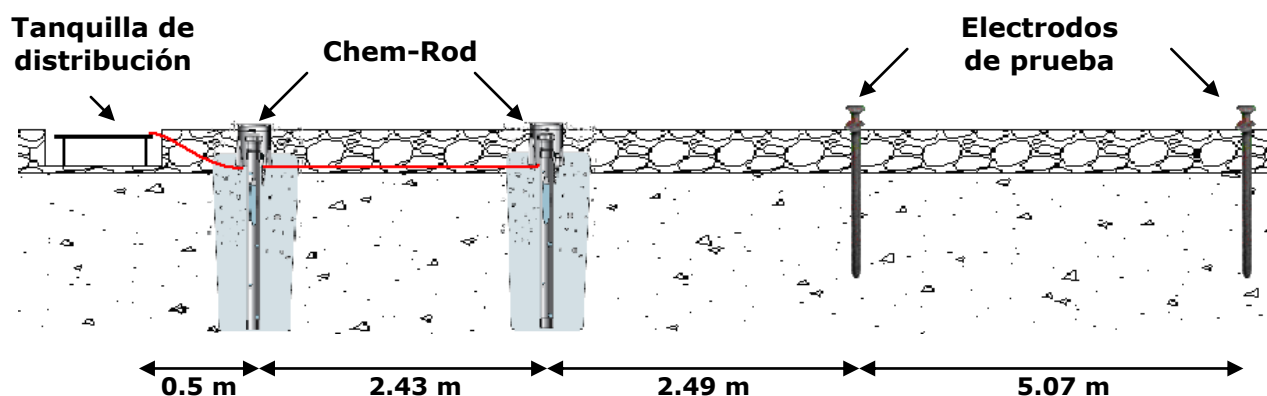


Fig. 91 Esquema físico de la ubicación de las barras Chem – Rod® y los electrodos de medición.

La tabla III contiene los resultados de las mediciones de la resistencia de las barras CHEM – ROD® que se realizaron.

Tabla III.

Valores de resistencia de las barras del sistema de puesta a tierra

UBICACIÓN	MEDICIÓN N°1	MEDICIÓN N°2
Chem – Rod® 1	5.48 Ω	5.45 Ω
Chem – Rod® 2	5.49 Ω	5.49 Ω

Fuente: Coronel & Orellana, 2007.

INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Luego de realizar el estudio de la prueba, conocer el proceso y función de detección de descargas parciales, analizar de manera cualitativa la inmunidad de la Jaula de Faraday, y estudiar las conexiones eléctricas y la puesta a tierra del sistema, se observó que el incumplimiento de las normas eléctricas (CEN y IEEE) a nivel de la ubicación de las conexiones eléctricas y el diseño de puesta a tierra es lo que presuntamente está contribuyendo con las perturbaciones detectadas por el equipo detector de descargas parciales, lo cual expone su funcionamiento y, a su vez, disminuye el nivel de confiabilidad que la empresa ARALVEN S.A. mantiene en la calidad de sus productos.

De esta manera, y sustentados en la investigación antes expuesta, se decidió ofrecer como propuesta de solución al problema de interferencias que presenta dicha empresa, un diseño completo de un nuevo sistema de puesta a tierra y reubicación de las conexiones eléctricas, que cumpla con las normativa eléctrica exigidas y por tanto asegurando la disminución de las perturbaciones electromagnéticas presentes en el equipo de descargas parciales ubicado en la empresa ARALVEN S.A.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

La propuesta planteada en este proyecto se realizó para solucionar la problemática de las interferencias electromagnéticas que están afectando las mediciones del equipo detector de descargas parciales de la empresa ARALVEN S.A. desde hace algunos años, además de poder identificar las posibles causas del mismo y así prevenir hechos similares.

En primer lugar, se realizó una investigación previa, la cual fue relevante, ya que de allí se conoce que la estructura del laboratorio de alta tensión (Jaula de Faraday) cumple en gran parte con las características ideales, en cuanto al material del blindaje, unión eléctrica y recubrimiento del blindaje y, a su vez, se sustenta la propuesta y recomendaciones relacionadas con las mejoras en el conexionado eléctrico y el sistema de puesta a tierra.

El estudio del conexionado eléctrico fue específicamente una evaluación del circuito de alimentación y medición, al igual que de la fosa de radiofrecuencia ubicada en el cubículo de control.

El circuito de alimentación no cuenta con una puesta a tierra adecuada, que facilite el retorno de cualquier corriente de falla a la fuente de manera efectiva, además de no poseer el neutro conectado a tierra en la fuente principal de alimentación.

