

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“Estudio de Compatibilidad Electromagnética
en Subestaciones de Potencia”**

POR

Ing. Manuel Gutiérrez Tovar

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

DIRECTORA DE TESIS

Dr. Victor Manuel Cabrera Moreles

ISSN: 0188-9060



RIITEC: (13)-TMCIE-2015

Torreón, Coahuila, México
Diciembre 2015

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de La Laguna

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

Torreón, Coah., 07/Diciembre/2015

Dependencia: DEPI/CPCIE

Oficio: DEPI/CPCIE/224/2015

Asunto: Autorización de impresión
de tesis.

C. Manuel Gutiérrez Tovar
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.
PRESENTE

Después de haber sometido a revisión su trabajo de tesis titulado:

"Estudio de compatibilidad electromagnética en subestaciones de potencia"

Habiendo cumplido con todas las indicaciones que el jurado revisor de tesis hizo, se le comunica que se le concede la autorización con número de registro **RIITEC: (13)-TMCIE-2015**, para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE
EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACION

DR. JOSÉ LUIS MEZA MEDINA
Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación
del Instituto Tecnológico de la Laguna



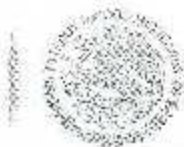
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO
de la Laguna
División de Estudios de Posgrado
e Investigación

11MM/RHSR



Blvd. Revolución, y Cda. Cuauhtémoc s/n Col. Centro C.P. 27000
Torreón, Coah. Tel. 705 1313. e-mail: wmaster@itlalaguna.edu.mx
www.itlalaguna.edu.mx





"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

Torreón, Coah., 30/Noviembre/2015

DR. JOSE LUIS MEZA MEDINA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Por medio de la presente, hacemos de su conocimiento que después de haber sometido a revisión el trabajo de tesis titulado:

"Estudio de compatibilidad electromagnética en subestaciones de potencia"

Desarrollado por el **C. Manuel Gutierrez Tovar**, con número de control **M1313066** y habiendo cumplido con todas las correcciones que se le indicaron, estamos de acuerdo que se le conceda la autorización de la fecha de examen de grado para que proceda a la impresión de la misma.

ATENTAMENTE

EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACIÓN

Dr. Víctor M. Cabrera Morelos
Asesor / Director de Tesis
Dr. Francisco S. Sellschopp Sánchez
Comité Tutorial
Dr. Marco A. Arjona López
Comité Tutorial
M.C. Carlos A. Morales Bazán
Comité Tutorial

Dedicatoria

Este trabajo es dedicado a toda mi familia mamá, papá y hermanos de quienes siempre he recibido apoyo, consejos y enseñanzas. Y una dedicatoria especial mi sobrino Mateo en quien encontré una nueva motivación.

Agradecimientos

Al igual que dedico este trabajo a mi familia también les agradezco por creer en mí, por creer que soy capaz de hacer las cosas a pesar de mis dudas.

Al CONACYT por darme la oportunidad y la ayuda para poder realizar esta maestría, al igual agradezco al Instituto Tecnológico de la Laguna por todas las enseñanzas que me ha proporcionado.

A mi asesor de tesis Dr. Víctor Manuel Cabrera Morelos por su apoyo, enseñanzas y consejos a lo largo del posgrado.

A todos mis profesores, trabajadores de posgrado y a mis compañeros los cuales fueron de gran ayuda e hicieron de esto una gran experiencia, me gustaría nombrarlos a todos pero son muchos, ustedes saben a quienes me refiero.

Y para terminar gracias a ti lector que te interesaste en leer mi trabajo.

A todos los nombrados y no nombrados:

¡GRACIAS TOTALES!

Resumen

Esta tesis forma parte de un estudio sobre ruidos electromagnéticos que pueden existir dentro de una subestación de potencia. Identifica problemas, presenta simulaciones y propone soluciones referentes a compatibilidad electromagnética entre dispositivos electrónicos y una subestación de potencia cercana. Se identifican los parámetros, condiciones físicas y electromagnéticas, que son de importancia en la generación de ruidos eléctricos. Un caso práctico es presentado en el cual hubo daños a equipos electrónicos inteligentes (IED) localizados dentro de una subestación encapsulada en SF6 de 115 kV. Estos daños fueron generados por ruidos eléctricos que se originaron al operar interruptores dentro de una subestación aledaña de distribución (13.8kV). Por otra parte también se proponen algunas soluciones con el uso de descargadores MOV's para que se tenga un ambiente electromagnético adecuado entre ambos sistemas.

Palabras claves: Interferencias electromagnéticas, compatibilidad electromagnética en sistemas de potencia, transitorios electromagnéticos, interruptores de potencia, aplicación de ATP.

Abstract

This thesis is part of a study on electromagnetic noise that can exist in a power substation. Identifies problems, presents simulations and proposes solutions related to electromagnetic compatibility between electronic devices and a nearby power substation. Parameters, physical and electromagnetic conditions, that are important in the generation of electrical noise are identified. A practical case is submitted in which damage to intelligent electronic devices (IED) are presented, these devices are located inside a 115 kV insulated substation in SF6. Such damages are generated by electrical noise that arise when switches operated inside a nearby distribution substation (13.8kV). Furthermore, possible solutions using MOV's arresters are also presented for a suitable electromagnetic environment between the two systems.

Keywords: Electromagnetic interference, electromagnetic compatibility in power systems, electromagnetic transients, disconnecter switch, application of ATP.

Índice general

| | |
|--|----------|
| AGRADECIMIENTOS | II |
| RESUMEN | III |
| ABSTRACT | III |
| ÍNDICE GENERAL | IV |
| ÍNDICE DE FIGURAS | VII |
| ÍNDICE DE TABLAS | IX |
| | |
| CAPÍTULO I | I |
| | |
| INTRODUCCIÓN | |
| | |
| 1.1 Objetivo | 2 |
| 1.2 Justificación | 2 |
| 1.3 Contenido de la Tesis | 2 |
| | |
| CAPÍTULO II | 4 |
| | |
| PRINCIPIOS Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA | |
| | |
| 2.1 Introducción | 5 |
| 2.2 Fuente, acoplamientos y receptores de EMI | 5 |
| 2.3 Tipos de interferencias | 6 |
| 2.4 Sobre compatibilidad electromagnética | 8 |
| 2.4.1 Causas de EMI | 10 |
| 2.4.2 Esquema de EMC | 11 |
| 2.5 Fuentes de interferencia | 12 |
| 2.5.1 Imperfecciones en componentes pasivos | 12 |
| 2.5.2 Transitorios, conmutaciones y descargas | 16 |
| 2.6 Acoplamiento de las interferencias | 17 |
| 2.6.1 Acoplamiento por trayectorias conducidas | 19 |
| 2.6.1.1 Transferencia resistiva | 20 |
| 2.6.1.2 Transferencia inductiva | 21 |
| 2.6.1.3 Transferencia capacitiva | 24 |
| 2.6.2 Acoplamiento por radiación | 27 |
| 2.7 Índice de susceptibilidad de componentes y circuitos electrónicos | 28 |
| 2.8 Blindajes o pantallas | 30 |
| 2.8.1 La efectividad de los blindajes | 34 |
| 2.8.2 Blindajes contra el acoplamiento capacitivo (eléctrico) | 37 |
| 2.8.3 Blindajes contra el acoplamiento inductivo (magnético) | 37 |
| 2.8.4 Blindajes contra el acoplamiento por radiación | 38 |
| 2.9 EMC en instalaciones de potencia | 39 |
| 2.9.1 Clasificación de señales y ambientes | 39 |

| | |
|---|------------|
| 2.9.2 EMC en instalaciones de alta tensión..... | 41 |
| CAPÍTULO III | 43 |
| IDENTIFICACIÓN DE ALGUNOS PROBLEMAS LOCALES EN SUBESTACIONES DE POTENCIA. | |
| 3.1 Introducción..... | 44 |
| 3.2 Fallas en el sistema SCADA localizado en subestación encapsulada (SF6)..... | 46 |
| 3.3 Fallas en el sistema Alcatel-Lucent OmniPCX Office localizado en subestación aérea..... | 50 |
| 3.4 Otros problemas..... | 53 |
| CAPÍTULO IV | 54 |
| LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN Y MODELADO DE EQUIPOS Y SUBESTACIONES | |
| 4.1 Introducción..... | 55 |
| 4.2 Información y modelado general de la alimentación de los equipos..... | 55 |
| 4.3 Información y modelado de la línea..... | 59 |
| 4.4 Información y modelado de interruptor..... | 65 |
| 4.5 Información y modelado de la fuente de alimentación..... | 67 |
| 4.6 Información y modelado del transformador de alta a baja tensión..... | 68 |
| 4.7 Información y modelado de fuente rectificadora y carga..... | 71 |
| CAPÍTULO V | 74 |
| ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN | |
| 5.1 Introducción..... | 75 |
| 5.2 Simulaciones en estado estable..... | 75 |
| 5.3 Simulaciones en estado transitorio..... | 79 |
| 5.4 Propuesta para la solución de problemas..... | 88 |
| 5.4.1 Modelación del apartarrayos utilizado en alta tensión..... | 89 |
| 5.4.2 Resultados de simulaciones al incluir los descargadores..... | 92 |
| CAPÍTULO VI | 99 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | |
| 6.1 Conclusiones..... | 100 |
| 6.2 Recomendaciones..... | 101 |
| ANEXOS | 102 |
| Anexo A: Características de conductores..... | 102 |

| | |
|--|------------|
| Anexo B: Cálculo de los valores de resistencia e inductancia de las catgas RL..... | 103 |
| Anexo C: Descargadores de sobretensiones transitorias. | 105 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 110 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Partes principales en todo fenómeno de interferencia electromagnética. | 5 |
| Figura 2.2 Trayectorias de acoplamiento. | 11 |
| Figura 2.3 Modelo equivalente para una resistencia de composición de carbón. | 13 |
| Figura 2.4 Modelo equivalente para una resistencia de hilo de bobinado. | 13 |
| Figura 2.5 Modelo equivalente para un condensador. | 14 |
| Figura 2.6 Modelo equivalente para una bobina con núcleo de aire. | 15 |
| Figura 2.7 Modelo equivalente para una bobina con núcleo magnético. | 15 |
| Figura 2.8. Caminos de acoplamientos. | 18 |
| Figura 2.9 Diferencias conceptuales entre trayectorias conducidas y radiadas. | 19 |
| Figura 2.10 Transferencia resistiva. | 20 |
| Figura 2.11 Acoplamiento entre circuitos causado por una trayectoria de impedancia de retorno común. | 21 |
| Figura 2.12 Transferencia inductiva. | 22 |
| Figura 2.13 Parámetros geométricos para inductancia mutua entre dos circuitos. | 24 |
| Figura 2.14 Transferencia capacitiva. | 25 |
| Figura 2.15 Blindajes según su función. | 31 |
| Figura 2.16 Características de campo según la distancia entre fuente y receptor. | 32 |
| Figura 2.17 Intensidades de campos según el tipo de fuente y de la distancia. | 34 |
| Figura 2.18 Mecanismos de atenuación de campos electromagnéticos. | 35 |
| Figura 3.1 Diagrama a bloques de las conexiones de la subestación Gómez Palacio | 45 |
| Figura 3.2 IED modelo D25 de General Electric. | 47 |
| Figura 3.3 Diagrama unifilar de subestación GPI de SF6. | 48 |
| Figura 3.4 Alimentación de dispositivos D25's. | 49 |
| Figura 3.5 Plataformas para el sistema de comunicación. | 51 |
| Figura 4.1 Diagrama unifilar de la subestación Francke donde se muestra la línea 4100. | 56 |
| Figura 4.2 Imagen de fotografía de la línea 4100. | 57 |
| Figura 4.3 Modelo de la línea 4100 en ATP. | 58 |
| Figura 4.4 Secciones de línea de bus 1 a interruptor 4100. | 60 |
| Figura 4.5 Secciones de línea de interruptor 4100 a caseta en SF6. | 61 |
| Figura 4.6 Pestaña "Model" del bloque LCC del ATP para la línea 4100. | 64 |
| Figura 4.7 Pestaña "Data" del bloque LCC del ATP para la línea 4100. | 64 |
| Figura 4.8 Interruptores trifásicos que representan la apertura o cierre del interruptor (encerrados en verde). | 65 |
| Figura 4.9 Interruptores monofásicos que representan el arco que se produce al operar la cuchilla (encerrados en verde). | 66 |
| Figura 4.10 Símbolo de fuente de tensión de 13.8 kV. | 67 |
| Figura 4.11 Pestaña "Attributes" del bloque Ac3ph del ATP para la línea 4100. | 68 |
| Figura 4.12 Conexión de la línea 4100 con transformador de 300kVA. | 69 |
| Figura 4.13 Transformador 13.8kV/120V, 300kVA. | 70 |
| Figura 4.14 Transformador ideal trifásico. | 71 |
| Figura 4.15 Cargas y fuentes rectificadores. | 72 |

| | |
|---|-----|
| <i>Figura 5.1 Tensión en la fuente trifásica.</i> | 75 |
| <i>Figura 5.2 Tensión después del transformador de 300kVA.</i> | 76 |
| <i>Figura 5.3 Tensión después del transformador.</i> | 77 |
| <i>Figura 5.4 Tensión rectificadora.</i> | 78 |
| <i>Figura 5.5 Corriente rectificadora.</i> | 79 |
| <i>Figura 5.6 Tensión en la fuente trifásica (bajo estado transitorio).</i> | 80 |
| <i>Figura 5.7 Tensión a 20 metros de la fuente.</i> | 81 |
| <i>Figura 5.8 Acercamiento a la alta frecuencia debida al arco eléctrico fase A.</i> | 82 |
| <i>Figura 5.9 Transitorio generado por la apertura del interruptor 4100 fase A.</i> | 83 |
| <i>Figura 5.10 Acercamiento al transitorio generado por la apertura del interruptor 4100 en fase A.</i> | 84 |
| <i>Figura 5.11 Transitorio generado en la parte de baja tensión por la apertura del interruptor 4100 fase A.</i> | 85 |
| <i>Figura 5.12 Acercamiento al transitorio generado en baja tensión por la apertura del interruptor 4100 en fase A.</i> | 86 |
| <i>Figura 5.13 Señal de tensión rectificadora con transitorio.</i> | 87 |
| <i>Figura 5.14 Acercamiento a la señal de tensión rectificadora.</i> | 88 |
| <i>Figura 5.15 Descargador PDV-65. MCOV 15.3 kV.</i> | 89 |
| <i>Figura 5.16 Modelado de descargadores en ATP.</i> | 90 |
| <i>Figura 5.17 Datos I-V para descargador.</i> | 91 |
| <i>Figura 5.18 Curva I-V de descargador.</i> | 91 |
| <i>Figura 5.19 Señal de tensión antes del transformador 300 kVA con la inclusión de descargadores.</i> | 92 |
| <i>Figura 5.20 Acercamiento al transitorio de la figura 5.19.</i> | 93 |
| <i>Figura 5.21 Señal de tensión en la parte de bajo voltaje con la inclusión de descargadores.</i> | 94 |
| <i>Figura 5.22 Acercamiento al transitorio de la figura 5.23.</i> | 95 |
| <i>Figura 5.23 Señal rectificadora que alimenta a los equipos IED (48 Vcd).</i> | 96 |
| <i>Figura 5.24 Acercamiento al transitorio de la figura 5.21.</i> | 96 |
| <i>Figura 5.25 Circuitos de protección.</i> | 97 |
| <i>Figura 5.26 Circuito de protección usado contra descargas atmosféricas.</i> | 98 |
| <i>Figura C.1 Curva característica V-I de MOV de 130V.</i> | 106 |
| <i>Figura C.2 Representación eléctrica de un varistor.</i> | 107 |
| <i>Figura C.3 Representación eléctrica de un varistor en modo de fuga.</i> | 107 |
| <i>Figura C.4 Representación eléctrica de un varistor en modo de operación normal.</i> | 108 |
| <i>Figura C.5 Representación eléctrica de un varistor en modo de operación Superior.</i> | 108 |

Índice de Tablas

| | |
|--|-----|
| <i>Tabla 2.1 Causas de EMI internas.</i> | 10 |
| <i>Tabla 2.2 Causas de EMI externas.</i> | 10 |
| <i>Tabla 2.3 Índice de susceptibilidad para distintos tipos de circuitos receptores de interferencias.</i> | 29 |
| <i>Tabla 2.4 Resumen de características de efectividad de los blindajes sólidos, sin tener en cuenta las posibles discontinuidades debidas a ranuras o juntas.</i> | 36 |
| <i>Tabla 2.5 Clases de señales según su susceptibilidad.</i> | 40 |
| <i>Tabla 2.6 Clasificación de ambientes según nivel de perturbación</i> | 40 |
| <i>Tabla 3.1 Módulos que se utilizan según la plataforma.</i> | 52 |
| <i>Tabla 4.1 Características de la línea 4100.</i> | 59 |
| <i>Tabla 4.2 Valores ingresados en la sección "System Type" de la pestaña Model del bloque LCC del ATP.</i> | 62 |
| <i>Tabla 4.3 Valores ingresados en la sección "Standard Data" de la pestaña Model del bloque LCC del ATP.</i> | 62 |
| <i>Tabla 4.4 Valores ingresados en la sección "Data" de la pestaña Model del bloque LCC del ATP.</i> | 63 |
| <i>Tabla 4.5 Valores ingresados en la sección "Switch Time-controlled" del ATP.</i> | 66 |
| <i>Tabla 4.6 Valores ingresados en la sección "Switch Voltage-controlled" del ATP.</i> | 67 |
| <i>Tabla 4.7 Valores ingresados en la sección "Diode" del ATP.</i> | 73 |
| <i>Tabla 5.1. Características eléctricas para descargador.</i> | 89 |
| <i>Tabla A.1 Características de cable de aluminio y acero reforzado (ACSR)</i> | 102 |

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivo

El objetivo principal de este proyecto es ampliar el conocimiento en la generación de ruidos y acoplamientos electromagnéticos a equipos sensibles. Se hará énfasis en el estudio de problemas reales que se presentan en dispositivos electrónicos debido a interferencias electromagnéticas generadas en subestaciones de potencia aldeañas. Se pretende tener la comprensión del porque se producen estos problemas, poder dar una orientación de ellos y poder presentar soluciones para tener un mejor ambiente electromagnético para los equipos.

1.2 Justificación

Existen casos donde las interferencias electromagnéticas conducen a problemas técnicos en equipos de cualquier tipo y que fallas en éstos también pueden generar mayores percances en otro nivel de dispositivos, algo que provoca pérdida de tiempo y sobre todo pérdidas monetarias a empresas, dueños e incluso a nivel doméstico.

Actualmente en la empresa Comisión Federal de Electricidad se han presentado problemas con interferencias electromagnéticas en equipos electrónicos de control, supervisión y comunicación que se localizan dentro de subestaciones de potencia, provocando daño en estos equipos, desde bloqueos hasta daños físicos de los dispositivos. Se ha propuesto modelar la alimentación de los aparatos para conocer las señales que interfieren con su funcionamiento, así como una solución a estos problemas de compatibilidad electromagnética.

1.3 Contenido de la tesis

Esta tesis se encuentra dividida en 6 capítulos, los cuales son descritos a continuación:

Capítulo 1: Introducción. En este capítulo se presentan los objetivos y las diferentes problemáticas de la tesis.

Capítulo 2: Principios y fundamentos teóricos de la compatibilidad electromagnética. En este capítulo se describe la teoría sobre interferencias electromagnéticas, sus acoplamientos, susceptibilidad electromagnética en equipos electrónicos.

Capítulo 3: Identificación de algunos problemas locales en subestaciones de potencia. En esta sección se muestran los problemas que se han presentado en diferentes subestaciones de Comisión Federal de Electricidad.

Capítulo 4: Levantamiento de información y modelado de equipos y subestaciones. En este capítulo se describe como se modela cada uno de los elementos que conforman la alimentación de los equipos en el software ATP.

Capítulo 5: Análisis de los resultados de la simulación. En este capítulo se describe el análisis de los resultados observados en cada una de las diferentes simulaciones realizadas.

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones. Por último en este capítulo se analizan los resultados obtenidos además de presentar las conclusiones del proyecto. Se sugieren trabajos futuros para profundizar más en el tema.

CAPÍTULO II
PRINCIPIOS Y FUNDAMENTOS
TEÓRICOS DE LA
COMPATIBILIDAD
ELECTROMAGNÉTICA

2.1 Introducción.

Las interferencias electromagnéticas (EMI) se pueden definir como señales de tipo electromagnético que perturban no intencionadamente el funcionamiento normal de un sistema eléctrico o electrónico, afectando a las magnitudes eléctricas o magnéticas (tensión, corriente o campo electromagnético) de sus circuitos. Dos importantes excepciones a esta definición son la distorsión provocada por las no linealidades en un circuito y los ruidos de tipo térmico en los componentes. Cuando las interferencias perturban el funcionamiento de cualquier equipo electrónico, incapacitándolo para realizar la misión para la que fue diseñado, con riesgo para la seguridad de instalaciones y personas en caso de fallos, plantea un grave problema, tanto técnico como comercial [3].

2.2 Fuentes, acoplamientos y receptores de EMI.

El estudio de los distintos tipos, orígenes, medios de propagación e influencias que las interferencias pueden ejercer sobre otros circuitos distintos de los que las generan, abarca una serie de conceptos muy diversos. Para facilitar la comprensión de dichos conceptos, todo análisis de un problema de interferencias se divide en las siguientes partes:

- Origen, fuente o generador de las interferencias.
- Medios de propagación o caminos de acoplamiento de las interferencias.
- Receptores afectados por las interferencias.

Así, para que las interferencias sean un problema, debe existir un generador de perturbaciones, un circuito afectado por ellas o receptor que sea susceptible a las EMI y un camino de acoplamiento que las transmita al circuito afectado (Figura 2.1). Los modos de acoplamientos de propagación son: por conducción, con unidades de tensión e intensidad; y por radiación electromagnética, magnética (acoplamiento inductivo) o eléctrica (acoplamiento capacitivo) medidas en unidades de campo[3].



Figura 2.1 Partes principales en todo fenómeno de interferencia electromagnética. [3]

Siempre que uno se enfrente a un problema de EMI, debe analizar cuál es la fuente de interferencia, cuál es el receptor y cuál es el camino de acoplamiento entre ellos.

En general, son afectados por las EMI todos aquellos dispositivos, equipos o sistemas que sufren los efectos de las perturbaciones, viendo de alguna forma alterado su funcionamiento o sus características, o llegando incluso a su destrucción.

Las Normas y Recomendaciones sobre interferencias suelen distinguir entre los distintos tipos de receptores afectados y distintas categorías o Clases de efectos. Los tipos de receptores son :

- a) Dispositivos, entendiendo como tales los elementos o componentes más simples que intervienen en un sistema.
- b) Equipos, que son conjuntos funcionales destinados a desempeñar alguna función concreta.
- c) Sistemas, o conjuntos de equipos destinados a realizar tareas o procesos más complejos.

Y las clases de efectos son:

Clase 0: No se produce mal funcionamiento del equipo o dispositivo. La perturbación no influye.

Clase A: La perturbación produce efectos aceptables, pero no altera el funcionamiento del equipo o dispositivo.

Clase B: La perturbación altera temporalmente el funcionamiento del equipo o dispositivo, pero éste no sufre efectos irreversibles, pudiendo funcionar de nuevo sin intervención técnica.

Clase C: La perturbación altera el funcionamiento del equipo o dispositivo, haciendo necesaria la intervención técnica para volver a funcionar.

Clase D: La perturbación produce daños irreversibles en el equipo o dispositivo, quedando irrecuperable.[3]

2.3 Tipos de interferencias.

Las interferencias electromagnéticas pueden clasificarse atendiendo varios conceptos.

Según la respuesta del sistema interferido, las EMI pueden clasificarse en: activas, cuando dan lugar a respuestas del sistema como si éste hubiese recibido una señal válida de control o pasivas cuando una señal válida de control es invalidada a causa de las EMI.[3]

Si se clasifican según su origen, las perturbaciones pueden ser:

- a) Naturales, tales como las producidas por descargas atmosféricas, descargas electrostáticas (ESD), ruido cósmico, radiaciones naturales, etc.
- b) Provocadas o artificiales, cuando se originan como consecuencia del funcionamiento de otros dispositivos o sistemas eléctricos.

Si se clasifican según el medio de propagación, pueden ser:

- a) Conducidas, cuando el medio de propagación es un conductor eléctrico que une la fuente con el receptor afectado. (Cables de alimentación o de señal, cables de protección, pantallas, chasis metálico, conductores de puesta a tierra, etc.)
- b) Radiadas. Cuando la propagación se efectúa a través de campos electrostáticos o electromagnéticos.
- c) Acopladas; se incluye lo que se denomina habitualmente como acoplamiento capacitivo o inductivo entre conductores próximos, ya que dicho acoplamiento se efectúa, de hecho, a través de un campo eléctrico o magnético.

La diferencia entre EMI radiadas y acopladas está en la comparación entre la distancia de propagación y la longitud de onda de la perturbación, empleándose el término radiación para campo lejano y el término acoplamiento para campo cercano. Así pues, se tendrá radiación cuando:

$$\text{La distancia de propagación} \gg \text{longitud de onda} / 2\pi$$

Y se tendrá acoplamiento capacitivo o inductivo cuando:

$$\text{La distancia de propagación} \ll \text{longitud de onda} / 2\pi$$

Los tipos de perturbaciones o interferencias, métodos de medición y límites tolerados por la Normativa internacional, se establecen en función de la banda de frecuencias de interferencia ya que, en gran medida, la facilidad de propagación depende de dicho parámetro. Atendiendo a dichas Normas y según la frecuencia, las perturbaciones se pueden clasificar en los siguientes grupos.

- a) Perturbaciones de baja frecuencia $f < 10\text{kHz}$: Dentro de este grupo se encuentran la mayor parte de las perturbaciones transmitidas por la red y las fuentes de alimentación, cuya propagación tiene lugar básicamente por conducción.
- b) Perturbaciones en la banda de 10kHz a 150kHz : En esta banda se producen EMI debidas principalmente a impulsos de intensidad y fenómenos transitorios de

tensión producidos por la conmutación de relés, interruptores u otros dispositivos electromecánicos, así como convertidores estáticos (equipos de tiristores, fuentes conmutadas, etc.) cuya propagación suele producirse por un mecanismo combinado de acoplamiento y conducción.

- c) Perturbaciones en la banda de *150kHz a 30MHz*: El origen de este tipo de perturbaciones suele ser el mismo que se ha mencionado en el grupo *b)*, pero en este caso la propagación tiene lugar fundamentalmente por radiación y acoplamiento.
- d) Perturbaciones en la banda de *30MHz a 300MHz*: El medio de propagación de este tipo de EMI es básicamente por radiación.
- e) Perturbaciones en la banda de *500MHz a 18GHz*: El origen de estas perturbaciones suelen ser los equipos de comunicaciones o los propios circuitos lógicos de conmutación muy rápida y el medio de propagación principal es la radiación.

Según la tasa de repetibilidad las perturbaciones pueden clasificarse en:

- a) Continuas, formadas por interferencias aleatorias o impulsos con una duración total superior a 200 ms.
- b) Discontinuas, formadas por interferencias aleatorias o impulsos cuya duración total no excede de 200 ms.

Desde el punto de vista de la propagación y según la forma de captación en el circuito afectado, podemos distinguir dos tipos de interferencias:

- a) Interferencias simétricas o de modo diferencial. Denominadas así cuando la perturbación produce tensiones y/o corrientes diferenciales entre los conductores activos superponiéndose, por tanto, la interferencias directamente sobre la señal útil.
- b) Interferencias asimétricas o de modo común. Denominadas así cuando las perturbaciones producen tensiones y/o corrientes de modo común entre los conductores activos y el conductor de retorno o común. La perturbación asimétrica siempre suele generar una perturbación simétrica[3].

2.4 Sobre compatibilidad electromagnética.

La compatibilidad electromagnética (también conocida por sus siglas CEM o EMC) es la rama de la tecnología electrónica y de telecomunicaciones que se ocupa de las interferencias entre equipos eléctricos y electrónicos. Se define (según la normativa internacional recogida en el Informe Técnico de la Comisión Electrotécnica Internacional 61000-1-1) como "la capacidad de cualquier aparato, equipo o sistema para funcionar de forma satisfactoria en su entorno electromagnético sin provocar perturbaciones electromagnéticas sobre cualquier cosa de ese entorno". Dispositivos eléctricos y

electrónicos se dicen ser electromagnéticamente compatibles cuando el ruido eléctrico generado por éstos no interfiere con la operación normal de cualquiera de los otros. Compatibilidad electromagnética es esa situación amigable en la cual los sistemas funcionan como se pretende, tanto en sí mismos y en su ambiente [9]. Por lo tanto, podemos decir que la compatibilidad electromagnética debe ocuparse de dos problemas diferentes, que dan lugar a dos ramas de la misma:

1. Ese aparato, equipo o sistema debe ser capaz de operar adecuadamente *en ese entorno sin ser interferido por otro (inmunidad o susceptibilidad electromagnética)*.
2. Además, no debe ser fuente de interferencias que afecten a otros equipos de ese entorno (*emisiones electromagnéticas*).

Interferencia electromagnética (EMI) se dice que existe cuando tensiones o corrientes indeseables están presentes para influir adversamente la operación de un dispositivo. Estas tensiones o corrientes pueden alcanzar al dispositivo víctima por conducción o por radiación de campo electromagnético. El proceso de hacer cambios en el diseño o ajustes de señal o niveles de ruido es conocido como control de interferencia electromagnética -EMI control- (EMIC). A menudo, la aplicación de estos procedimientos seguidos para efectuar ese control también lleva ese nombre [9].

Los técnicos que internacionalmente se relacionan con las interferencias electromagnéticas las denominan con las siguientes siglas: EMI: Interferencias Electromagnéticas (ElectroMagnetic Interferences), EMC: Compatibilidad Electromagnética (ElectroMagnetic Compatibility), EMS: Susceptibilidad Electromagnética (ElectroMagnetic Susceptibility), EMP: Pulsos Electromagnéticos (ElectroMagnetic Pulses), ESD: Descargas Electrostáticas (ElectroStatic Discharges), RFI: Interferencias de Radiofrecuencia (Radio Frequency Interferences). La compatibilidad electromagnética está regulada en varios países por reglamentos de obligado cumplimiento, los cuales se remiten a las Normas técnicas. La compatibilidad electromagnética depende del nivel de perturbación de las interferencias del generador y de la susceptibilidad del afectado (receptor) [3].

El término susceptibilidad electromagnética (EMS) y su opuesto inmunidad electromagnética se emplean para indicar la mayor o menor propensión de un dispositivo, equipo o sistema a ser afectado por las interferencias electromagnéticas, en otras palabras, el nivel de susceptibilidad de un equipo es la propiedad que tiene éste para funcionar correctamente en un ambiente de interferencia.

2.4.1 Causas de EMI

La causa de un problema de EMI puede ser ya sea dentro del sistema en cuestión, en cuyo caso el problema es designado como un problema *interno* del sistema, o la EMI puede venir de fuera, en cuyo caso al problema se le da la designación de *externo*. El *sistema*, para propósitos de análisis de EMI, usualmente es el conjunto de dispositivos complejos sobre los que se ejerce el diseño y el manejo del control [9].

Una causa muy común de ambos problemas internos y externos es una señal destinada para un circuito la cual alcanza a un circuito o circuitos para los cuales no había sido destinada. Otras causas de EMI, en gran medida dentro del ámbito interno del sistema, están enlistadas en la Tabla 2.1. La Tabla 2.2 enumera una serie de causas de EMI externas. En ambas tablas, el término "emisor" es utilizado para denotar una fuente de energía electromagnética, mientras que el término "receptor" es utilizado para denotar un dispositivo que responde a la energía electromagnética. Cualquier elemento en una columna de emisor puede interferir con cualquier elemento de la columna receptor. Se nota que muchos elementos aparecen en ambas tablas [9].

En todos los casos, la EMI surge por la combinación de tres factores: fuente, trayectoria de transmisión, y la respuesta, al menos uno de éstos no es planeado.

| Emisor | Receptor |
|------------------------------------|-------------------------------|
| Sistema de encendido del automóvil | Dispositivos de visualización |
| Fuentes de alimentación | Relevadores |
| Generadores | Instrumentos de navegación |
| Computadoras | Computadoras |
| Transmisores de radar | Receptores de radar |
| Radio transmisores | Radio receptores |
| Luces fluorescentes | Equipos de guerra |

Tabla 2.1 Causas de EMI internas [9]

| Emisor | Receptor |
|------------------------|----------------------------|
| Radio transmisores | Radio receptores |
| Radio receptores | Radio transmisores |
| Transmisores de radar | Receptores de radar |
| Líneas de alta tensión | Marcapasos del corazón |
| Descargas atmosféricas | Computadoras |
| Motores | Instrumentos de navegación |
| Luces fluorescentes | Controles industriales |

Tabla 2.2 Causas de EMI externas [9]

2.4.2 Esquema de EMC

Las trayectorias de transmisión eléctrica constituyen el principal medio por el cual las características de EMC de los equipos son clasificados. Las trayectorias de transmisión son conducidas o radiadas. "Conducidas" significa que son llevadas por un camino metálico, incluyendo componentes concentrados como capacitores y transformadores. "Radiadas" es el término que se utiliza para caracterizar los caminos no-metálicos, aunque el mecanismo de transferencia pueda ser el "campo cercano" o la inducción, más bien que la radiación, el campo de una antena [9].

Así, las características de un emisor se dicen ser su emisión conducida y su emisión radiada, mientras que las características de un receptor se dicen ser su susceptibilidad conducida y su susceptibilidad radiada. La Figura 2.2 ilustra estas cuatro características.

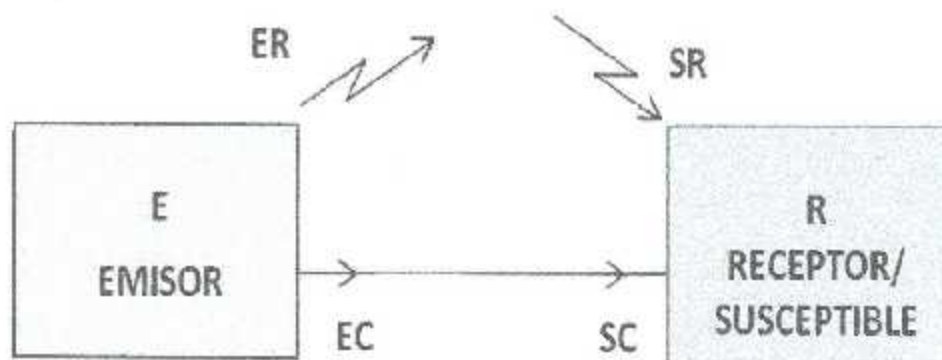


Figura 2.2 Trayectorias de acoplamiento

Por lo tanto, para que las EMI constituyan un problema debe existir al mismo tiempo un generador de perturbaciones, un receptor afectado por ellas y un camino de acoplamiento. Los medios por los cuales se pueden acoplar las interferencias son por conducción y por impedancia común por radiación electromagnética, magnética (acoplamiento inductivo) o eléctrica (acoplamiento capacitivo).

Las mediciones de emisiones conducidas y susceptibilidad siempre son hechas en términos de voltaje y corriente, en unidades tales como volts (V), dBV, dB μ V, en amperes (A), dBA, dB μ A, etc. Las mediciones de emisiones radiadas y susceptibilidad, por el otro lado, son hechas en términos de campo eléctrico como volts/metro (V/m), dBV/m, dB μ V/m, o para campo magnético en tesla (T), dBpT (decibeles relativos a un picotesla), etc. [9].

Debido a la importancia del espectro de frecuencia en EMC debidos a fuentes externas las emisiones radiadas de un sistema que son de suficiente intensidad para

interferir en la operación de otro sistema son reguladas por tratados internacionales. Para propósitos de distribución, el mundo está dividido en tres regiones [9]:

Región 1: Europa, África, la URSS porción de Asia, Asia Menor, y la península Arábiga.

Región 2: Norte y Sur América (incluye Hawái).

Región 3: Australia y Asia fuera de la URSS.

2.5 Fuentes de interferencia.

2.5.1 Imperfecciones en componentes pasivos.

Una de las fuentes de interferencia que más llaman la atención son las imperfecciones en los componentes pasivos. El examen detenido de las especificaciones de fabricantes muestra claramente que todos estos componentes se comportan no sólo de una forma que dista de la ideal, sino que a veces incluso de forma opuesta a la deseada, y ésta es la causa de los problemas.

La discrepancia entre comportamiento real e ideal se pone de manifiesto en particular a altas frecuencias, lo que significa que es grave no sólo en los circuitos digitales rápidos y de radiofrecuencia, sino también precisamente cuando se trata de suprimir transitorios, que son un problema habitual en EMC [3].

2.5.1.1 Resistencias.

La resistencia es una propiedad intrínseca a los materiales, pero no es una constante. Por un lado, la resistencia es función de las dimensiones y del estado cristalino o físico del material y de sus impurezas. Depende, además, de la frecuencia, intensidad de la corriente y la tensión aplicada. Puede variar también con la temperatura, humedad, presión, iluminación y campos magnéticos externos. Pero el comportamiento frecuencial, en particular, puede ser una fuente de incertidumbres y hace que, en la práctica, no se tengan componentes puramente resistivos, sino que las resistencias presentan, además de la resistencia propiamente dicha, inductancia y capacitancia.

Para caracterizar el comportamiento real de un componente pasivo se suele emplear un circuito equivalente de parámetros concentrados que presente un comportamiento similar al que se obtiene al medir la impedancia del componente en cuestión. Dicho circuito está formado por componentes ideales pero cuyo valor puede que tenga que cambiarse de unas a otras frecuencias para poder obtener una descripción correcta de la impedancia real. El circuito equivalente más adecuado depende del material y del tipo de resistencia,

distinguiéndose 3 tipos principales: de composición de carbón, de hilo bobinado, y de película (metálica o de carbón).

A continuación se muestran los modelos de resistencias de composición de carbón (fig. 2.3) y de hilo bobinado (fig. 2.4).

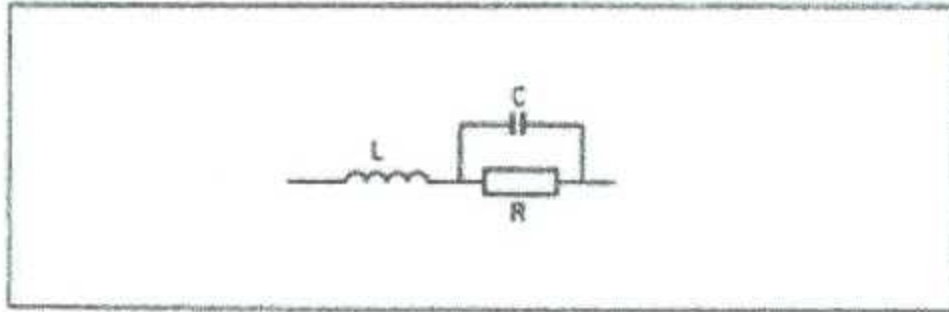


Figura 2.3 Modelo equivalente para una resistencia de composición de carbón.[3]

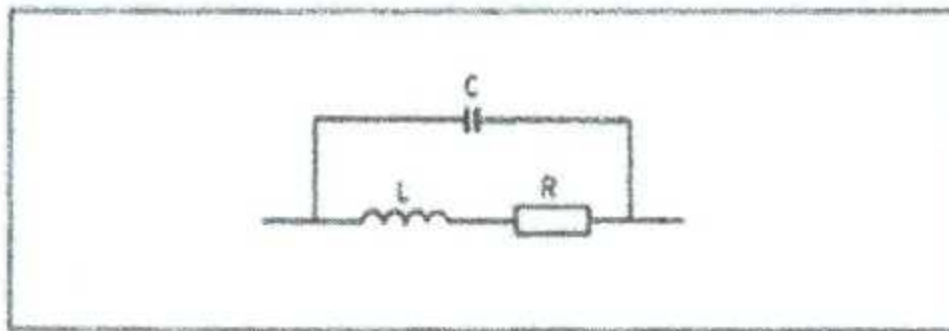


Figura 2.4 Modelo equivalente para una resistencia de hilo de bobinado.[3]

Donde: R es la resistencia en corriente continua; L representa la inductancia de las dos terminales; y C representa la capacidad total equivalente, resultado de la combinación de capacidad que hay entre los numerosos granos de carbón.[3]

2.5.1.2 Condensadores.

Un condensador es un dispositivo que consta de dos superficies conductoras separadas por un material aislante, el dieléctrico. La capacidad de un condensador es la propiedad que permite el almacenamiento de una carga eléctrica cuando se aplica una diferencia de potencial entre los conductores. La capacidad se mide en faradios, y es función del dieléctrico y de la forma y dimensiones geométricas del componente.

Un condensador real no presenta solo una capacidad sino que tiene asociadas una resistencia e inductancia, debidas a las terminales y a la estructura del componente. Un

modelo del circuito equivalente de parámetros concentrados es el de la figura 2.5, donde R_s es la resistencia de las terminales, placas y contactos, L es la inductancia de las terminales y placas, R_p es la resistencia de fugas del dieléctrico y del encapsulado, y C la capacidad del condensador.[3]

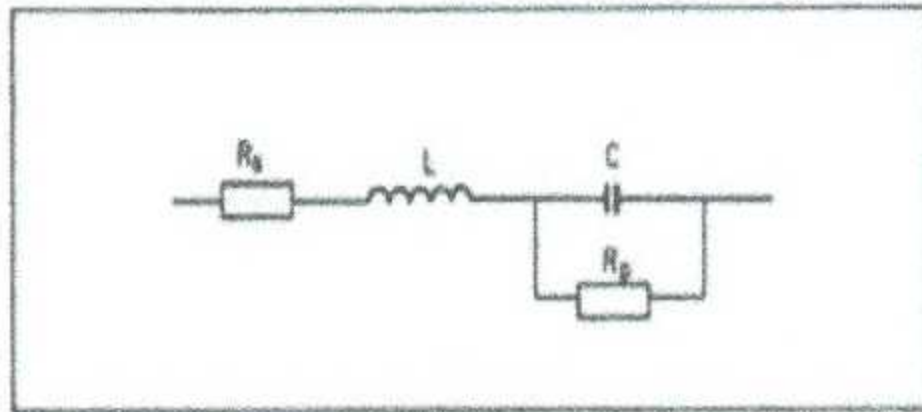


Figura 2.5 Modelo equivalente para un condensador.[3]

2.5.1.3 Inductores.

La inductancia de un circuito es la relación entre la fuerza electromotriz inducida en él por una corriente variable, y la velocidad de variación de dicha corriente. Los componentes diseñados de modo que presenten un valor de inductancia elevado se denominan bobinas eléctricas, inductancias o inductores. Consisten básicamente de un conductor enrollado de forma que se incremente el concatenamiento del flujo magnético creado por la corriente variable que circula por las espiras. La inductancia de una bobina depende de sus dimensiones, del número de vueltas del hilo(espiras) y de la permeabilidad del núcleo.

Los inductores se clasifican según el tipo de núcleo sobre el que están devanados. Los dos tipos más generales son los de núcleo de aire y los de núcleo magnético (hierro o ferrita). En cualquier caso, un inductor real presenta, además de la inductancia, una resistencia en serie y una capacidad distribuida en el bobinado. Esta capacidad se representa por un condensador en paralelo en un modelos de parámetros concentrados. Para una bobina con núcleo de aire y con aislamiento perfecto entre espiras, el modelo aceptado es de la figura 2.6.

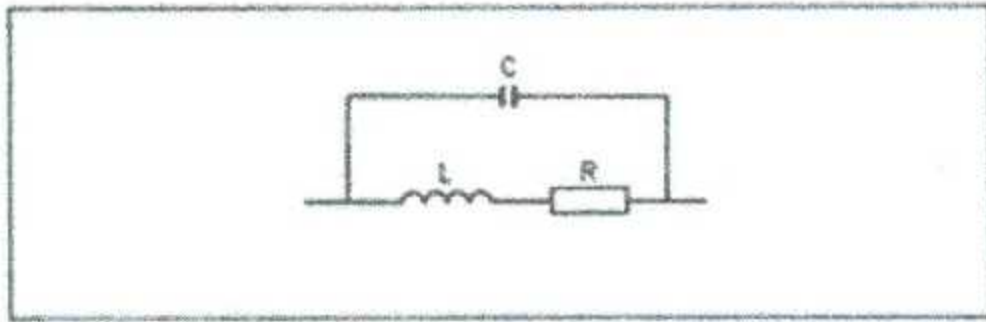


Figura 2.6 Modelo equivalente para una bobina con núcleo de aire. [3]

Para bobinas con núcleo magnético el circuito equivalente es el de la figura 2.7. En este caso se incluyen las pérdidas por histéresis (R_h) y por las corrientes de Foucault (R_o) en el núcleo.

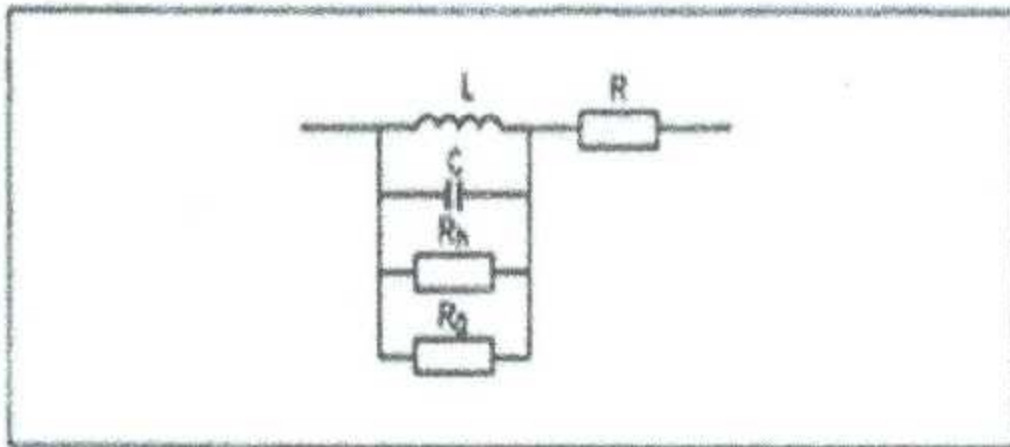


Figura 2.7 Modelo equivalente para una bobina con núcleo magnético. [3]

2.5.1.4 Otros componentes pasivos que presentan imperfecciones.

Existen más componentes pasivos que se pueden encontrar en diferentes circuitos lo cuales pueden provocar interferencias debido a su naturaleza, entre los componentes se distinguen los siguientes:

- Núcleos de ferrita.
- Transformadores.
- Conductores.
- Cables.
- Circuitos impresos.