Los equipos de medición tienen su referencia de tensión conectada a la puesta a tierra del sistema en general, lo que implica que el equipo sensitivo (detector de descargas parciales), detecte no solo la descarga en el cable, sino también todas las corrientes de tierra que desembocan en ese punto que, a su vez, es un nodo, ya que la tanquilla de distribución que los

une, no se encuentran intencionalmente conectada al sistema de puesta a tierra del laboratorio de alta tensión.

En la fosa de radiofrecuencia, los cables de distintas naturaleza se encuentran ubicados de tal forma que facilitan la creación de acoplamientos por campos cercanos e incumpliendo algunas de las practicas recomendadas por IEEE, Std 1100-1999 en relación a conexiones de equipos electrónicos.

Por otro lado, la estructura de la Jaula de Faraday que blindo el laboratorio de alta tensión, se encuentra conectada a la tanquilla de distribución, lo cual se presume esté interfiriendo en las mediciones, ya que las corrientes parásitas que en ella se induzcan se estarían drenando también en dicho nodo.

El diseño actual del sistema de puesta a tierra no cuenta con las condiciones apropiadas para el ambiente en el cual se encuentra, ya que posee un anillo de cuatro vueltas de un conductor de gran diámetro (# 4/0) en el centro de las instalaciones, que se presume sea una de las causas mas importantes del problema, ya que, además de estar induciendo corrientes de manera radial, también se demostró por pruebas hechas en el laboratorio, que posee grandes corrientes parásitas inducidas en el mismo y, por esto, se encuentra actualmente desconectado de la tanquilla de distribución. Cabe destacar que dicha desconexión es lo que hace que este punto de unión de todas las corrientes de puesta a tierra del sistema y referencias de tensión, sea actualmente un nodo en el cual dichas corrientes se redistribuyen hacia los demás equipos, afectando directamente las mediciones realizadas por el equipo sensitivo.

La propuesta permitirá cumplir con los requerimientos necesarios para el buen funcionamiento del ensayo, tomando en consideración las observaciones planteadas que se presume estén colaborando con el problema y basada en las normas del código eléctrico nacional y las prácticas recomendadas por el estandar IEEE.

Este diseño consta de una gama de recomendaciones, aunado con esquemas físicos de las instalaciones eléctricas, sistema de puesta a tierra, entre otros, para así dejar de manera clara y visual la propuesta que aspira cumplir con los objetivos planteados desde el comienzo de esta investigación.

Cabe destacar que dicho diseño entra en concordancia con lo planteado en el Manual del equipo detector de descargas parciales y es un esquema híbrido de la interconexión entre dispositivos de distintas marcas, pero con un mismo fin, detectar de manera precisa las descargas parciales que puedan existir en el aislamiento del cable de potencia u objeto de prueba.

RECOMENDACIONES

JAULA DE FARADAY:

-  Realizar el mantenimiento de las pletinas flexibles que se encuentran deterioradas o inexistentes.
-  Remover el cable que se encuentra dispuesto para conectar la barra de tierra externa.
-  Asegurar que en la estructura de la Jaula de Faraday no se realicen cavidades que degraden el blindaje electromagnético.
-  Evitar la instalación de cables salientes a la Jaula de Faraday a excepción de los cables de alimentación principal.
-  Realizar el respectivo mantenimiento periódico del blindaje, asegurando la continuidad eléctrica de la misma, para evitar la corrosión de la Jaula de Faraday.
-  Evitar la humedad excesiva en la Jaula (derrame de agua, aceites, líquidos, etc.).
-  Evitar el uso lámparas fluorescentes dentro de la Jaula de Faraday.

CONEXIONES ELÉCTRICAS:

-  Prohibir la conexión de cualquier equipo o elemento a la red de referencia del circuito de medición sin un estudio previo y, además, autorizado por la gerencia de la empresa.

- ⚡ Evitar la conexión de nuevos circuitos ramales en la fuente de alimentación y/o tablero que puedan facilitar la creación de acoplamientos.
- ⚡ Evitar el deterioro de los cables coaxiales inspeccionándolos periódicamente.
- ⚡ Asegurar la continuidad eléctrica entre las distintas conexiones eléctricas del sistema.

SISTEMA DE PUESTA A TIERRA:

- ⚡ Evitar falsos contactos al sistema de puesta a tierra. Revisar los contactos periódicamente.
- ⚡ Prohibir la instalación de nuevos sistemas de puestas a tierras aislados.
- ⚡ Inspeccionar el nivel de sales conductoras que se encuentran depositadas en las barras Chem-Rod, anualmente.
- ⚡ Realizar mediciones de la resistencia de la toma de tierra en intervalos periódicos, para evitar llegar a valores de resistencia poco convenientes para instalaciones como el laboratorio de alta tensión.