2.5.2 Transitorios, conmutaciones y descargas.

Una de las principales fuentes de interferencias en los equipos electrónicos son los fenómenos transitorios y conmutaciones, que tienen lugar en circuitos próximos.

Dichos fenómenos pueden tener un origen de tipo natural, como en el caso de descargas atmosféricas, o ser provocados por dispositivos o sistemas eléctricos de potencia, que manejan tensiones y corrientes relativamente elevadas comparadas con los niveles que emplean los circuitos electrónicos.[3]

Un transitorio eléctrico es la manifestación a un cambio repentino en las condiciones de un circuito, puede ser al abrir o cerrar un interruptor o que ocurra alguna falla en el sistema.[12]

Algunos de dichos sistemas de potencia provocan, incluso en condiciones normales de funcionamiento, cambios bruscos de tensión y de corriente, con dv/dt de varios centenares de voltios por nanosegundo y di/dt de algún centenar de amperios por microsegundo.

Los citados transitorios pueden presentarse de forma aleatoria, como en el caso de cortocircuitos, conmutación de relés o descargas atmosféricas, o de forma periódica y repetitiva como en el caso de la conmutación de convertidores estáticos.[3] Pueden presentarse diferentes transitorios según de donde se originen:

- a) Transitorios en contactos de relés, contactores, e interruptores electromecánicos en general.
- b) Transitorios en conmutadores estáticos.
- c) Transitorios producidos por descargas atmosféricas.
- d) Transitorios por conexión o desconexión de transformadores.
- e) Transitorios producidos por cortocircuitos.

También existen otros tipos de fuentes de interferencias como pueden ser:

- a) Rebotes y arcos.
- b) Conmutadores estáticos.
- c) Armónicos en la red de alimentación.
- d) Impulsos electromagnéticos.
- e) Interferencias de origen mecánico.

2.6 Acoplamiento de las interferencias.

Numerosas trayectorias pueden ser involucradas en los acoplamientos de ruido de una fuente a un dispositivo sensible. Estas trayectorias incluyen cableado común (por ejemplo, fuentes de alimentación comunes, líneas comunes, etc.), capacitancia entre dispositivos, inductancia mutua entre cableado adyacente, radiación a través de un enlace aéreo, y alambres en un campo electromagnético variable [9].

La figura 2.8 muestra algunas de estas trayectorias. La fuente de ruido A irradia y conduce interferencias. El dispositivo sensible B recibe directamente vía radiación. El equipo sensible C se acopla por radiación por medio de la estructura H. Los aparatos D y E se acoplan a la fuente de ruido por el cableado común. Los dispositivos F y G se acoplan inductivamente a la fuente de ruido mediante los cables adyacentes en J. Los equipos sensibles D, F y G se acoplan a la fuente capacitivamente por la capacitancia que existe entre los cables [9].

El cableado común puede existir en un sistema por virtud de una fuente de ruido y un circuito sensible que sean alimentados del mismo suministro de energía. Frecuentemente, la trayectoria común es un lazo de tierra que provee un acoplamiento de impedancia común y de corrientes (por ejemplo, en un plano de tierra) el cual constituye una fuente de ruido [9].

Ruido por acoplamiento electrostático, o capacitivo, puede existir entre los propios dispositivos, o entre los cables conectados a los dispositivos ruidosos y la tierra. La cantidad de interferencia acoplada a través de una trayectoria depende del tamaño de la capacitancia, los niveles de impedancia de la fuente y los circuitos receptores, y la magnitud y rango de frecuencia del ruido. El acoplamiento capacitivo ocurre más fácilmente en alta impedancia, y circuitos de alta frecuencia. Los medios para el acoplamiento por inductancia mutua entre cables son el campo electromagnético común y la inductancia común de los cables en paralelo. Un enlace directo vía aérea se dice que ocurre en el caso de una trayectoria a través de un elemento estructural intermedio que tiene dimensiones que apoya la radiación de retorno de la frecuencia de interferencia. Generalmente, tales dimensiones estarán en el orden de $\lambda/8$, o mayor, donde λ es la longitud de onda de la interferencia [9].

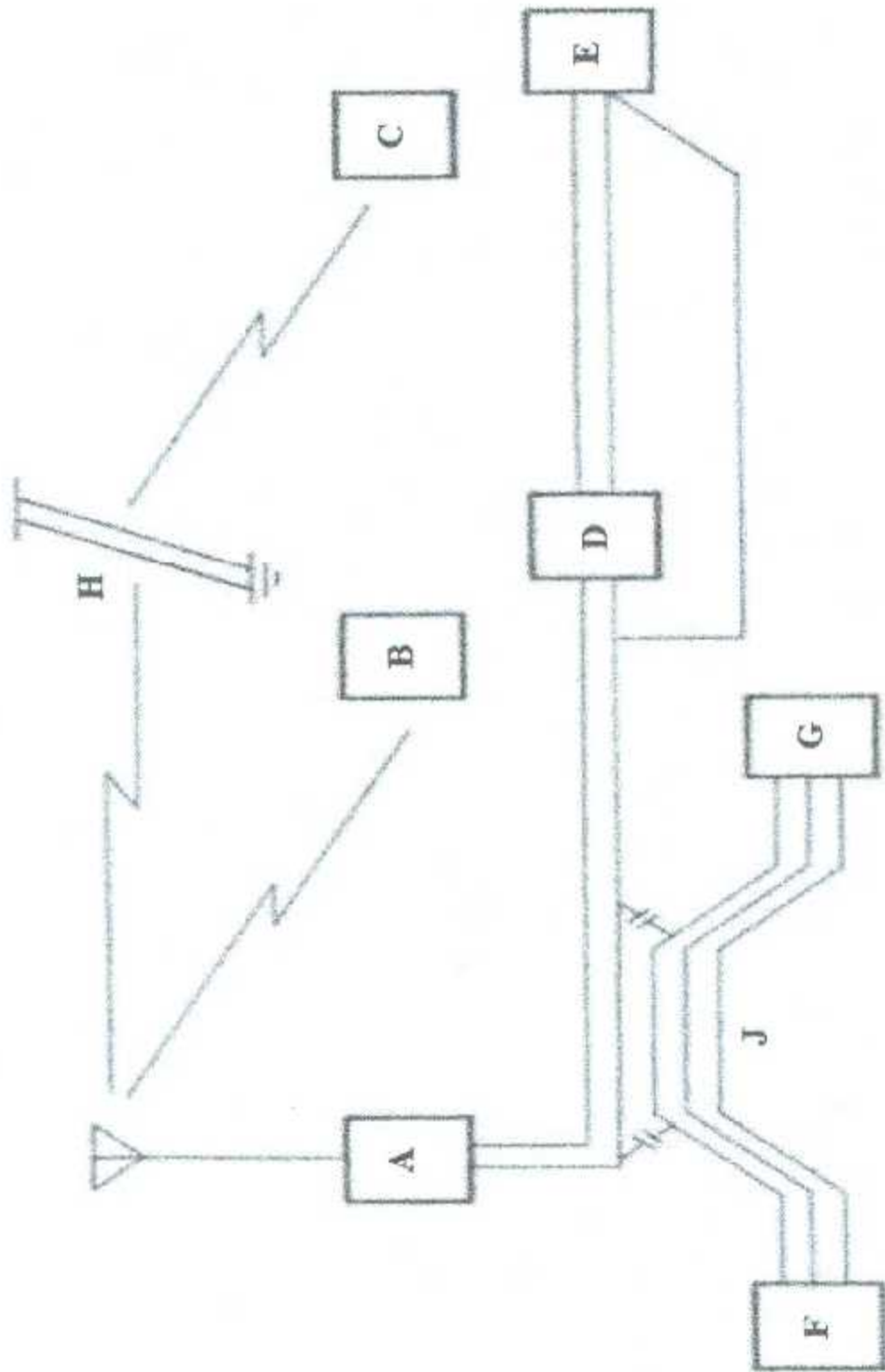


Figura 2.8 Caminos de acoplamiento[9]

2.6.1 Acoplamiento por trayectorias conducidas

Las trayectorias conducidas generalmente proveen funciones de transferencia bien definidas, esto es, la pérdida en la trayectoria puede ser calculada exactamente, basada a partir de los elementos funcionales (resistores, inductores, capacitores, transformadores, elementos activos, etc.) a lo largo de la trayectoria. Sin embargo, dos factores tienden a afectar la cantidad de interferencia que en caso contrario sería transmitida a lo largo de una trayectoria conducida: (1) pérdidas involuntarias y (2) recepción y radiación de retorno. La característica distintiva de la interferencia conducida es que una trayectoria conducida es el principal medio por el cual la fuente es conectada al elemento susceptible (receptor). La interferencia radiada, por el otro lado, envuelve la transferencia de energía vía el campo electromagnético producido por la señal de la fuente. Su distribución se ajusta a las relaciones de teoría del campo. Diferencias entre trayectorias conducidas y radiadas se ilustran en la figura 2.9 [9].

Para propósitos de análisis, las trayectorias de acoplamientos conducidos son compuestas por transferencias resistivas, inductivas, y capacitivas. La transferencia de interferencia conducida requiere una trayectoria de circuito completo entre la fuente y el receptor. Esta trayectoria puede consistir de alambrado, fuente de alimentación, impedancia común, chasis del equipo, estructura de soporte metálico, un plano puesta a tierra, o inductancia o capacitancia mutua. Así, cualquier conexión directa entre dos circuitos con un camino de retorno permite que ocurra una transferencia conductiva.

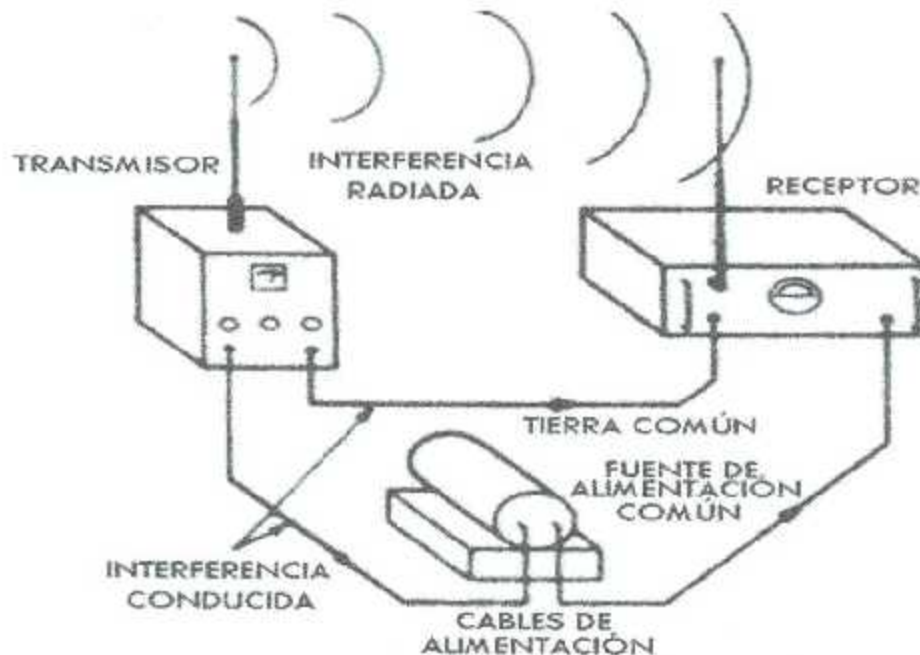


Figura 2.9 Diferencias conceptuales entre trayectorias conducidas y radiadas [9]

El camino de retorno puede ser otro conductor metálico, una puesta a tierra común de retorno, o inductancia o capacitancia mutua. El flujo de corriente para un acoplamiento conductivo depende a partir de la ley de Ohm, $I = E/Z$, donde I = corriente en amperes, E = voltaje en volts, y Z = impedancia en ohms. Para la dimensión del circuito, $l \geq \lambda/8$, posiciones a lo largo de una línea pueden desarrollarse (por las reflexiones de los finales) donde la interferencia puede entrar y salir de la línea fácilmente [9].

2.6.1.1 Transferencia resistiva

La transferencia resistiva ocurre sin la intervención de elementos reactivos. Las rutas para las corrientes son conductores de fuentes de alimentación, cables de control y accesorios, y puesta a tierra de retorno de varios tipos. Además, trayectorias no previstas pueden surgir en la cual ocurre una fuga de corriente por la degradación del aislamiento o la interrupción del servicio. La transferencia resistiva ocurre por virtud de una corriente, I_1 , en un lazo produciendo una caída de tensión, V_2 , en un segundo lazo, como se ilustra en la figura 2.10, en la cual $V_2 = I_1 R$ [9].

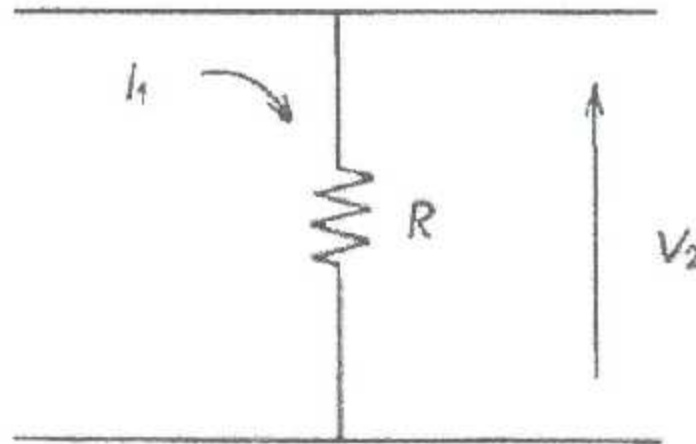


Figura 2.10 Transferencia resistiva

El acoplamiento resistivo también puede ocurrir en un conductor de tierra común, o por virtud de conexiones posicionadas separadamente a una superficie de tierra (ya sea suelo o metal). La figura 2.11 ilustra el acoplamiento entre circuitos causado por una trayectoria de impedancia de retorno común [9].

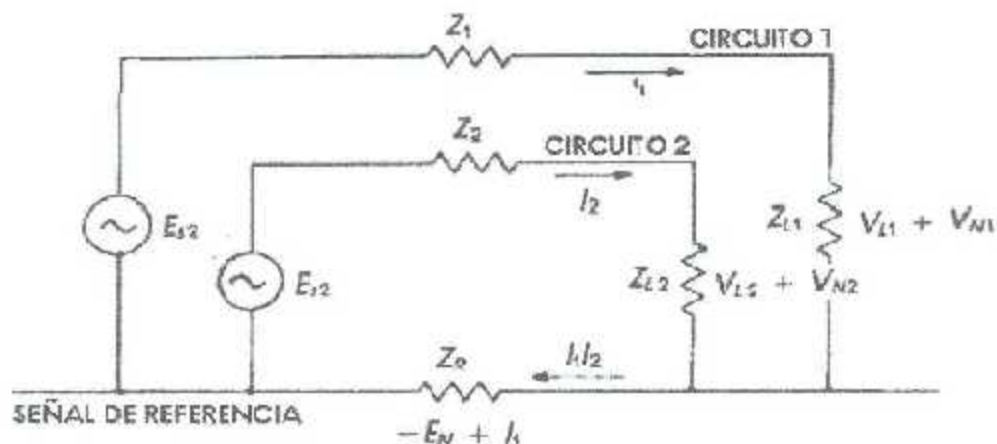


Figura 2.11 Acoplamiento entre circuitos causado por una trayectoria de impedancia de retorno común [9]

2.6.1.2 Transferencia inductiva

La transferencia inductiva ocurre entre dos lazos. Para los casos en los cuales el circuito de retorno de un alambre es removido a lo lejos del campo inductivo y de alta impedancia, el término "voltaje inducido en el alambre" puede ser usado. Para espaciamiento cercano del alambre, el acoplamiento inductivo mutuo es comparable al funcionamiento de un transformador. La corriente I_1 en el primer alambre produce un cambio de flujo, $d\phi$, el cual, en cambio, produce una corriente I_2 en el segundo alambre. La corriente I_2 en el segundo alambre resulta en la caída de voltaje, V_2 , a través de una impedancia en serie con el segundo alambre. Las rutas predominantes para acoplamiento inductivo son a través de transformadores y a través de cables paralelos continuos. Desde un punto de vista de interferencia, las pérdidas del núcleo a menudo causan que un transformador funcione como un filtro de bajo rendimiento contra la interferencia de alta frecuencia. Por consiguiente, las transferencias inductivas más serias a menudo son las del tipo cable a cable. La figura 2.12 ilustra un par de cables en paralelo, cada uno con un plano de tierra de retorno. Ellos constituyen un transformador con un primario de vuelta simple y un secundario de vuelta simple [9].

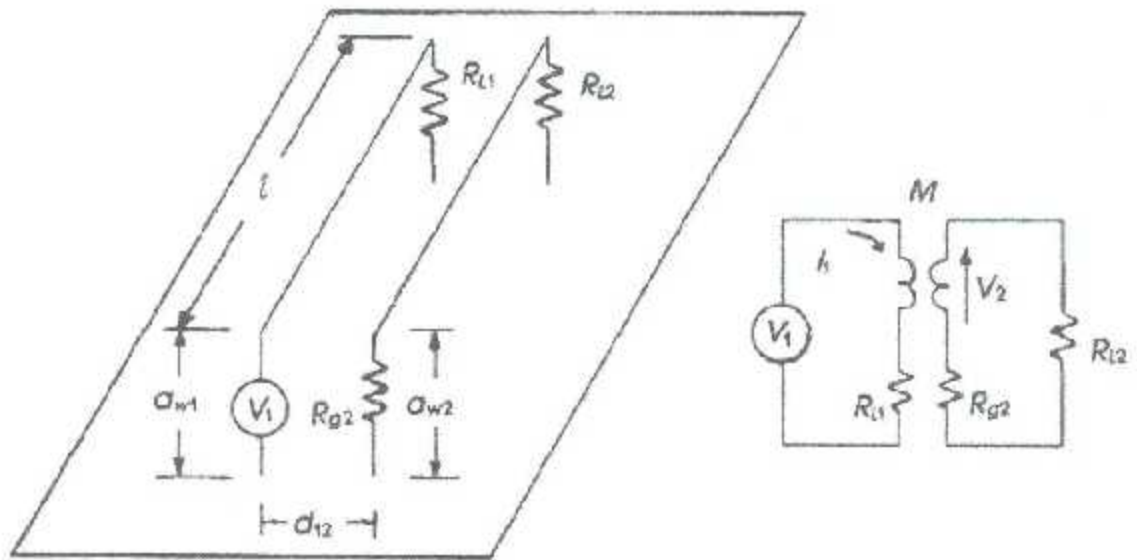


Figura 2.12 Transferencia inductiva [9]

La expresión para la transferencia inductiva es

$$V_2 = M \frac{dl_1}{dt} \quad (2.1)$$

Donde

$$M = \frac{\mu_0 l}{4\pi} * 2.3 \log_{10} \left| \frac{(\alpha_{w1} + \alpha_{w2})^2 + d_{12}^2}{(\alpha_{w1} - \alpha_{w2})^2 - d_{12}^2} \right| \quad H \quad (2.2)$$

en lo cual

μ_0 - permeabilidad en el vacío = $4\pi \times 10^{-7}$ H/m;

d_{12} = espacio entre cables 1 y 2, m;

α_{w1} - altura del alambre 1 sobre el plano de tierra, m;

α_{w2} - altura del alambre 2 sobre el plano de tierra, m.

La autoinductancia de baja frecuencia de un cable recto redondo de longitud l metros, diámetro d metros, y permeabilidad relativa, μ_r , es según [9]

$$L_0 = 0.2 \times 10^{-6} \left(2.303 \log_{10} \frac{4l}{d} - 1 + \frac{\mu_r}{4} + \frac{d}{2l} \right) \quad H \quad (2.3)$$

Para cables de materiales no magnéticos, tales como cobre o aluminio, se simplifica a

$$L_0 = 0.2 \times 10^{-6} \left(2.303 \log_{10} \frac{4l}{d} - 0.75 + \frac{d}{2l} \right) \quad H \quad (2.4)$$

Conforme la frecuencia se incrementa, la inductancia se convierte

$$L = 0.2 \times 10^{-6} \left(2.303 \log_{10} \frac{4l}{d} - 1 \right) \quad H \quad (2.5)$$

Las ecuaciones (2.3) y (2.4) aplican en frecuencias para las cuales el radio del cable, $d/2$, es menor que la profundidad del efecto piel [9]

$$\delta = (2/\omega\mu\sigma)^{1/2} \quad m \quad (2.6)$$

Donde $\mu = \mu_r\mu_0$, mientras (2.5) aplica en frecuencias para las cuales $d/2 > \delta$. En (2.6), σ = conductividad del cable, siemens/metro. La inductancia por cable de un par de cables paralelos redondos en bajas frecuencias está dada por [9]

$$L = 0.2 \times 10^{-6} l \left(2.303 \log_{10} \frac{2D}{d} + \frac{\mu_r}{4} \right) \quad H \quad (2.7)$$

Donde D = espacio del cable, eje-eje, en metros.

Para dos circuitos, como se ilustra en la figura 2.13, la inductancia mutua, M , es [9]

$$M = 4.61 \times 10^{-7} l \log_{10} \left(\frac{a_1 b_2}{a_2 b_1} \right) \quad H \quad (2.8)$$

La inductancia mutua de cables en paralelo en el vacío es [9]

$$M = 0.002 l [2.3 \log_{10}(2l/D) - 1 + D/l] \quad \mu H \quad (2.9)$$

donde l = longitud (cm) y D = espacio (cm).

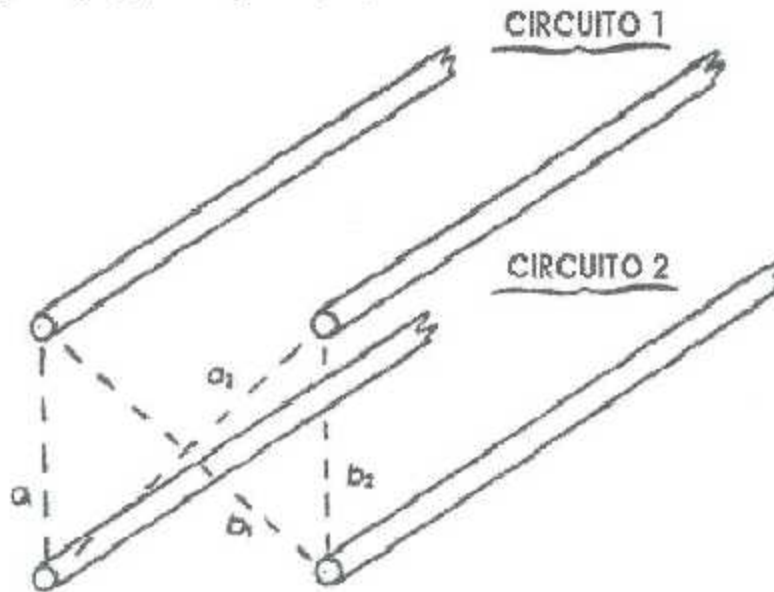


Figura 2.13 Parámetros geométricos para inductancia mutua entre dos circuitos[9]

2.6.1.3 Transferencia capacitiva

La transferencia capacitiva es el enlace de un circuito con otro por medio de una capacitancia existente entre ellos, como se ilustra en la figura 2.14. Nótese que la configuración física es la misma como en la figura 2.12. La transferencia capacitiva, sin embargo, no requiere de lazos primario y secundario, como lo hace la transferencia inductiva. En la figura 2.14, la expresión de transferencia es [9]

$$V_2 = \frac{R_2 V_1}{R_2 - jX_c} \quad (2.10)$$

Donde

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (2.11)$$

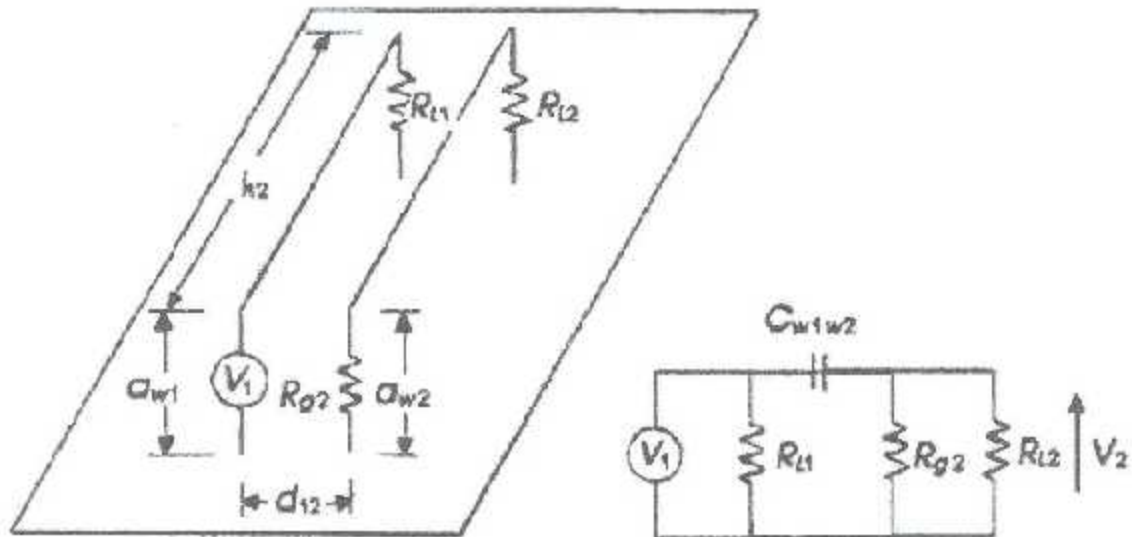


Figura 2.14 Transferencia capacitiva[9]

Y en la ausencia de un plano de tierra,

$$C = (3.5 \times 10^{-10} / 2\pi) l_{12} / 2.3 \log_{10}(d_{12}^2 / r_{w1} r_{w2}) \quad F \quad (2.12)$$

en donde

l_{12} = longitud común de cables 1 y 2; m;

d_{12} = espacio entre cables 1 y 2, m;

r_{w1} = radio de cable 1, m;

r_{w2} = radio de cable 2, m.

Nótese que la transferencia capacitiva es impulsada por cable de alta impedancia a tierra, lo cual permite voltaje máximo a tierra para una corriente dada. La transferencia capacitiva se vuelve más predominante conforme la frecuencia se incrementa por la reactancia capacitiva que acopla los dos circuitos se decrece con la frecuencia. Una trayectoria completa es necesaria para la transferencia inductiva, como lo revela la comparación de las figuras 2.12 y 2.14. La trayectoria de retorno usualmente es provista por una conexión de tierra común para ambos conductores [9].

Cables multiconductores funcionan como buenos conectores acopladores capacitivos de RF. Así, la interferencia que entraría en un conductor simple puede aparecer en todos los conductores de un cable. La capacitancia de cables en paralelo redondos está dada por [9]

$$C = 1.21 \times 10^{-11} \frac{\epsilon_r}{\log_{10} \left[\frac{D}{d} + \sqrt{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1} \right]} \quad F/m \quad (2.13)$$

donde ϵ_r = permitividad relativa, o constante dieléctrica.

Para $D/d \gg 1$, (2.13) se simplifica a [9]

$$C = 1.21 \times 10^{-11} \frac{\epsilon_r}{\log_{10} \left[\frac{2D}{d} \right]} \quad F/m \quad (2.14)$$

La capacitancia de un cable simple en paralelo a un plano de tierra y a una altura h metros sobre éste es [9]

$$C = \frac{24.12 \times 10^{-12}}{\log_{10} \left[\frac{2h}{d} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{1}{2h/d^2}} \right) \right]} \quad F/m \quad (2.15)$$

La capacitancia de bandas en paralelo de longitud l cm, ancho w cm, y separación s cm, para $w < s$, está dado por [9]

$$C \cong 0.12 l / \log_{10}(4s/w) \quad pF \quad (2.16)$$

Lo cual es válido para un 2% al interior para $w < 0.5s$.

Para $w > s$,

$$C \cong (0.0883 lw/s) \{ 1 + (s/\pi w) [1 + 2.3 \log_{10}(2\pi w/s)] \} \quad pF \quad (2.17)$$

Lo cual es válido para un 10% interno para $w = s$ y a 4% para $w = 2s$ [2].

2.6.2 Acoplamiento por radiación

El campo electromagnético constituye energía que en realidad escapa de una fuente y se extiende en el espacio de acuerdo a las leyes de propagación de las ondas. El acoplamiento por radiación puede explicarse como la transferencia de energía de un circuito a otro sobre trayectorias de la más pequeña distancia del sistema interno imaginable a distancias interestelares. El tratamiento a seguir es para utilizarse en situaciones de sistemas internos, así como en esas situaciones de sistemas externos en los cuales la distancia s es lo suficientemente pequeña que la pérdida de propagación (atenuación) es despreciable [9].

Cantidades significativas de acoplamiento por medio de campo electromagnético pueden ocurrir dentro de un sistema donde gran número de componentes están empaquetados en un volumen relativamente pequeño. Consecuentemente, la mayoría de los acoplamientos son del tipo campo cercano. La evaluación de éste acoplamiento es importante en cualquier análisis de EMI. Un conjunto de ecuaciones que dan la intensidad de campo exacto a cualquier distancia de un cable eléctrico que lleva corriente o de un lazo de corriente se presentan a continuación. La intensidad de campo, teniendo en cuenta que el campo en estado estacionario de un cable de longitud infinitesimalmente corta l que lleva una corriente sinusoidal I consiste de tres componentes, E_θ , E_r , y H_ϕ , respectivamente están dados por [9]:

$$E_\theta = \frac{I\beta^3}{4\pi\omega\epsilon_0} \left(\frac{-1}{j(\beta r)} + \frac{1}{(\beta r)^2} + \frac{1}{j(\beta r)^3} \right) \sin \theta \quad V/m \quad (2.18)$$

$$E_r = \frac{I\beta^3}{2\pi\omega\epsilon_0} \left(\frac{1}{(\beta r)^2} + \frac{1}{j(\beta r)^3} \right) \cos \theta \quad V/m \quad (2.19)$$

$$H_\phi = \frac{I\beta^2}{4\pi} \left(\frac{-1}{j(\beta r)} + \frac{1}{j(\beta r)^2} \right) \sin \theta \quad A/m \quad (2.20)$$

El campo de un lazo de área infinitesimalmente corta A que lleva una corriente sinusoidal I consiste de tres componentes, H_θ , H_r , y E_ϕ , respectivamente están dados por:

$$H_{\theta} = \frac{IA\beta^3}{4\pi} \left(\frac{-1}{(\beta r)} - \frac{1}{j(\beta r)^2} + \frac{1}{j(\beta r)^3} \right) \sin \theta \quad A/m \quad (2.21)$$

$$H_r = \frac{IA\beta^3}{2\pi} \left(\frac{-1}{j(\beta r)^2} + \frac{1}{(\beta r)^3} \right) \cos \theta \quad A/m \quad (2.22)$$

$$E_{\phi} = \frac{IA\beta^4}{4\pi\omega\epsilon_0} \left(\frac{-1}{(\beta r)} - \frac{1}{j(\beta r)^2} \right) \sin \theta \quad V/m \quad (2.23)$$

Estas ecuaciones asumen que (1) la fuente lleva una corriente uniforme, (2) sus dimensiones son pequeñas comparadas con su distancia al punto de observación, (3) el tamaño de la fuente es pequeño comparado con su longitud de onda λ (esto es, $l \leq 0.1\lambda$), y (4) el punto de observación está en el "espacio libre", esto es, no está cerca de una superficie metálica, ni cerca a medios magnéticos o dieléctricos [9].

2.7 Índice de susceptibilidad de componentes y circuitos electrónicos.

El problema de las interferencias no sería tal de no existir elementos susceptibles que actúan como receptores a los que se acoplan las perturbaciones procedentes de otros elementos. No se trata simplemente de que la potencia de las interferencias recibidas pueda provocar daños físicos al receptor; sucede a veces que, incluso para niveles de potencia muy pequeños, el sistema deja de comportarse como debiera. La susceptibilidad o sensibilidad de los sistemas electrónicos a EMI es debida no sólo a los componentes pasivos, cables incluidos, sino también a los circuitos activos, particularmente a los circuitos integrados [3].

Desde los primeros tiempos de la electrónica, es conocido que la presencia de no linealidades en un circuito provoca la demodulación (o detección de envolvente) de las interferencias de radiofrecuencia (RFI) presentes en su entrada, aun cuando la frecuencia de éstas supere la propia de trabajo del dispositivo. Las potencias de RF necesarias no tienen por qué ser muy altas, y su acoplamiento puede verse realzado por la presencia de resonancias debidas a capacidades parásitas en el circuito [3].

Una forma de comparar la susceptibilidad a las interferencias externas de diversos sistemas, analógicos o digitales, es mediante el denominado índice de susceptibilidad del receptor (IS), que se define como el cociente entre el ancho de banda B y el nivel de ruido o sensibilidad, N , del circuito receptor. Cuanto mayor sea IS , tanto más susceptible es el

circuito, por cuanto la susceptibilidad aumenta al hacerlo el ancho de banda y al reducirse el umbral o nivel de ruido. Si éste se expresa en forma de tensión, N_v , se tiene [3].

$$IS_v = B/N_v \quad (2.24)$$

Si en cambio el ruido se expresa en forma de potencia, que es lo común en circuitos de comunicaciones, se habla entonces de la susceptibilidad del receptor en potencia, IS_p , [3]

$$IS_p = IS_v^2 = B^2/N_v^2 = B^2/4RN_p \quad (2.25)$$

donde R es la resistencia del circuito, que se supone adaptado (resistencia de fuente igual a la de carga, R) y N_p es en valor eficaz. Expresándolo en decibelios [3],

$$IS_p = 20 \log B - N_{dBW} - 10 \log 4R = 24 \text{ dB} + 20 \log B - 10 \log R - N_{dBm} \quad (2.26)$$

siendo N_{dBW} el nivel de ruido en decibelios referidos a 1 W, y N_{dBm} el mismo nivel referido a 1 mW. En la tabla 2.3 se dan los valores del índice de susceptibilidad para distintos amplificadores [3].

| Tipo de amplificador | $N_{dB\mu V}$ | $Z (\Omega)$ | N_{dBm} | B | $IS_p (dB)$ |
|--------------------------|---------------|--------------|-----------|--------|-------------|
| Amplificador FI | +37 | 50 | -70 | 1 MHz | 197 |
| Receptor video | +75 | 1000 | -45 | 3 MHz | 169 |
| Amplificador video | +106 | 50 | -1 | 1 MHz | 128 |
| Amplificador audio | +100 | 600 | -18 | 10 kHz | 94 |
| Amplificador para sensor | +60 | 1000 | -60 | 100 Hz | 94 |
| Receptor digital | +126 | 150 | +14 | 1 MHz | 108 |

Tabla 2.3 Índice de susceptibilidad para distintos tipos de circuitos receptores de interferencias [3]

El índice IS permite extraer una serie de conclusiones importantes. Se observa, por ejemplo, que a pesar de tener un ancho de banda similar, el sistema digital referido en la Tabla 2.4 es menos susceptible que un amplificador de video; ello se debe al mayor nivel

de ruido que aceptan los circuitos digitales que son, por lo tanto, en general, menos susceptibles que los analógicos. Si en cambio se compara el *IS* de un amplificador de audio con el de un sensor, se ve que, aunque el primero tiene un mayor umbral de ruido, el segundo no es más susceptible, gracias a su menor ancho de banda. Esto justifica la solución de poner a la entrada de los circuitos susceptibles, un condensador cerámico de alta frecuencia, con terminales muy cortos, para reducir el ancho de banda de entrada [1].

Para el cálculo del nivel o umbral de ruido en los circuitos analógicos, que limita la resolución y en definitiva la sensibilidad, a falta de otros datos se puede tomar el nivel de ruido térmico como indicador. La potencia de dicho ruido, N_p , depende de la temperatura absoluta T , y del ancho de banda B [3]

$$N_p = kTB \quad (W) \quad (2.27)$$

Donde $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K es la constante de Boltzmann.

La susceptibilidad de diversos sistemas a las interferencias se puede analizar mediante su índice de susceptibilidad, que aumenta al hacerlo la banda de paso (como sucede en los circuitos digitales) y también al disminuir el nivel de ruido (que es el caso de los circuitos analógicos). La susceptibilidad de los circuitos integrados digitales varía de unas a otras familias lógicas, pues depende de su margen de ruido (aumenta al reducirse éste) y ancho de banda (aumenta al incrementar éste) [3].

2.8 Blindajes o pantallas.

En la parte anterior se ha visto que, salvo las interferencias conducidas, el resto de interferencias electromagnéticas (EMI) se deben al acoplamiento de campos eléctricos (acoplamiento capacitivo), campos magnéticos (acoplamiento inductivo) y campos electromagnéticos (acoplamiento por radiación electromagnética). Un método de protección frente a estos acoplamientos consiste en evitarlos utilizando blindajes o pantallas metálicas.[3]

Un blindaje es una superficie metálica dispuesta entre dos regiones del espacio que se utiliza para atenuar la propagación de los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos. Un blindaje sirve tanto para no dejar salir el flujo de los campos de la zona encerrada por el (figura 2.15 A), como para evitar la entrada de flujos de campos al dispositivo que éste protege (figura 2.15 B). El ámbito de atenuación de los blindajes abarca un extenso espectro de frecuencias, ya que en el mercado existen materiales para apantallar desde 1 Hz a casi 1THz. La forma en que se presentan los blindajes son: cajas, armarios, juntas eléctricas, compartimentos internos, pinturas conductoras, láminas

metálicas, cables apantallados, diferentes tipos de depósitos conductores sobre plásticos, etc.[3]

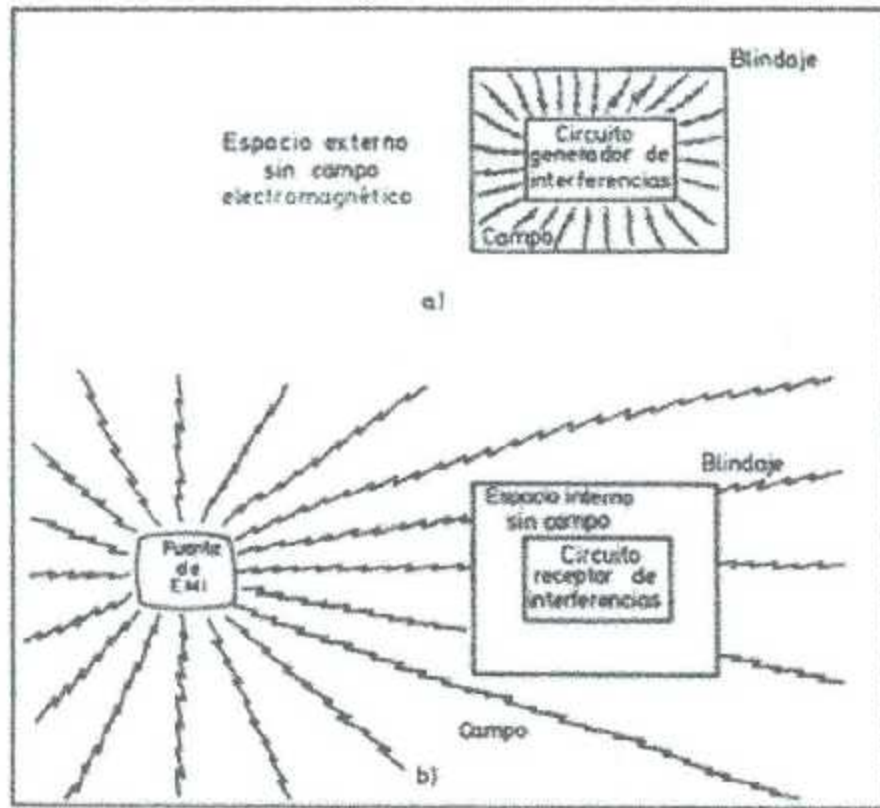


Figura 2.15 (a) Un blindaje evita que el campo generado en el circuito electrónico radie hacia el exterior. (b) Un blindaje también evita que las radiaciones externas interfieran en el circuito electrónico.[3]

La efectividad total de un blindaje es igual a la suma de las pérdidas por absorción más las pérdidas por reflexión más un factor que contabiliza las múltiples reflexiones en los blindajes. Un blindaje electrostático contra campos eléctricos debe incluir todos los componentes a proteger, debe conectarse a un potencial constante que puede ser el común del sistema y debe tener alta conductividad. Un blindaje magnético efectivo también debe encerrar totalmente a los componentes que se quiere proteger y debe tener alta permeabilidad. No existe el blindaje perfecto contra campos de alta frecuencia. Un blindaje compuesto por un buen material reflector y uno con alta permeabilidad da buenos resultados con bastantes casos con una considerable efectividad.

Es usual tener blindajes agujerados en los equipos electrónicos para obtener ventilación y otros requisitos mecánicos. Todos los agujeros, juntas y ranuras reducen la efectividad del blindaje. De forma práctica, en el caso de un blindaje agujerado, la

efectividad intrínseca del material tiene menos importancia que la pérdida a través de ranuras y juntas.

Las características de un campo están determinadas por su generador, su frecuencia, el medio de propagación y por la distancia entre el generador y el punto donde está situado el receptor de la interferencia. En un punto cercano a la fuente del campo, las propiedades del mismo están determinadas principalmente por las características de la fuente. Lejos de ésta, las propiedades del mismo están determinadas principalmente por el medio de propagación. Por ello, se puede dividir el espacio en dos regiones en función de la distancia entre la fuente del campo y el punto de observación (figura 2.16). Cerca de la fuente esta el llamado campo cercano. A una distancia mayor de la longitud de onda λ dividida por 2π ($\lambda/2\pi$) se sitúa el llamado campo lejano o radiación electromagnética, siendo:

$$\lambda(m) = c/f = 2.997925 \times 10^8 / f \quad \text{Hz} \quad (2.28)$$

Esta zona pertenece a las llamadas ondas planas (campo electromagnético). La región alrededor de $\lambda/2\pi$ es la región de transición.

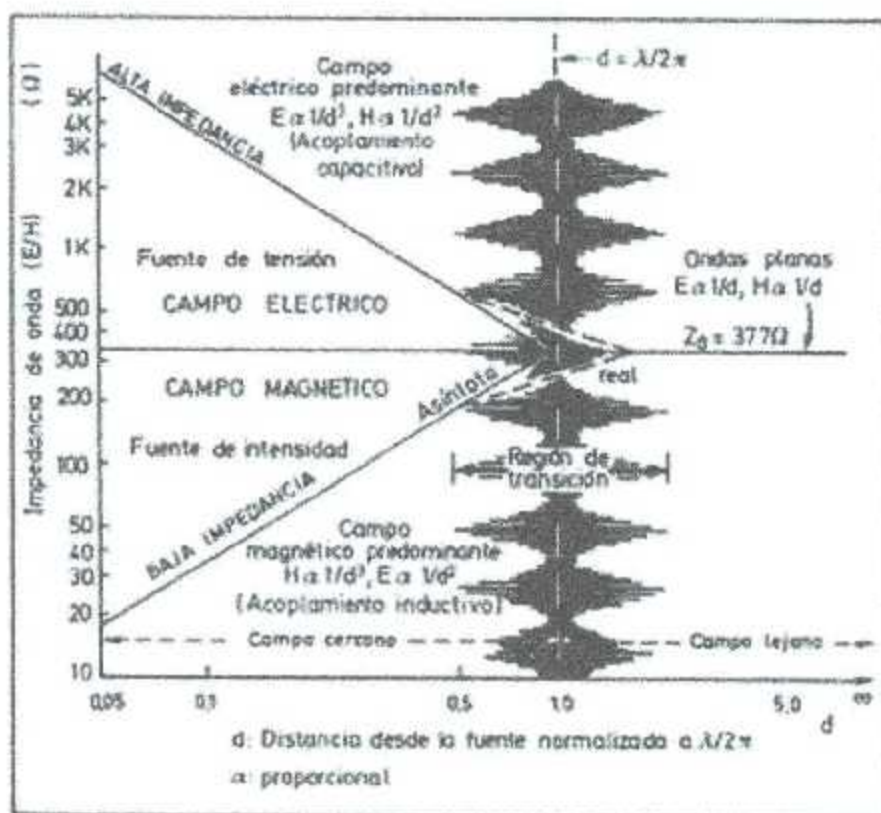


Figura 2.16 Características de campo según la distancia entre fuente y receptor. [3]

El cociente entre la intensidad de campo eléctrico E y la intensidad de campo magnético H , (E/H), tiene unidades de impedancia y se llama impedancia de onda. En el campo lejano, E/H es igual a la impedancia característica del medio ($E/H = Z_0 = 377 \Omega$ en el aire o en el vacío). En el campo cercano esta impedancia está determinada por las características de la fuente y la distancia de la fuente al punto desde donde se observan los efectos del campo. Si la fuente tiene una fuerte intensidad eléctrica y baja tensión ($E/H < 377$), el campo cercano es predominantemente magnético. Contrariamente, si la fuente tiene alta tensión y baja intensidad ($E/H > 377$), el campo cercano será principalmente eléctrico.

En la figura 2.17 se presenta el concepto gráfico de las intensidades de campo en función del tipo de fuente de campo radiado. La fuente básica de campo eléctrico es una antena vertical, lo que corresponde a alta impedancia y baja corriente. La fuente básica de campo magnético es un bucle de corriente, lo que corresponde a baja impedancia y alta corriente. La transición entre los dos tipos de campo se sitúa en la región cercana a $\lambda/2\pi$.

Un campo puede considerarse cercano hasta una distancia aproximada de $1/6$ de la longitud de onda del generador cometiendo aproximadamente solo un 5% de error. A 100 kHz esto ocurre a unos 450 metros, a 1 MHz ocurre a unos 45 metros y a 10 MHz a unos 4.5 metros. Esto significa que si un generador de EMI está en la misma sala que el circuito interferido, es fácil tener un problema de campo cercano. En el campo cercano se deben considerar los campos eléctrico y magnético por separado.

En la zona de campo cercano, si el campo eléctrico es más intenso que el magnético, la intensidad de campo eléctrico E se atenúa, conforme nos alejamos de la fuente, proporcionalmente a $(1/d^3)$ siendo $d = distancia$, mientras que la intensidad de campo magnético H se atenúa proporcionalmente a $(1/d^2)$ (figura 2.16). Contrariamente, en esta misma zona, si la intensidad de campo magnético es mayor que la del campo eléctrico, se atenúa proporcionalmente a $(1/d^3)$, mientras que la intensidad de campo eléctrico se atenúa proporcionalmente a $(1/d^2)$. En el campo lejano, ambas intensidades de campo se atenúan proporcionalmente a $(1/d)$. [3]

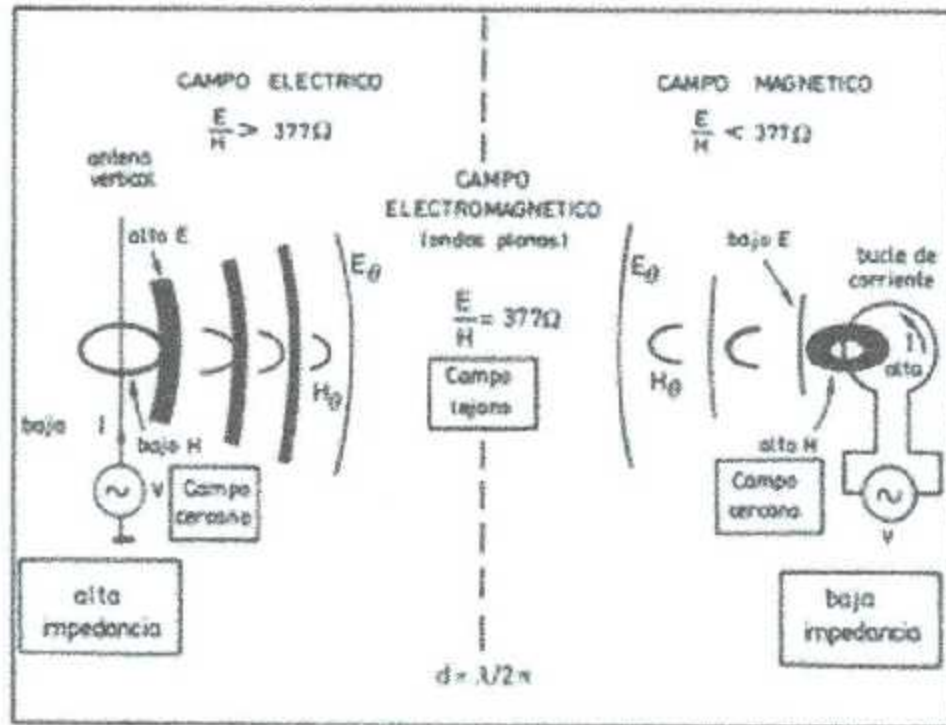


Figura 2.17 Intensidades de campos según el tipo de fuente y de la distancia. [3]

2.8.1 La efectividad de los blindajes.

La efectividad de un blindaje puede especificarse en términos de atenuación en dB de la intensidad de campo. Así, la efectividad S está definida para campos eléctricos por:

$$S = 20 \log(E_0/E_1) \quad \text{dB} \quad (2.29)$$

y para campos magnéticos como:

$$S = 20 \log(H_0/H_1) \quad \text{dB} \quad (2.30)$$

En las ecuaciones precedentes, $E_0(H_0)$ es la intensidad de campo incidente y $E_1(H_1)$ la intensidad de campo que traspasa el blindaje. La efectividad de un blindaje varía con la frecuencia, la geometría del campo, la posición desde donde el campo es medido, con el tipo de campo que está siendo atenuado, la polarización y con la dirección de la incidencia. Los resultados del cálculo de la efectividad sirven para comparar varios materiales en función de su atenuación.

Al incidir una onda electromagnética en una superficie metálica existen dos efectos. La onda es parcialmente reflejada por la superficie, y la parte transmitida (no reflejada) es atenuada al pasar a través del blindaje. Este último efecto provoca las pérdidas por

absorción y son las mismas en los dos tipos de campo: lejano y cercano. Las pérdidas por reflexión dependen del tipo de campo y de la impedancia de onda y, por tanto, no son iguales en los campos cercano y lejano. La energía transmitida puede asimismo reflejarse en la superficie del blindaje contraria a la posición del emisor de campo y volverse a reflejar múltiples veces en las dos superficies. La figura 2.18 muestra el efecto de las radiaciones sobre un blindaje con un agujero. En ella se puede ver cómo actúan la absorción, la reflexión, las reflexiones múltiples y los efectos de bordes y de penetración que provocan interferencias secundarias. El efecto de bordes está provocado por la energía absorbida por el blindaje al ser canalizada la interferencia por el mismo hacia sus extremos. Esto también ocurre en los agujeros y aperturas junto al efecto de penetración, actuando como pequeñas antenas retransmisoras.[3]

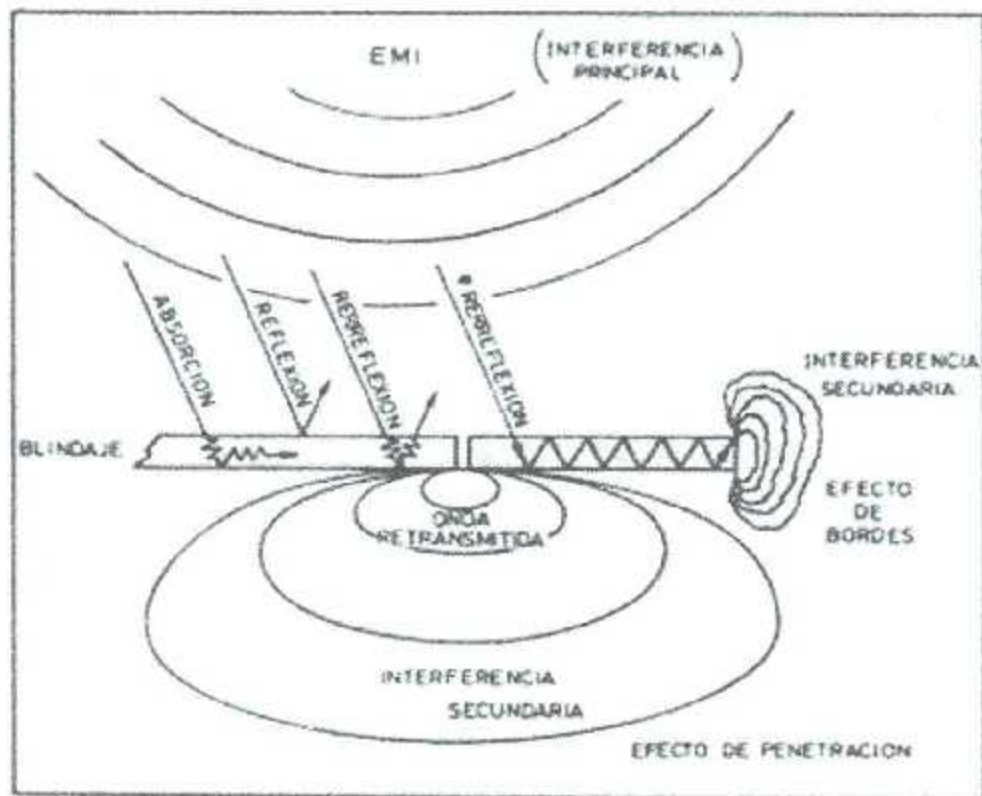


Figura 2.18 Mecanismos de atenuación de campos electromagnéticos.[3]

La efectividad total de un blindaje es igual a la suma de las pérdidas por absorción (A), más las pérdidas por reflexión (R) más un factor (B) que contabiliza las múltiples reflexiones en los blindajes. Así, se puede escribir:

$$S = A + R + B \quad dB \quad (2.31)$$

La tabla 2.4 muestra un escalado cualitativo de la eficiencia de los blindajes con varios márgenes de frecuencia, desde blindajes considerados muy inefectivos o ineficientes (0-10 dB) a los considerados muy efectivos (> 90 dB), cuyo objetivo es difícil de conseguir.

| Material | Frecuencia (kHz) | Pérd. de absorción (todos los campos) | Pérdidas de reflexión | | |
|---|------------------|---------------------------------------|-----------------------|-------------------|--------------|
| | | | campos magnéticos | campos eléctricos | ondas planas |
| magnético $\mu = 1000$ $\sigma_r = 0,1$ | <1 | A-B | A | E | E |
| | 1-10 | C-D | A-B | E | E |
| | 10-100 | E | B | E | D |
| | >100 | E | B-C | D | C-D |
| no magnético $\mu = 1$ $\sigma_r = 1$ | <1 | A | B | E | E |
| | 1-10 | A | C | E | E |
| | 10-100 | B | C | E | E |
| | >100 | C-D | D | E | E |

| EFECTIVIDAD DE LOS BLINDAJES | | | |
|------------------------------|-----------------|----------------|-------------|
| | Atenuación (dB) | Característica | |
| A | 0-10 dB | muy inefectivo | (muy malo) |
| B | 10-30 dB | inefectivo | (malo) |
| C | 30-60 dB | medio | (normal) |
| D | 60-90 dB | efectivo | (bueno) |
| E | >90 dB | muy efectivo | (excelente) |

Tabla 2.4 Resumen de características de efectividad de los blindajes sólidos, sin tener en cuenta las posibles discontinuidades debidas a ranuras o juntas. [3]

El factor B debido a las múltiples reflexiones se despreciable si la absorción $A > 9$ dB. Desde un punto de vista práctico, B se puede despreciar en el caso de campos eléctricos y electromagnéticos y solo se debe considerar en los campos magnéticos.

2.8.2 Blindajes contra el acoplamiento capacitivo (eléctrico).

Un blindaje capacitivo (electrostático) contra campos eléctricos debe incluir todos los componentes a proteger, debe conectarse a un potencial constante que puede ser el común del sistema y debe tener muy baja resistencia. Se debe tener en cuenta que un blindaje mal conectado al común de la fuente de alimentación puede asimismo actuar como antena retransmisora de las radiaciones recibidas por conducción a través de la red y puede resultar perjudicial. Los materiales más usuales para construir estos blindajes son el cobre y el aluminio.

El acoplamiento capacitivo es debido al paso de señales de interferencia a través de capacidades parásitas. Este es el caso de inestabilidad en frecuencia de un oscilador debida al acercamiento de la mano al mismo. En los sistemas digitales, este acoplamiento provoca intermodulaciones (diafonía) en los cables múltiples.

El modo de bloquear el acoplamiento capacitivo consiste en encerrar el circuito o el conductor que se quiere proteger dentro de un blindaje electrostático o de Faraday. Si su cobertura es del 100% (jaula de Faraday), no es necesario conectarlo al común pero, usualmente, lo está para asegurar que las capacidades blindaje-circuito lleven las señales a tierra y no actúen como elementos de realimentación o de intermodulación.

Para evitar el acoplamiento entre un circuito generador de interferencias y un circuito interferido se usa un blindaje de Faraday puesto a potencial cero. En los circuitos digitales de alta velocidad es conveniente utilizar este tipo de blindaje en forma de planos de tierra insertados entre las capas de la placa de circuito impreso para eliminar las capacidades parásitas entre ellas. Otra aplicación común es la de los transformadores apantallados electrostáticamente[3]

2.8.3 Blindajes contra el acoplamiento inductivo (magnético).

Un blindaje magnético efectivo debe encerrar totalmente a los componentes que se quiere proteger y debe tener alta permeabilidad. Con este tipo de blindaje contra el acoplamiento inductivo (campo magnético) es a veces más difícil obtener una buena efectividad en comparación con el blindaje electrostático, porque es más fácil tener alta conductividad en un blindaje eléctrico que alta permeabilidad y alta conductividad al mismo tiempo en un blindaje magnético.

En el campo cercano, las EMI pueden tener un 90% de campo eléctrico E , en cuyo caso, son irrelevantes las pérdidas por reflexión. Sería aconsejable entonces reforzar las

pérdidas de absorción a expensas de las pérdidas de reflexión, escogiendo el hierro como material para el blindaje. Un mejor conductor que el hierro podría ser menos caro, pero completamente inefectivo.

En el acoplamiento magnético, el mecanismo físico es la inducción magnética B , proveniente de cualquier interferencia externa, que induce una tensión parásita en un bucle de corriente en el circuito interferido, de acuerdo con la ley de Lenz:

$$V = -N A \frac{dB}{dt} \quad (2.32)$$

donde N es el número de espiras del circuito receptor y A es el área del bucle. En general, N vale 1 espira en caso de tener acoplamiento.

Es necesario tener en cuenta dos aspectos para defender a un circuito de este acoplamiento. Un aspecto es el de intentar minimizar los campos perjudiciales en la misma fuente que los genera. Esto se consigue reduciendo el área de los bucles de corriente o apantallando magnéticamente con materiales de alta permeabilidad todo el generador de interferencias, disponiendo los cables lo más cerca posible de un plano de tierra, si este existe. El otro es reducir la captación inductiva en el circuito interferido, minimizando el área de sus bucles, ya que, según la ley de Lenz, la tensión inducida en un bucle es proporcional a su área. Así, los dos aspectos implican la reducción de las áreas.

Como se ha dicho en el apartado anterior, un plano de tierra actúa como blindaje de Faraday contra el acoplamiento capacitivo y también contribuye a reducir el acoplamiento inductivo, al reducir las áreas de los bucles en los circuitos impresos. Un plano de tierra es una superficie conductora que sirve como conductor de retorno para todos los bucles de corriente del circuito. Esto deja libre a cada bucle de corriente para tener cualquier configuración, teniendo mínima su área (para frecuencias donde el camino de tierra tiene una impedancia prácticamente inductiva). Por ello, si la pista que transporta una señal dada zigzaguea a través del circuito impreso, la línea de retorno de esta señal es libre de zigzaguear por debajo en el plano de tierra. Tal configuración minimizará la energía almacenada en el campo magnético producido en este bucle de corriente. Un flujo magnético mínimo significa un área efectiva mínima, una susceptibilidad mínima al acoplamiento inductivo y una radiación magnética mínima. [3]

2.8.4 Blindajes contra el acoplamiento por radiación.

No existe el blindaje perfecto contra campos de alta frecuencia. Como ya se ha dicho, al chocar con la superficie del blindaje, es reflejada una parte de la onda incidente el resto atraviesa el blindaje, siendo atenuada por este. Un material con alta conductividad es un buen reflector y un material con alta permeabilidad es un buen absorbente. El blindaje compuesto por estos dos materiales da buenos resultados en bastantes casos con una

considerable efectividad pero, sin embargo, no es práctico. Este problema se soluciona utilizando un blindaje múltiple con dos metales diferentes dispuestos el uno junto al otro gracias a un baño galvánico. Es usual apantallar con un material ferromagnético galvanizado y con cobre dirigido hacia la fuente del campo para provocar una pérdida sustancial por reflexión. La presencia del material ferromagnético provoca luego altas pérdidas por absorción.

La forma de trabajo de este blindaje utiliza el hecho de que los campos EMI inducen corrientes en el material del blindaje. Las corrientes inducidas disipan energía de dos modos: pérdidas por calor (absorción) en el material y pérdidas de radiación (reflexión) al irradiar sus propios campos sobre el blindaje. La energía en ambos mecanismos es absorbida de los campos incidentes EMI y, por ello, las EMI quedan sin energía para penetrarlo. [3]

2.9 EMC en instalaciones de potencia.

La fiabilidad de funcionamiento de un equipo o de una instalación donde se combinan dispositivos de potencia que generan interferencias de banda ancha con un alto contenido de energía y dispositivos de pequeñas señales susceptibles a las mismas, está basada en el cumplimiento de ciertas reglas constructivas y de instalación, que permitan hacer compatibles los niveles de perturbación de los primeros con los niveles de señal de los últimos. [3]

2.9.1 Clasificación de señales y ambientes.

Los equipos e instalaciones comprenden partes con distintos niveles de emisión y susceptibilidad. Para poder tratar el problema de compatibilidad del conjunto, debemos establecer en primer lugar una división en zonas o ambientes, según su nivel de perturbación en segundo lugar una clasificación de las señales según su nivel de susceptibilidad.

En las tablas 2.5 y 2.6, se presentan dichas clasificaciones basadas en las recomendaciones de IEC Comité 77 WG B2, que se ocupa de las normas de instalación y clasificación ambiental.

| CLASE | CARACTERÍSTICAS |
|-------|--|
| I | Señales de tipo TTL o similar, de baja tensión y con frecuencias de 1 a 20 MHz |
| II | Señales analógicas con niveles del orden de 10 mV y frecuencias de hasta 1kHz (sensores) y señales digitales de frecuencias hasta 100kHz |
| III | Señales analógicas de instrumentación y regulación con valores de 1 a 10 V o 4 a 20 mA con frecuencias menores de 1kHz, y señales digitales con tensiones mayores de 10 V y corrientes entre 5 y 10mA. Se incluyen también señales analógicas del orden de 10 mV si éstas pueden ser filtradas con rechazo a partir de unos pocos heridos. |
| IV | Señales analógicas de baja frecuencia con niveles de 10 V y 100 mA, tales como las procedentes de transformadores de medida o de tipo digital procedentes de relés, contactores, etc. |
| V | Señales asociadas a equipos de comunicaciones a larga distancia con niveles de potencia en torno a 1 W y frecuencias entre 20 y 500 kHz (modems). |

Tabla 2.5 Clases de señales según su susceptibilidad. [3]

| TIPO DE AMBIENTE | CARACTERÍSTICAS |
|------------------|---|
| A | Partes de la instalación con señales de tipo digital Clase I, que generan bajos niveles de interferencia y, en cambio, son susceptibles de ser distorsionados. |
| B | Partes de la instalación con señales analógicas sensibles de Clase II, tales como equipos de regulación y control. |
| C | Partes de la instalación, con señales de Clase II, que generan bajos niveles de interferencia y con nivel medio de sensibilidad (instrumentación). |
| D | Partes de la instalación con señales de Clase IV, que generan niveles de interferencias relativamente altos y son poco sensibles a perturbaciones externas. (relés, interruptores, motores, etc.) |
| E | Partes de la instalación que manejan señales de control remoto o comunicaciones, Clase V, que deben ser transmitidas a largas distancias. |

Tabla 2.6 Clasificación de ambientes según nivel de perturbación. [3]

2.9.2 EMC en instalaciones de alta tensión.

Dejando aparte los fenómenos externos (descargas o cortocircuitos) los orígenes de las perturbaciones en las inmediaciones de dichas instalaciones son básicamente los siguientes:

- Descargas por efecto corona en la proximidad de la superficie de los conductores.
- Descargas y perforaciones en regiones de fuerte sollicitación mecánica de los aisladores.
- Perforaciones en contactos flojos o defectuosos.
- Reemisión por radiación de perturbaciones RF captadas por las líneas.

2.9.2.1 Propagación

Las distintas componentes del espectro se propagan por diversos mecanismos. En la banda de 150 kHz a unos 30 MHz la propagación tiene lugar básicamente por conducción a través de las líneas con una débil atenuación de tipo exponencial con la distancia. Por tanto, se recogerán los efectos acumulados de varios kilómetros pudiendo provocar ondas reflejadas y radiaciones en puntos de discontinuidad de la línea, debido a su comportamiento como línea de transmisión.

Las siguientes ecuaciones muestran como se rige la propagación a través de las líneas, con el único fin que se pueda ver la dependencia de cada uno de los parámetros.

La amplitud de las perturbaciones conducidas a través de las líneas puede evaluarse por las ecuaciones:

$$U_x = U_o e^{-ad} \quad (2.33)$$

$$I_x = I_o e^{-ad} \quad (2.34)$$

Donde U_x e I_x son los valores de la tensión y corriente a una distancia d , partiendo de las amplitudes en origen U_o e I_o y el coeficiente a , depende de la disposición de cables en la línea.

Las magnitudes U_x e I_x están además relacionadas por la impedancia característica de la línea, Z_o .

$$U_x(\omega) = Z_o I_x(\omega) \quad (2.35)$$

$$Z_0 = \sqrt{L/C} \quad (2.36)$$

Los campos próximos para la banda de 0.15 a 30 MHz dependen de la configuración geométrica y disposición de los cables y de las condiciones del suelo, mientras que por encima de unos 30 MHz las longitudes de onda son interiores a las distancias entre conductores y la propagación tiene lugar según las leyes generales de radiación de campos electromagnéticos lejanos en el aire, con vectores E y H ortogonales y relacionados por la impedancia característica del medio.

CAPÍTULO III

IDENTIFICACIÓN DE ALGUNOS PROBLEMAS LOCALES EN SUBESTACIONES DE POTENCIA

3.1 Introducción

En la zona de transmisión laguna se sitúa la subestación Gómez Palacio, la cual está dividida en una parte aérea de 230kV y una parte encapsulada(SF6) de 115kV. Estas dos secciones están interconectadas por medio de 3 bancos de autotransformadores (AT-99, At-98 y AT-97) como se muestra en la figura 3.1.

La parte aérea recibe energía de ciclo combinado y esta interconectado a diferentes subestaciones de transmisión mientras que la subestación aislada (GIS) obtiene energía de la subestación intemperie a través de los bancos de transformación y de una planta generadora llamada Iberdrola; la subestación de SF6 está conectada a varias subestaciones las cuales son de distribución. (Figura 3.1)

En esta subestación se están presentando problemas en equipos electrónicos por posibles interferencias electromagnéticas. Dichos equipos electrónicos se utilizan para comunicar, controlar, medir o conocer el estado en que se encuentran todos los elementos que forman la subestación.

Entre los problemas que se han presentado se encuentran daños en las tarjetas de los dispositivos, bloqueo de equipos y mandos falsos de los controladores. Al parecer estos sucesos ocurren al dispararse los interruptores, debido a una falla, que se encuentran en la línea 4100 de la subestación Francke, la cual esta aldaña a la subestación aislada por gas.

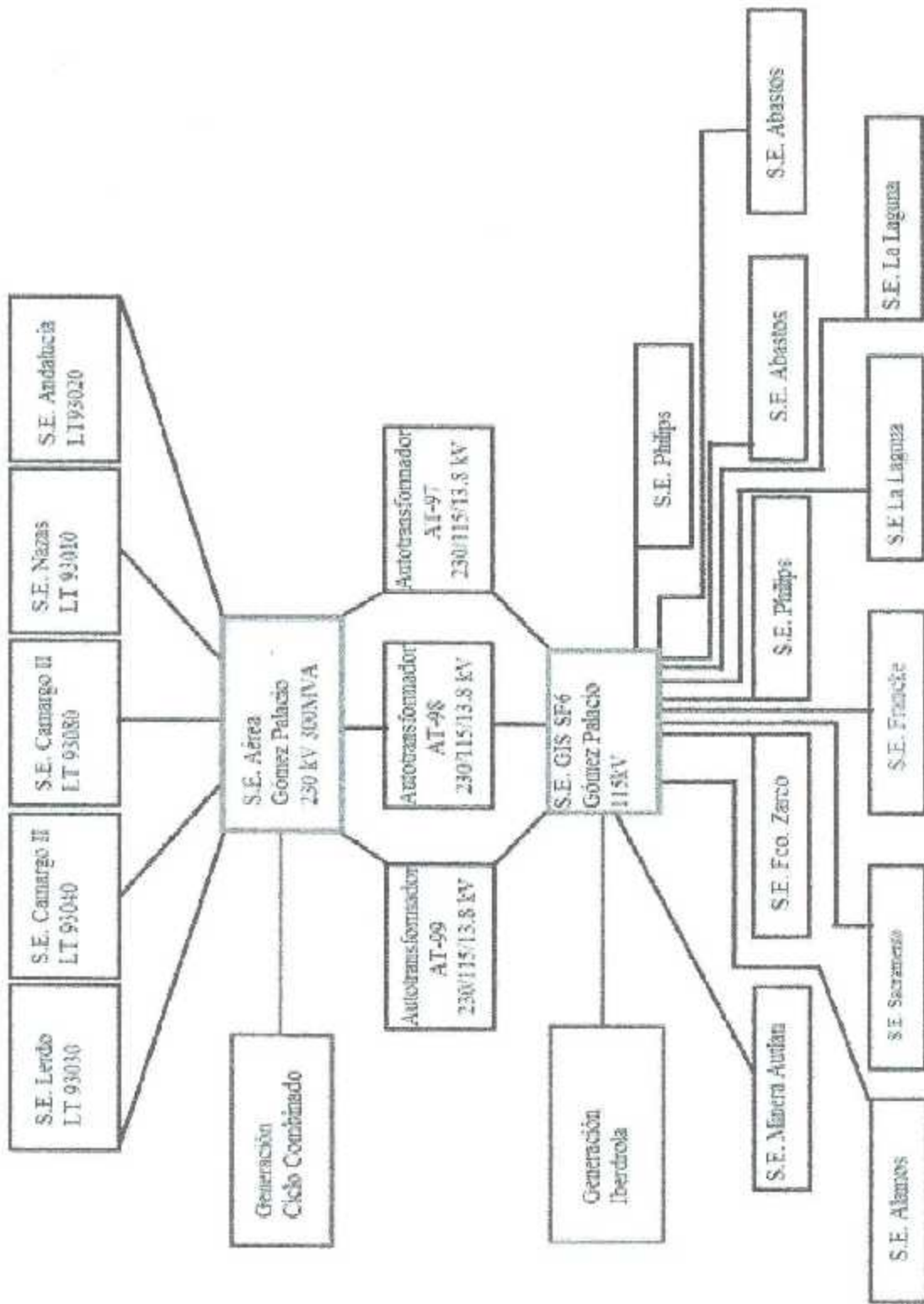


Figura 3.1 Diagrama a bloques de las conexiones de la subestación Gómez Palacio.

3.2 Fallas en el sistema SCADA localizado en subestación encapsulada (SF6).

Para que las subestaciones de potencia estén trabajando de manera adecuada se debe de tener un sistema de monitoreo o supervisión para poder conocer como se encuentra el estado de las mismas, es importante conocer en todo momento cual es la disposición de todas su partes (interruptores, transformadores, cuchillas, protecciones, bancos de capacitores, etc.). Dicho sistema de monitoreo incluye diferentes dispositivos que pueden ser de comunicación, controladores, transductores, etc.

El caso de la subestación Gómez Palacio no es la excepción, para esta construcción se utiliza el sistema de Supervisión de Control y Adquisición de Datos (traducción aproximada de SCADA, Supervisory Control And Data Acquisition), el cual permite la gestión y control de cualquier sistema local o remoto gracias a una interfaz gráfica que comunica al usuario con el sistema. Este sistema está formado principalmente por una interfaz hombre-máquina, una unidad central, unidades remotas y sistema de comunicaciones.[12]

Por unidad o estación remota, podemos entender aquel conjunto de elementos dedicados a labores de control y/o supervisión de un sistema, alejados del centro de control y comunicados con éste mediante algún canal de comunicación. Estos elementos envían todos los datos a la unidad central. Dentro de esta clasificación se encuentran varios elementos más o menos diferenciados:

- RTU (Remote Terminal Unit): especializados en comunicación.
- PLC (Programmable Logic Controller): tareas generales de control.
- IED (Intelligent Electronic Device): tareas específicas de control.

Los dispositivos electrónicos inteligentes son elementos con propiedades de decisión propias (programas) que se ocupan de tareas de control, regulación y comunicación. Dentro de esta clasificación se pueden encontrar elementos tales como PCL, reguladores, variadores de frecuencia, registradores, procesadores de comunicaciones, generadores de tiempo y frecuencia, controladores de energía reactiva, transductores, etc.[12]

En la subestación Gómez Palacio existen dos unidades centrales una que recibe los datos de la parte en intemperie y otra de la parte encapsulada (SF6), cada unidad central toma la información de los dispositivos electrónicos inteligentes lo cuales son modelo D25 de la marca General Electric como el que se muestra en la figura 3.2.



Figura 3.2 Dispositivo electrónico inteligente modelo D25 de General Electric.

Estos mencionados D25's se encuentran en las respectivas casetas de control de la parte intemperie y la encapsulada, en el caso de la subestación SF6, la caseta se localiza justo encima de la subestación encapsulada, y es aquí donde se están presentando problemas con los dispositivos los cuales han presentado bloqueos, mandos falsos e incluso daños físicos en tarjetas de los D25's.

Un detalle importante en el estudio de este problema es la manera en que se alimentan los equipos ya que es posible que la interferencia producida se acople por este camino.

Aledaña a la caseta de control de la subestación GIS se encuentra la subestación de distribución Francke, esta recibe 115 kV de SF6, de manera subterránea, y los transforma a 13.8 kV para su distribución (la parte de interés de su conexión se puede observar en la figura 3.3).

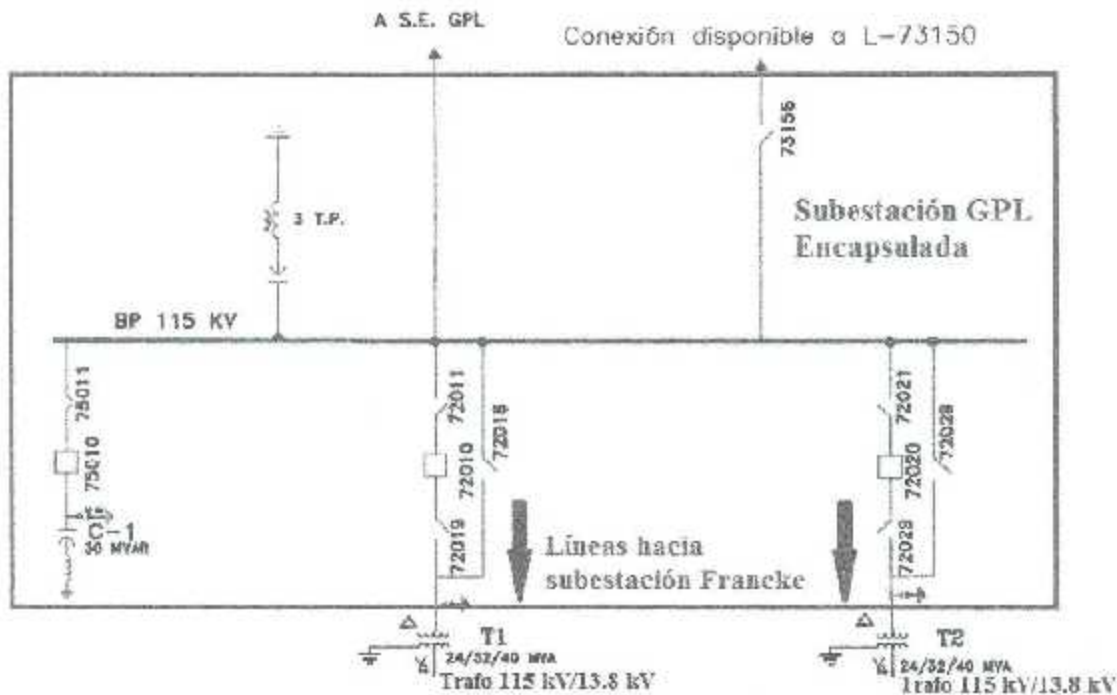


Figura 3.3 Diagrama unifilar de subestación GPL de SF6.

De la subestación Francke sale la línea 4100 la cual alimenta los servicios eléctricos de la caseta en SF6 (esto incluye los dispositivos de estudio), los servicios tienen dos respaldos en el caso de que falte red de distribución, estos respaldos son una planta de emergencia y una fase de un transformador que se encuentra en la subestación aérea de 230 kV. La tensión proporcionada a través de la línea 4100 llega a un banco de transformación el cual produce una tensión de 120 Vca para alimentar diferentes equipos electrónicos. Para alimentar los D25's el voltaje de 120 Vca llega a un inversor inteligente de la marca Philtek modelo HPi 5K-120-N, el inversor además de alimentarse con los 120 V en alterna tiene el respaldo de alimentación de un banco de baterías de 129 Vcd, a la salida del inversor se tendrán 120 Vca el cual alimenta a 4 fuentes rectificadoras en paralelo, estas producen 48 Vcd y cada una alimenta a 4 equipos electrónicos inteligentes, las fuentes rectificadoras también tiene el respaldo de un banco de baterías de 129 Vcd, todo esto se muestra en la figura 3.3.

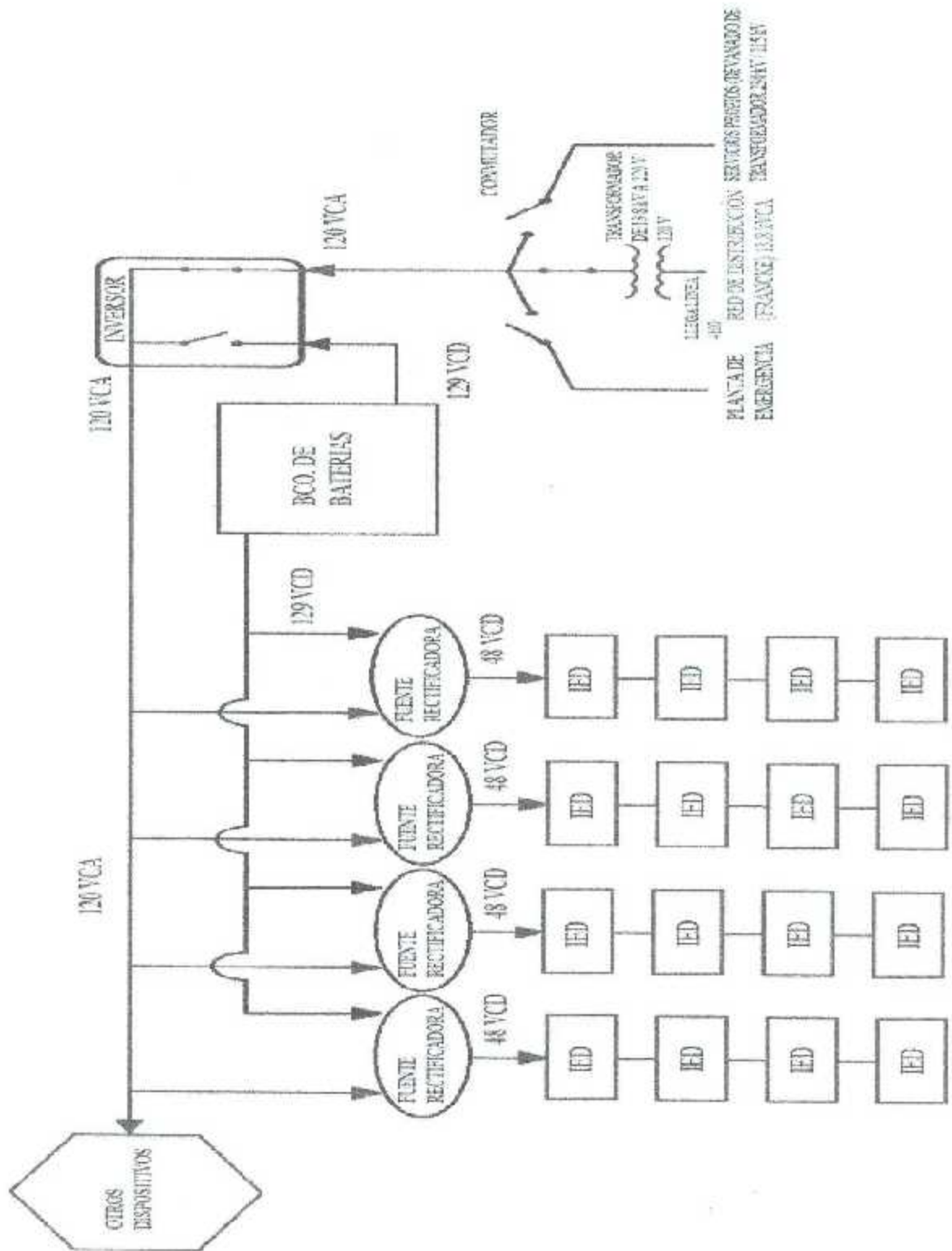


Figura 3.4 Alimentación de dispositivos D25's.

Las fallas que se han presentado en los equipos de control y monitoreo se han producido cuando existe una interrupción por falla en la subestación Francke, específicamente en la línea 4100. Por lo que existe la posibilidad que el transitorio producido por la apertura de interruptores afecte a los equipos por un acoplamiento conductivo.

3.3 Fallas en el sistema Alcatel-Lucent OmniPCX Office localizado en subestación aérea.

En un lugar cercano a la parte aérea de la subestación Gómez Palacio existe un caseta con dispositivos electrónicos de conmutación y telefonía que se utilizan para la comunicación de personal dentro de la planta.

El sistema utilizado para comunicación es el Alcatel-Lucent OmniPCX Office el cual es un servidor de comunicaciones pre-configurado que permite a las empresas disfrutar de un sistema de telefonía profesional. Este sistema ofrece servicios de negocio, incluida la bienvenida de cliente, la distribución automática de llamadas (ACD), SoftPhone (teléfono en PC), aplicaciones de terceros XML (eXtensible Markup Language), telefonía IP (Internet Protocol) y SIP (Session Initial Protocol), teléfonos de escritorio, movilidad, comunicaciones unificadas y colaboración de audio y video.

Cuatro diferentes modelos cubren las necesidades de comunicación de empresas de cualquier tamaño. Todas las plataformas se componen de un núcleo de voz sobre IP con soporte para la grabación analógica y TDM, para simplificar la migración a sistema IP.

Las cuatro plataformas son (figura 3.4):

- Compact (C)
- Small (S)
- Medium (M)
- Large (L)

Cuando se utilizan teléfonos IP, todas estas plataformas admiten hasta 200 usuarios IP.

Cuando se utilizan teléfonos analógicos o Advanced (TDM), la configuración se crea empleando regías TDM para incorporar las tarjetas de ampliación necesarias en las plataformas:

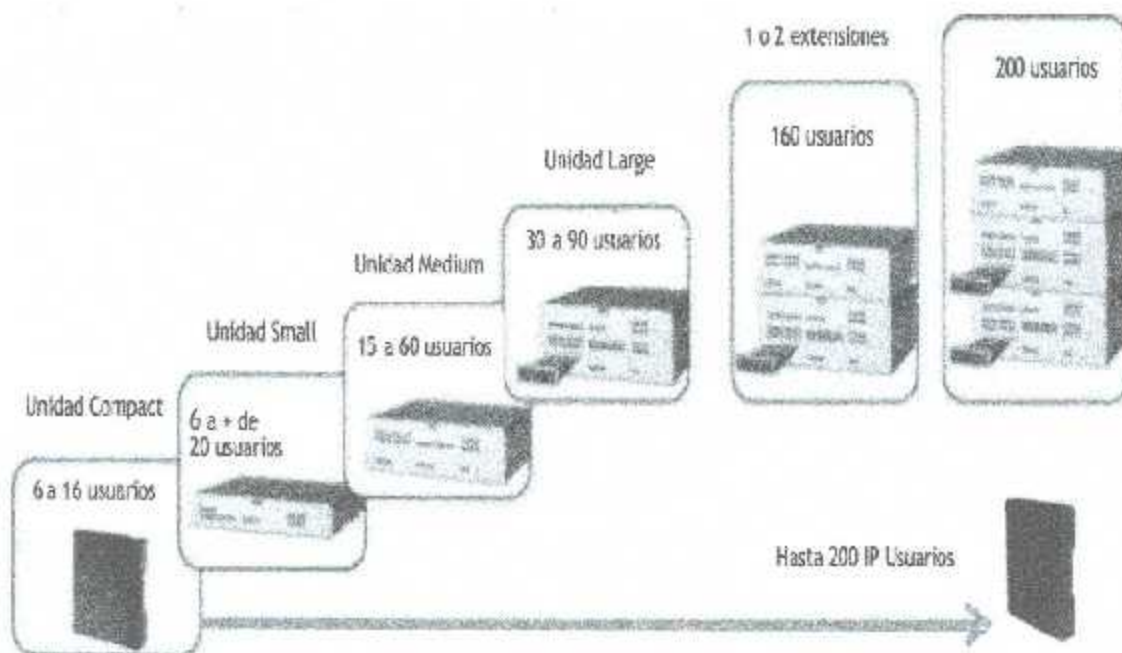


Figura 3.5 Plataformas para el sistema de comunicación.

Todas las unidades OmniPCX Office RCE están equipadas inicialmente con:

- Una potente CPU denominada PowerCPU con SIP en el núcleo (hasta 16 canales VoIP nativos).
- Una tarjeta de memoria.

Un disco duro adicional se requiere en los siguientes casos:

- Más de 30 horas de almacenamiento de mensajería vocal.
- Almacenamiento de estadísticas del centro de llamadas.

La unidad Compact es un armario de montaje mural.

Los bastidores de expansión pequeño, mediano y grande están diseñados con el mismo chasis que las unidades pequeña, mediana y grande.

Los chasis Small, Medium y Large (pequeño, mediano y grande respectivamente) son apilables.

Los chasis pequeño, mediano y grande pueden integrarse en un bastidor de 19 pulgadas empleando un kit opcional de montaje en bastidor.

Los chasis pequeño y mediano pueden montarse en una pared empleando el kit opcional de montaje mural.

El chasis Small (pequeño) puede recibir alimentación de 110 voltios o 220 voltios.

Los chasis Medium y Large (mediano y grande respectivamente) presentan referencias diferentes cuando reciben alimentación de 110 voltios o 220 voltios.





| Tipo de módulo | |
|---|--|
|  | <p>OmniPCX Office Compact Armario de montaje mural Dos ranuras:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Una ranura dedicada para la CPU • Una ranura universal (excepto SLI16) • Placa hija mini-mix opcional en la CPU <p>Adaptador externo de 12 V CA/CC Convertidor CC/CC interno Cubierta de plástico de cableado extraíble</p> |
|  | <p>OmniPCX Office Small Tres ranuras:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La ranura de la CPU es dedicada • Dos ranuras universales (excepto SLI16) |
|  | <p>OmniPCX Office Medium Seis ranuras:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La ranura de la CPU es dedicada • Cinco ranuras universales |
|  | <p>OmniPCX Office Large Nueve ranuras:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La ranura de la CPU es dedicada • Cuatro ranuras universales • Las otras cuatro ranuras aceptan todas las placas excepto UAI16-1 y MIX |

Tabla 3.1 Módulos que se utilizan según la plataforma.

En la zona de transmisión cerca de la parte aérea de la subestación Gómez Palacio se han reportado daños físicos en las tarjetas del equipo OmniPCX Office Large debido principalmente a descargas atmosféricas cercanas y también en la conmutación en servicios propios, aunque la segunda opción de manera menos regular.

3.4 Otros problemas.

Aparte de los dos casos mencionados con anterioridad existen otros problemas los cuales no se especifican de manera más significativa ya que no se tienen registros ni datos debido a la falta de información sobre los eventos ocurridos en el sistema.

Uno de los problemas también se presentó en la subestación Gómez Palacio en la parte aérea, aquí existió la apertura de dos interruptores de potencia sin alguna razón conocida, los trabajadores de CFE buscaron alguna falla que pudiera ocasionar la acción de los interruptores, pero no encontraron ninguna anomalía que no lo provocara. Es posible que esta falla haya sido ocasionada por alguna interferencia electromagnética pero de la cual no se sabe su origen.

Otro problema que tuvieron fue localizado en otra subestación aérea con el nombre de Torreón Sur, aquí se presentaron fallas en el sistema de comunicación entre equipos controladores y los cambiadores de TAP's de los transformadores, los cuales se comunican por medio de fibra óptica. Una teoría sobre que puede provocar estas fallas son las altas temperaturas que se presentan en ese sitio, lo cual puede modificar el buen funcionamiento del sistema.

CAPÍTULO IV

LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN Y MODELADO

4.1 Introducción

El estudio que se realizará en la tesis es sobre el problema presentado en los dispositivos D25's, que son parte del sistema SCADA, recordando que estos equipos son alimentados por la línea 4100 de la subestación de distribución Francke (Figura 3.3) y que presentan fallas o sufren daños al existir una interrupción por falla en dicha línea. Por lo que es muy importante conocer las características de la línea como son su altura, distancia y camino que recorren, tipo de conductores y características físicas de ellos, entre otros parámetros importantes que puedan afectar la posible interferencia producida por el transitorio generado. Para el estudio y modelado se utilizará el software ATP-EMTP el cual es una herramienta muy importante en la simulación de procesos transitorios.

4.2 Información y modelado general de la alimentación de los equipos.

Como se había mencionado con anterioridad los dispositivos electrónicos inteligentes (IED) reciben energía eléctrica de la subestación Francke con capacidad de 13.8 kV mediante la línea 4100, esta energía entra en proceso de transformación y rectificación por medio de diferentes dispositivos que se presentara su información y modelado más adelante.

La parte importante de este subtema es conocer la disposición de los elementos que son parte del proceso de alimentación de los equipos, enseguida se muestra información y de la subestación Francke.

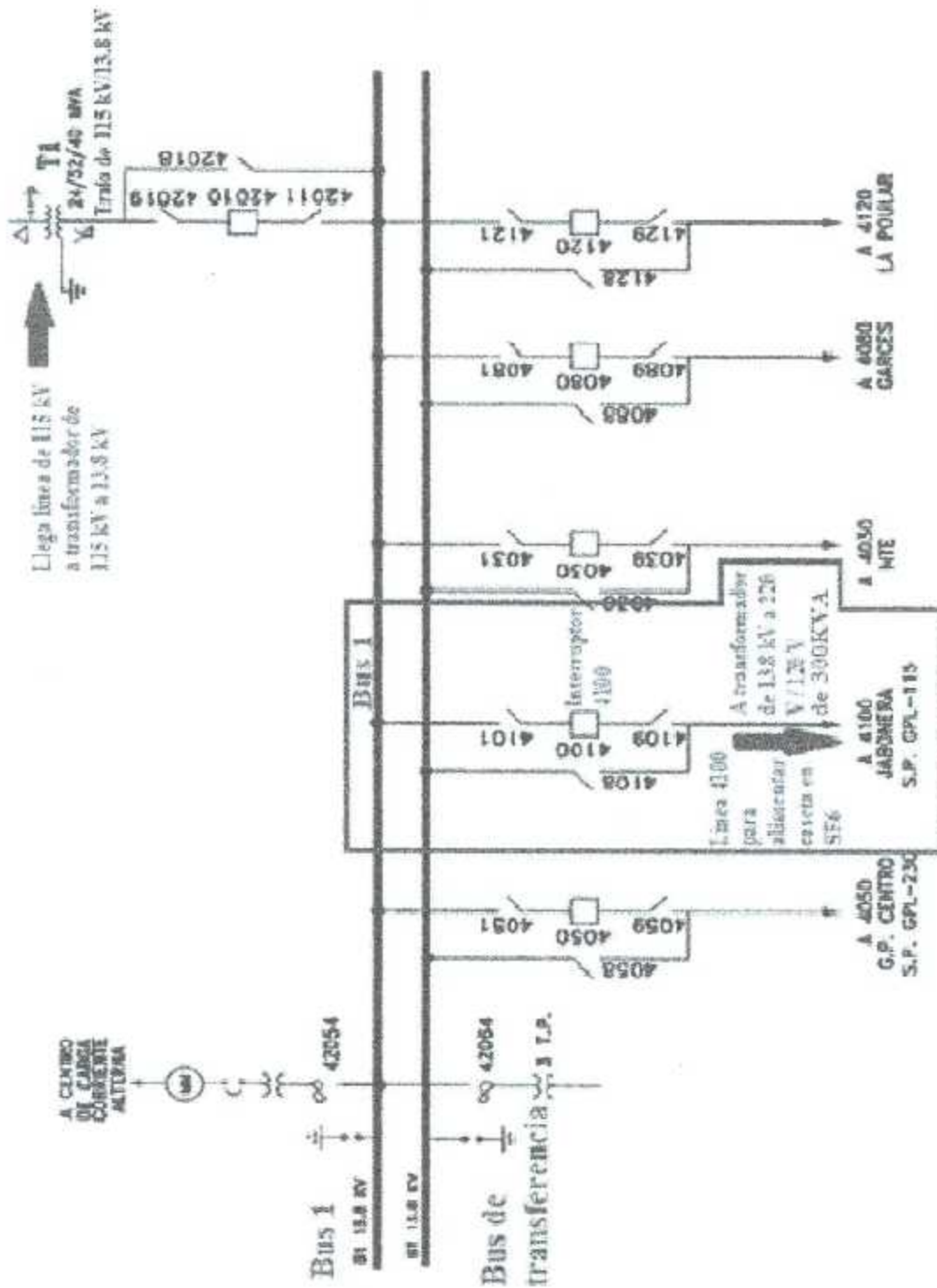


Figura 4.1 Diagrama unifilar de la zona de interés en la subestación Francke donde se muestra la línea 4100 dentro de la subestación

La distancia que existe del bus 1, con tensión de 13.8 kV, al interruptor 4100 es de 20 metros, y del interruptor a la caseta situada en la subestación de SF6 a través de la línea 4100 (figura 4.3) es de 120 metros.

Para evaluar el efecto de la interrupción por falla en la línea 4100 de la subestación Francke en los dispositivos electrónicos de la caseta de la subestación GIS, se utiliza un prototipo equivalente el cual se representa por un modelo en ATP (figura 4.4).

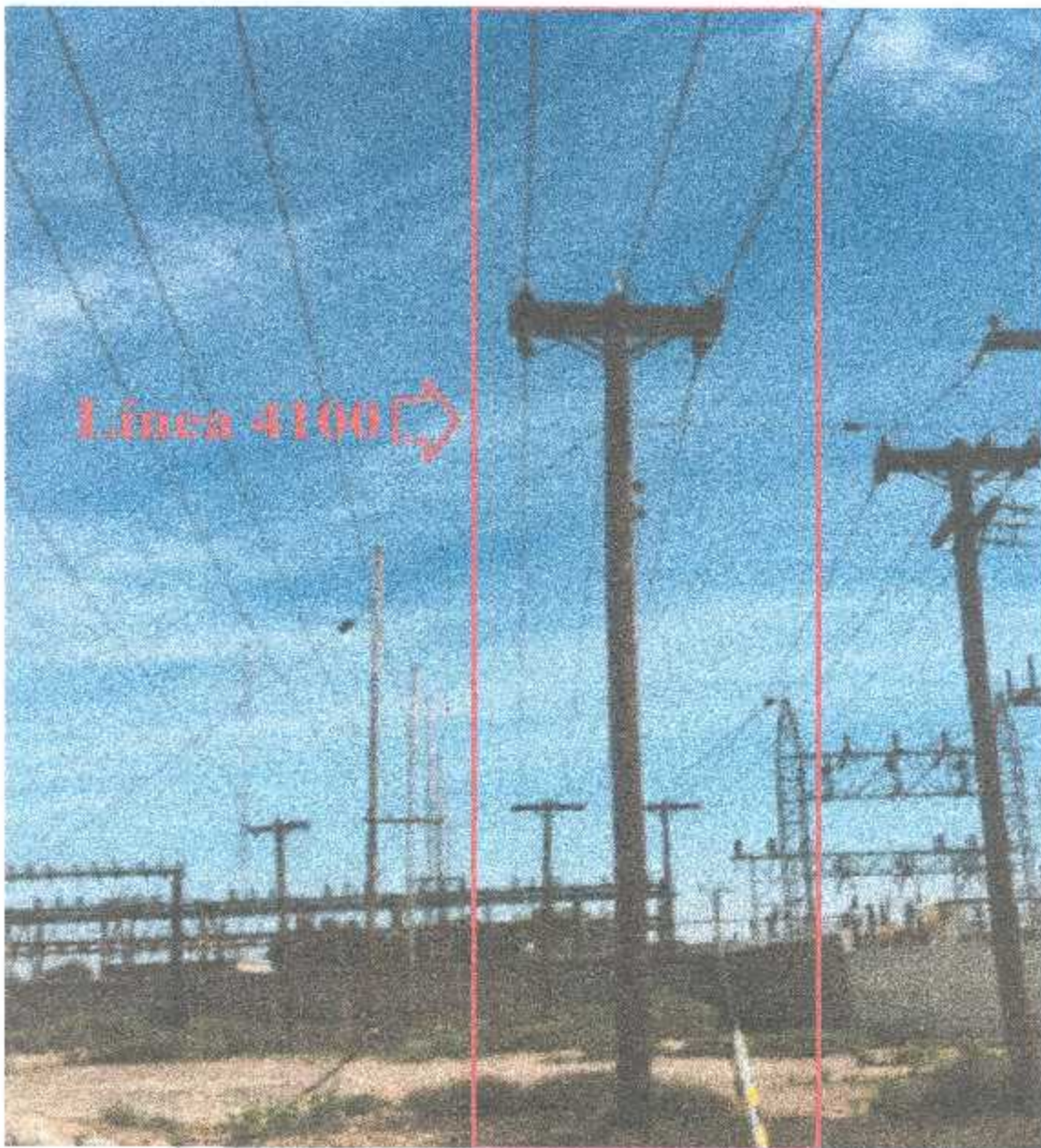


Figura 4.2 Imagen de fotografía de la línea 4100.

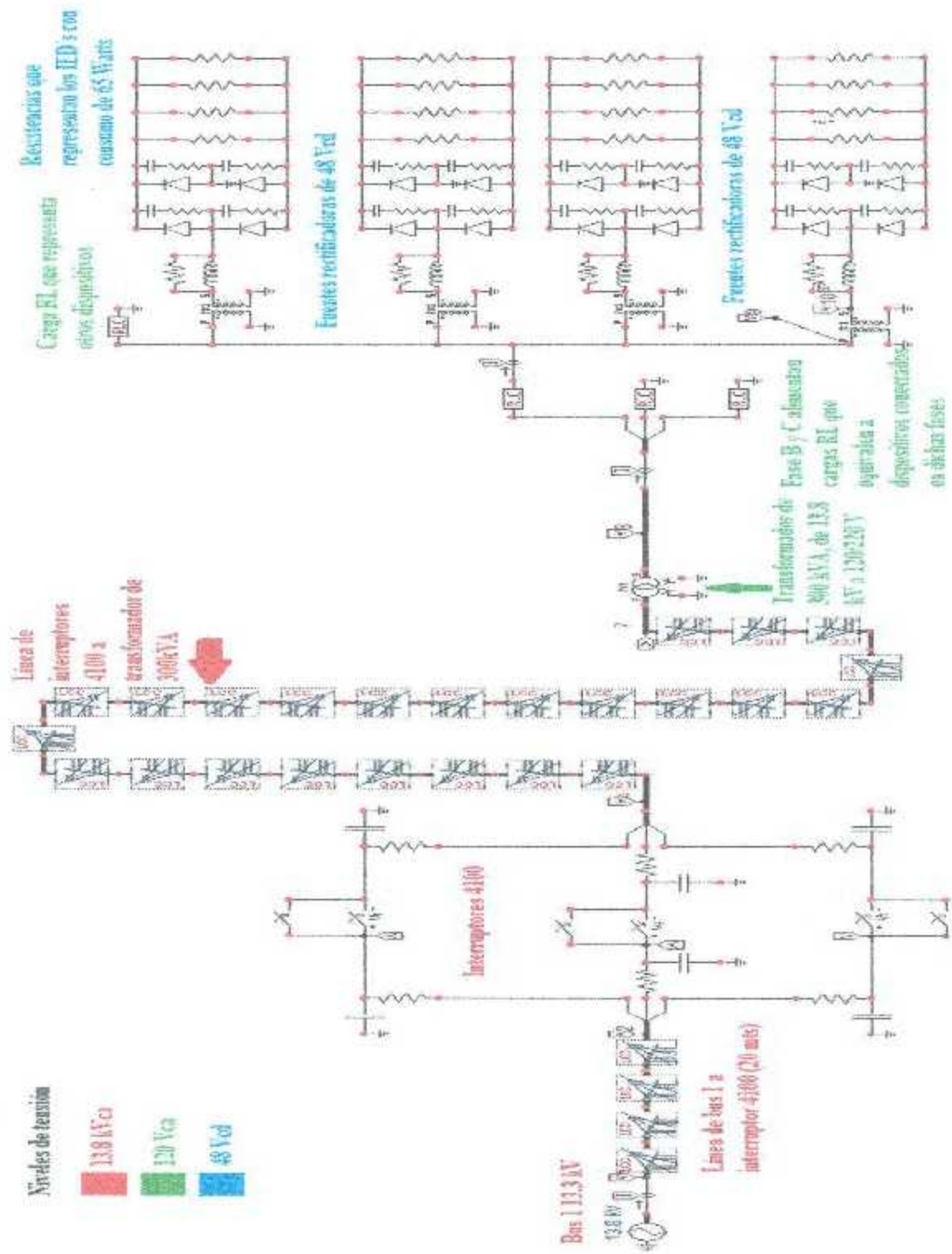


Figura 4.3 Modelo de la línea 4100 en ATP.

El modelo se forma por una fuente trifásica de tensión alterna, una línea con una medida total de 140 metros la cual se representa con módulos LCC (Line Cable Constant por sus siglas en inglés), los interruptores del centro del esquema representan el arco producido al abrir en el interruptor, también se muestra un transformador ideal, 4 rectificadores que alimentan 4 cargas resistivas que simulan los IED's y 3 cargas RL que representan otros dispositivos. Se explicará el modelado de cada elemento en los siguientes subtemas.

4.3 Información y modelado de la línea.

A continuación se muestra la información de la línea 4100, la línea tiene una extensión total de 140 metros, para el estudio se dividió en dos partes generales las cuales son la distancia que existe desde el bus 1 hasta el interruptor 4100 y la segunda parte es desde el interruptor 4100 a la entrada de la caseta en la subestación aislada, la primera parte tiene una distancia total de 20 metros y la segunda de 120 metros. Las líneas tienen una altura de 8 metros y tienen una disposición transversal de manera que si tomamos la fase A en el punto 0 de un eje x, la fase B estará a 1.2 metros de este punto y la fase C a 2.4 metros. Para modelar la sección de la línea de alta tensión (13.8 kV) se utilizó un modelo del circuito equivalente "PI", el cual es más apropiado para la simulación de líneas cortas, con 5 metros de longitud por cada módulo LCC.

A continuación se muestran las características de la línea 4100.

| Datos de la línea | |
|----------------------------------|--|
| Nombre de la línea | 4100 Jabonera S.P. GPL-115 |
| Distancia total | 140 metros |
| Conductor | ASCR 1/0 AWG R_{in} : 0.168519 cm R_{out} : 0.50292 cm Resis : 0.6959 Ω /Km en DC[8] |
| Altura de la línea | 8 metros |
| Tensión de operación de la línea | 13.8 kV |

Tabla 4.1 Características de la línea 4100

Los valores de resistencia y de radio exterior e interior se obtienen mediante la tabla A.1

4.3.1 Características geométricas de los conductores.

Los módulos utilizados en ATP para modelar los conductores son "Line/Cable data" o LCC, como se muestra en la figura 4.5 y figura 4.6, este bloque está formado por dos pestañas, la primera que se llama "Model" la cual permite ingresar las constantes de la línea así como el modelos empleado para calcular el comportamiento transitorio.

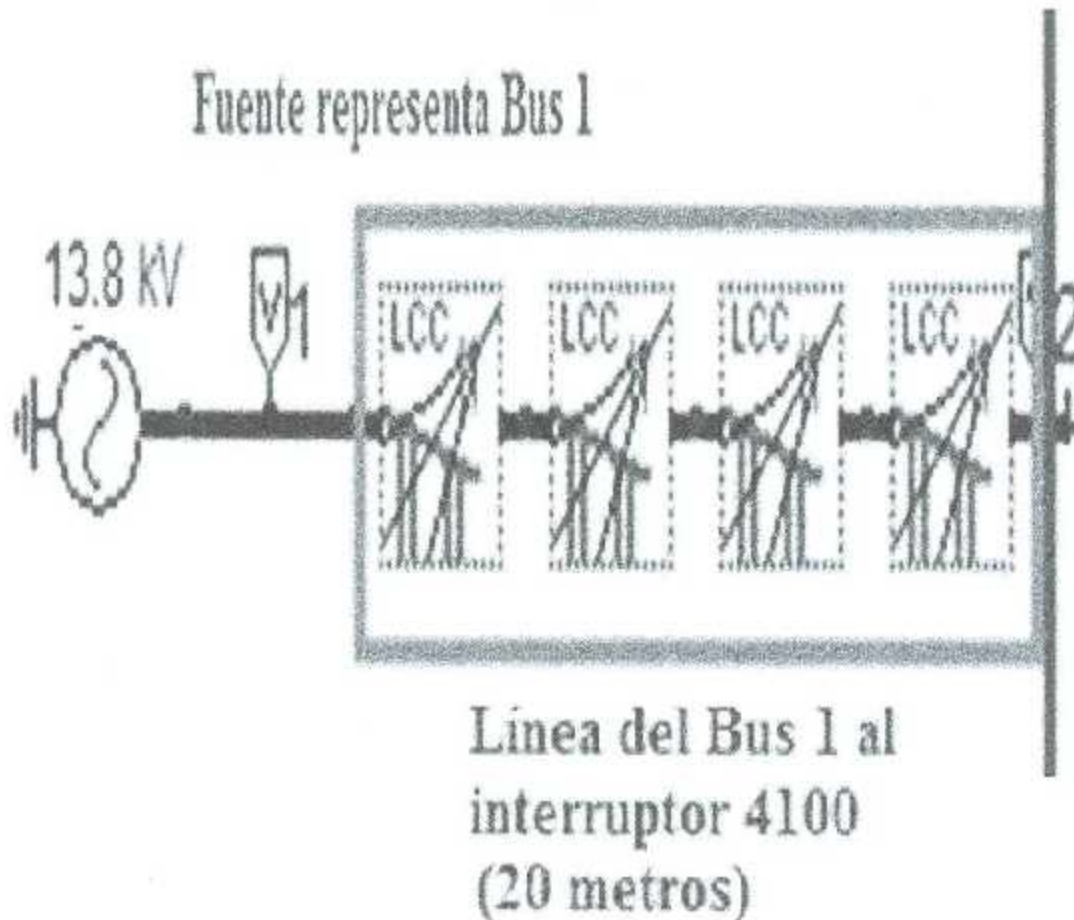


Figura 4.4 Secciones de línea de bus 1 a interruptor 4100.

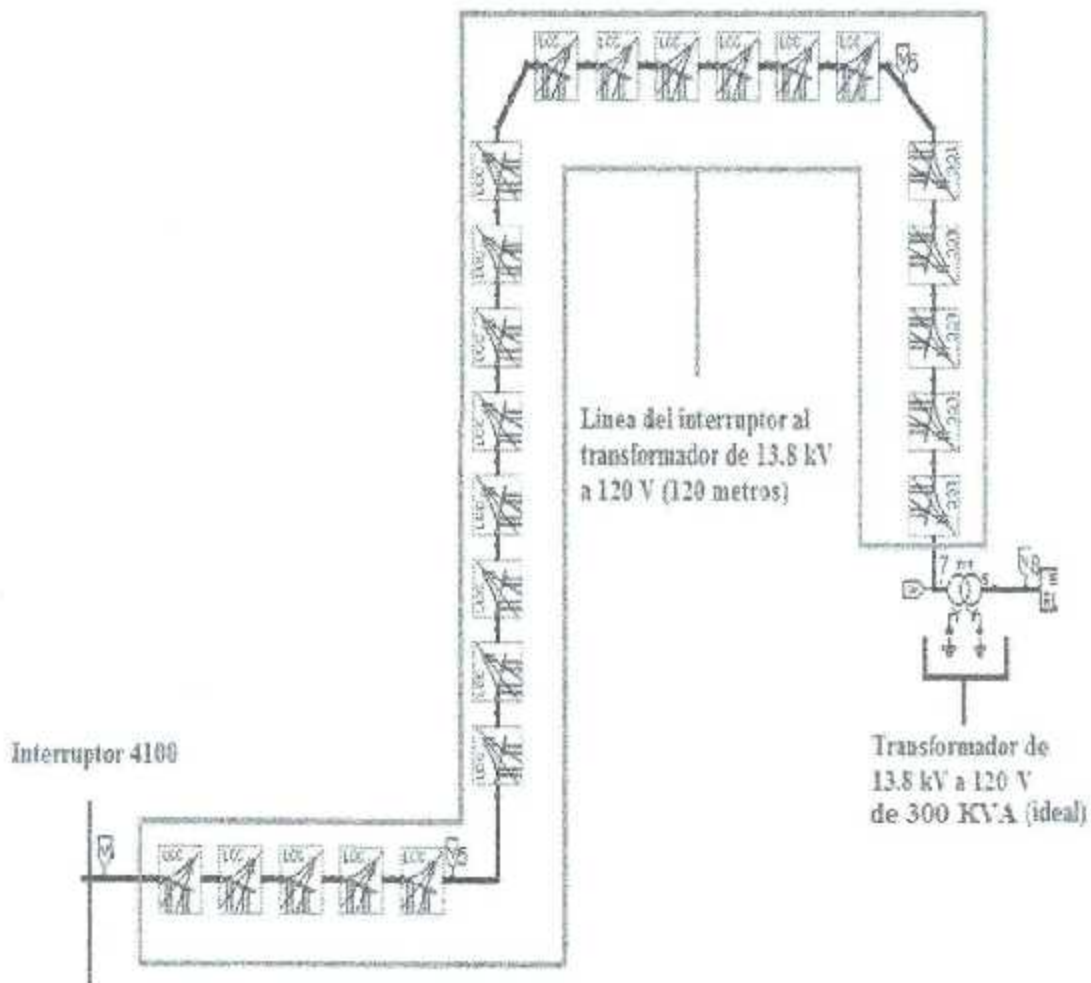


Figura 4.5 Secciones de línea de interruptor 4100 a caseta en SF6

La pestaña Model se divide en tres secciones, la primera es llama System Type, en la siguiente tabla se muestran los valores seleccionados en esta pestaña, para la simulación del problema.

| Elemento | Aplicación | Línea 4100 |
|--------------|---|-------------|
| Transposed | Indica si la línea cuenta con transposición | No activado |
| Auto bunding | Permite la instalación automática de las constantes de línea. | Activado |
| Skin effect | Indica si se toma en cuenta el efecto piel | Activado |

| | | |
|---------------------|---|-------------|
| Segmented ground | Indica si los hilos de guarda no son continuos | No activado |
| Real transf. matrix | Indica que se asume que la matriz de transformación es real. Recomendado para simulaciones de transitorios. | Activado |
| #Ph | Indica número de fases más hilos de guarda. | 3 Fases |

Tabla 4.2 Valores ingresados en la sección "System Type" de la pestaña Model del bloque LCC del ATP

La segunda sección de la pestaña Model es Standard data, en la tabla 4.2 se muestran los parámetros seleccionados en cada una de las líneas analizadas.

| Elemento | Aplicación | Línea 4100 |
|--------------------------|--|------------|
| Rho [Ωm] | Resistividad del terreno. | 100 |
| Freq. init [Hz] | Frecuencia en la que se calculan los parámetros de la línea o el punto de frecuencia más baja. | 60 |
| Length [km] | Longitud de cada segmento de línea. | 0.005 |

Tabla 4.3 Valores ingresados en la sección "Standard Data" de la pestaña Model del bloque LCC del ATP

La tercera sección llamada "Model" homónima a la pestaña; nos permite seleccionar el modelo para simular el comportamiento transitorio de la línea, el modelo seleccionado para el presente análisis es el modelo "PI". Al seleccionar este modelos se abrirá un nuevo recuadro, con dos opciones las cuales son "Printed output" y "w[C] print out", para este modelado no se selecciono ninguna opción.

La segunda pestaña del bloque LCC se llama "Data" la cual nos permite ingresar las características geométricas de las estructuras de las líneas y las disposiciones constructivas de los conductores. En la tabla 4.3 se muestra los datos seleccionados de la pestaña Data para cada una de las líneas analizadas.

| Elemento | Aplicación |
|--------------------------|---|
| Ph.no | Número de conductores de fase e hilos de guarda. En esta sección se ingresa el número total de conductores tomando en cuenta los de fase e hilos de guarda. |
| Rin [cm] | Radio interno del conductor |
| Rout [cm] | Radio externo del conductor |
| Resis [Ω /km DC] | Resistencia en DC. Al seleccionar "Skin effect" en la sección System Type de la pestaña Model se selecciona la resistencia en DC. |
| Horiz [m] | Separación horizontal entre los centros de los conductores o conjunto de conductores tomando como referencia la fase A. |
| Vtower [m] | Altura vertical del centro del conductor o conjunto de conductores medido desde la torre hasta la superficie del terreno. |
| Vmid [m] | Libramiento de los conductores de fase e hilos de guarda. |
| Separ [cm] | Distancia de separación entre los centros de dos conductores adyacentes de un conjunto de conductores. |
| Alpha [deg] | Posición angular del centro a uno de los conductores o del conjunto de conductores. |
| NB | Número de conductores que forman parte del conjunto de cables. |

Tabla 4.4 Valores ingresados en la sección "Data" de la pestaña Model del bloque LCC del ATP

Los valores de los elementos "Alpha" y "Separ" en este estudio son 0 debido a que la línea 4100 están formadas por un solo conductor por fase. En la figura 4.5 se muestra la pestaña "Model" del bloque LCC con los parámetros seleccionados de la línea 4100 y en la figura 4.6 se presenta la pestaña "Data" del bloque LCC con las características de los conductores.

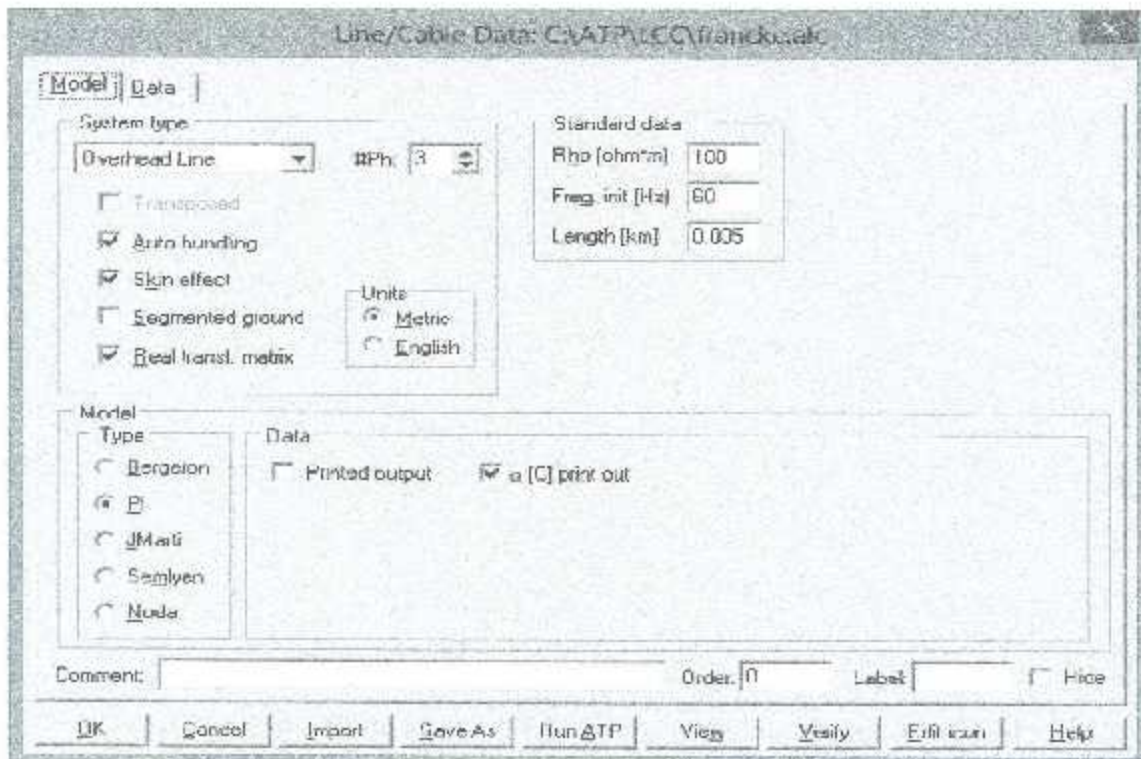


Figura 4.6 Pestaña "Model" del bloque LCC del ATP para la línea 4100.

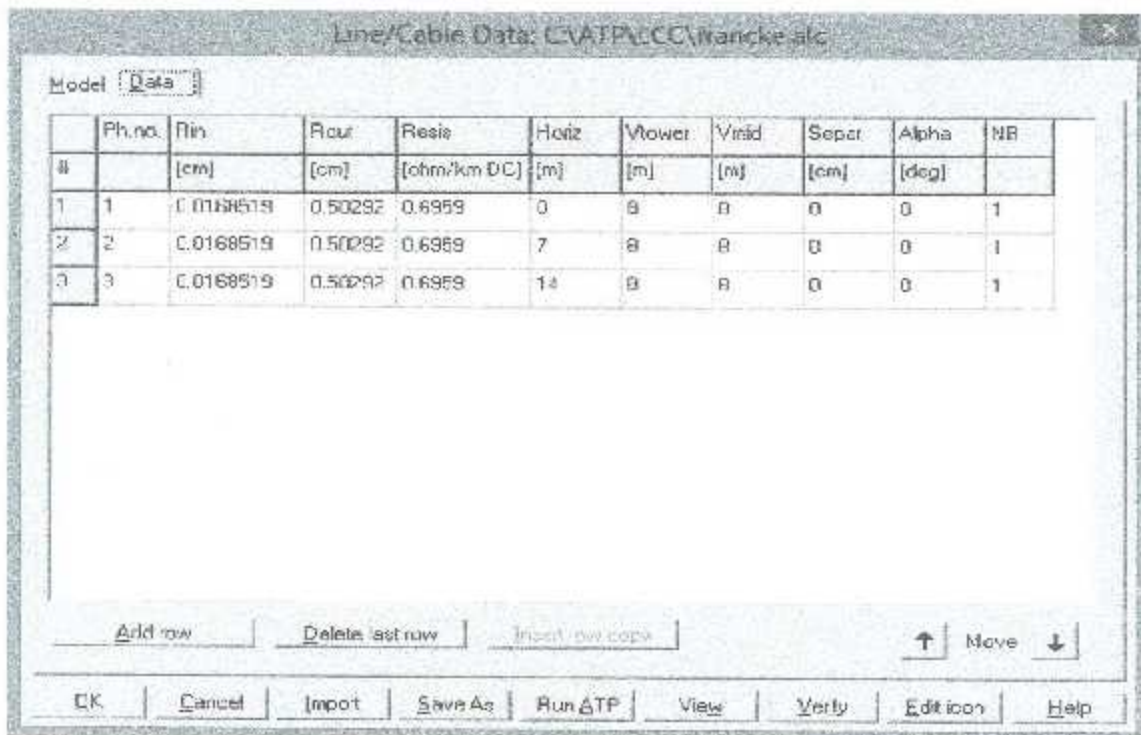


Figura 4.7 Pestaña "Data" del bloque LCC del ATP para la línea 4100.

4.4 Información y modelado de interruptor.

La simulación de la interrupción por falla se representa por tres interruptores controlados por tiempo (uno por fase) con el nombre "Switch Time-controlled" (figura 4.7), éste se coloca cerrado y en paralelo al switch controlado por tensión para que en estado estable (antes de la interrupción por falla) fluya la corriente normalmente (ya que el estado inicial del switch controlado por voltaje es abierto). La tabla 4.5 muestra los valores ingresados en el bloque "Switchc".

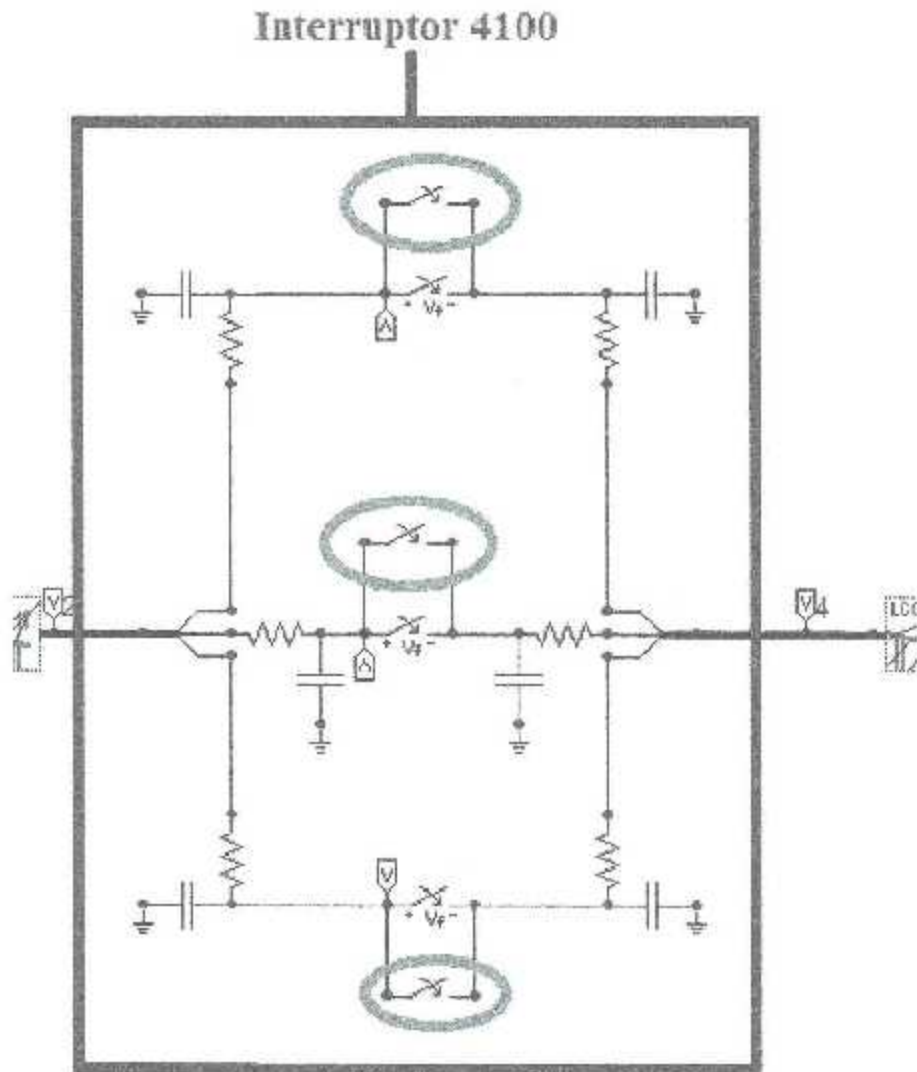


Figura 4.8 Interruptores en ATP que representan la apertura o cierre del interruptor de potencia (encerrados en círculos).

| Elemento | Aplicación | Valor |
|----------|---|---------|
| T-cl | Tiempo de cierre del interruptor [s]. | -1 |
| T-op | Tiempo de apertura del interruptor [s]. | 0.04999 |
| Imar | Margen de corriente en [A], El switch abre para $t > T\text{-op}$ si $ I < I_{\text{mar}}$. | 10 |

Tabla 4.5 Valores ingresados en la sección "Switch Time-controlled" del ATP.

Al abrirse el interruptor 4100 se producirá un arco con una duración de algunos microsegundos, este arco es representado por el bloque "Switch Voltage-controlled" (figura 4.8) el cual es un switch ideal controlado por voltaje el cual se cierra cuando se excede el voltaje de flameo, adicionalmente se le asigna un tiempo de deionización del medio, el cual indica al switch el tiempo que deberá permanecer cerrado una vez que la corriente pase por cero, representando así múltiples reigniciones del arco eléctrico el cual genera corrientes y voltajes de altas frecuencias (esta representación del arco se situará en cada fase). La tabla 4.6 muestra los valores ingresados en el bloque "Switchve".

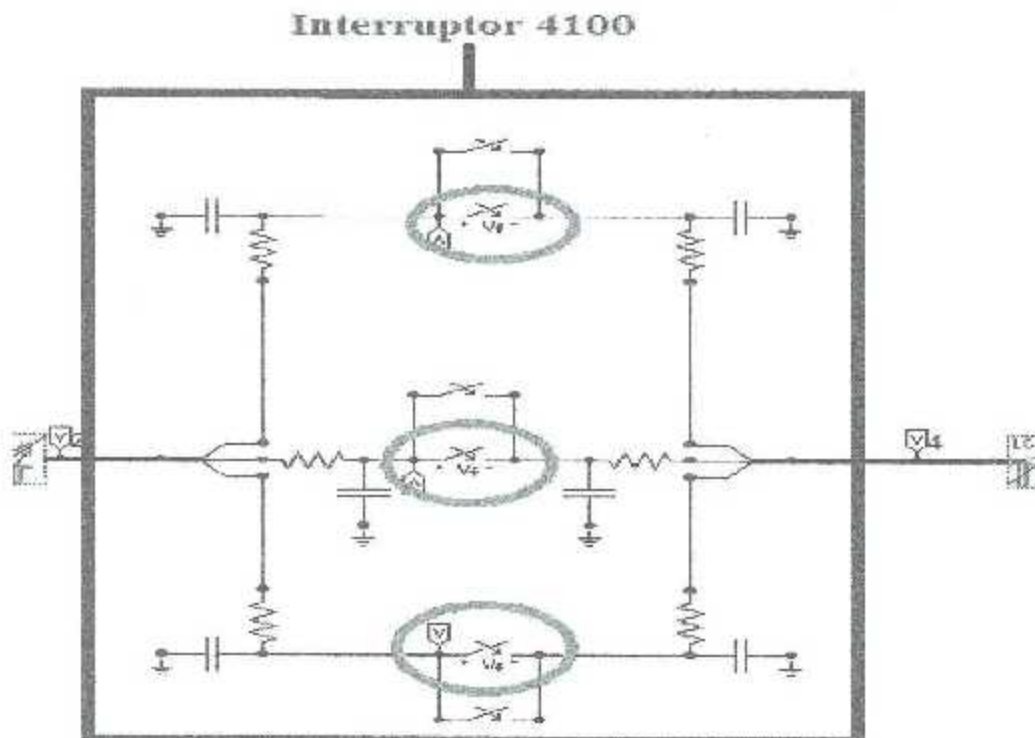


Figura 4.9 Interruptores monofásicos en ATP que representan el arco que se produce al operar la cuchilla (encerrados en círculos).

| Simbolo | Aplicación | Valor |
|---------|---|---------|
| T-cl | Tiempo de cierre del interruptor [s] | 0.04999 |
| T-de | Tiempo mínimo en [s] en que el interruptor debe permanecer cerrado. | 0 |
| Imar | Margen de corriente en [A], El switch abre para $t > T\text{-op}$ si $ I < I\text{mar}$. | 10 |
| V-fl | Tensión de ruptura [V], El switch se cierra para $t > T\text{-cl}$ si $ U > V\text{-fl}$. | 0 |

Tabla 4.6 Valores ingresados en la sección "Switch Voltage-controlled" del ATP.

En el modelado general del interruptor 4100 se agregan componentes pasivos como son resistencias y capacitores, como se muestra en las figuras pasadas, estos representan la resistencia que se genera en la presencia del arco eléctrico, el valor de la resistencia es de 2Ω (la resistencia varía según las características del espacio que se encuentra entre los contactos de los interruptores) y la capacitancia parásita de los interruptores para la simulación se utiliza un valor de 200pF [13].

4.5 Información y modelado de la fuente de alimentación.

Como se había mencionado antes la línea 4100 se alimenta a través del bus 1 en la subestación Francke el cual tiene una tensión de 13.8 kVrms , para su modelado en ATP se emplea la fuente de voltaje trifásica "AC3PH - Steady-state (cosinus) function. 3 phase. TYPE 14". A este bloque solo se le ingresa el valor de la tensión de operación de la línea y de la frecuencia del sistema, a continuación se muestra el símbolo de la fuente y la pestaña en donde se ingresan los valores.



Figura 4.10 Símbolo de fuente de tensión de 13.8 kV .

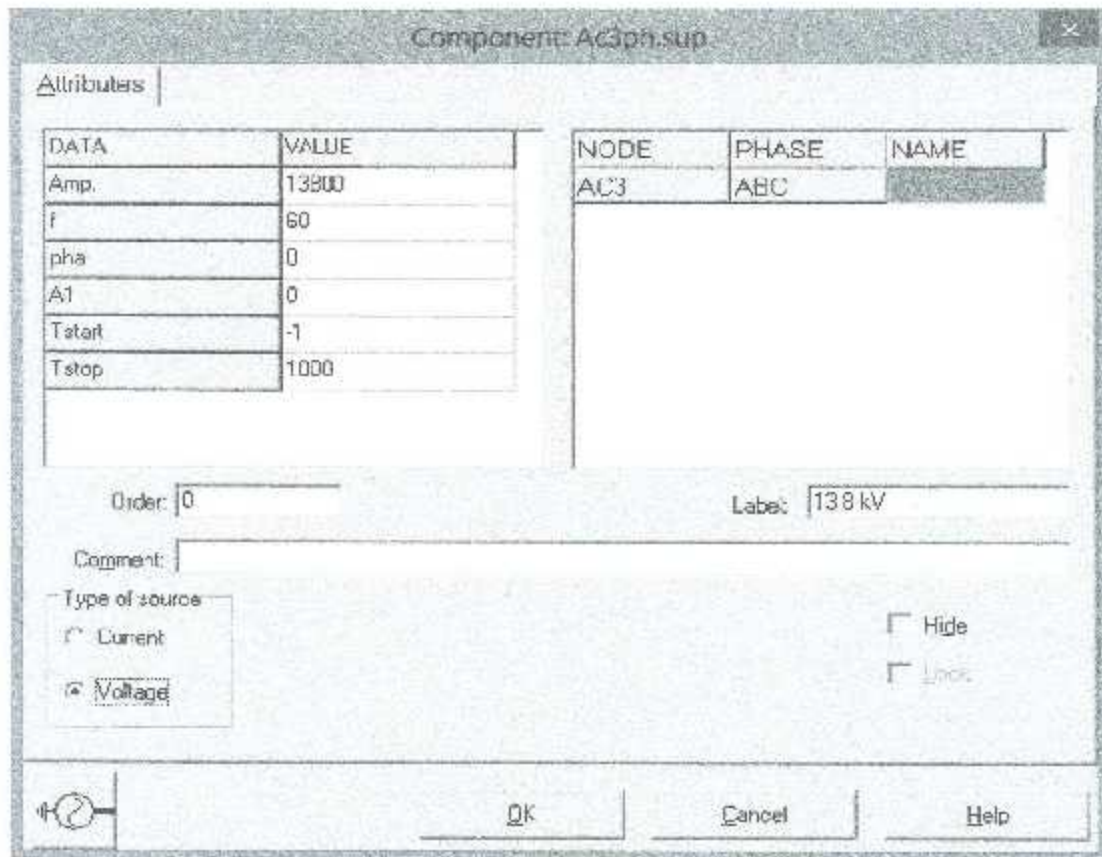


Figura 4.11 Pestaña "Attributes" del bloque Ac3ph del ATP para la línea 4100.

4.6 Información y modelado del transformador de alta a baja tensión.

La figura 3.4 nos muestra la existencia de un transformador al cual llega la línea 4100 alimentando el componente con alta tensión (13.8 kV), este transforma el voltaje a 120 V el cual es utilizado para servicios propios de la caseta de control de SF6. La capacidad del transformador es de 300 kVA. En las siguientes figuras se pueden observar la llegada de la línea al transformador y el transformador mismo.

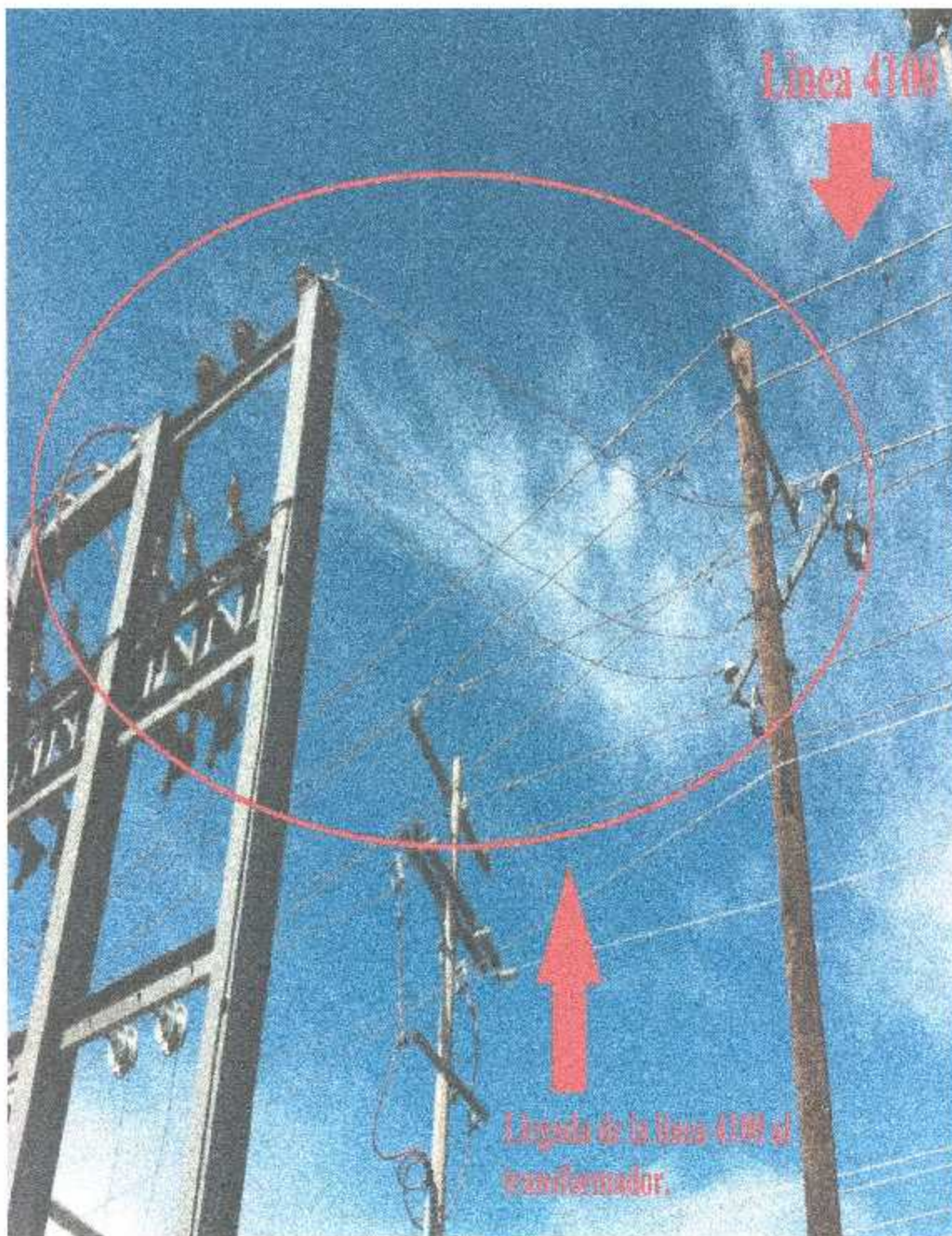


Figura 4.12 Conexión de la línea 4100 con transformador de 300kVA

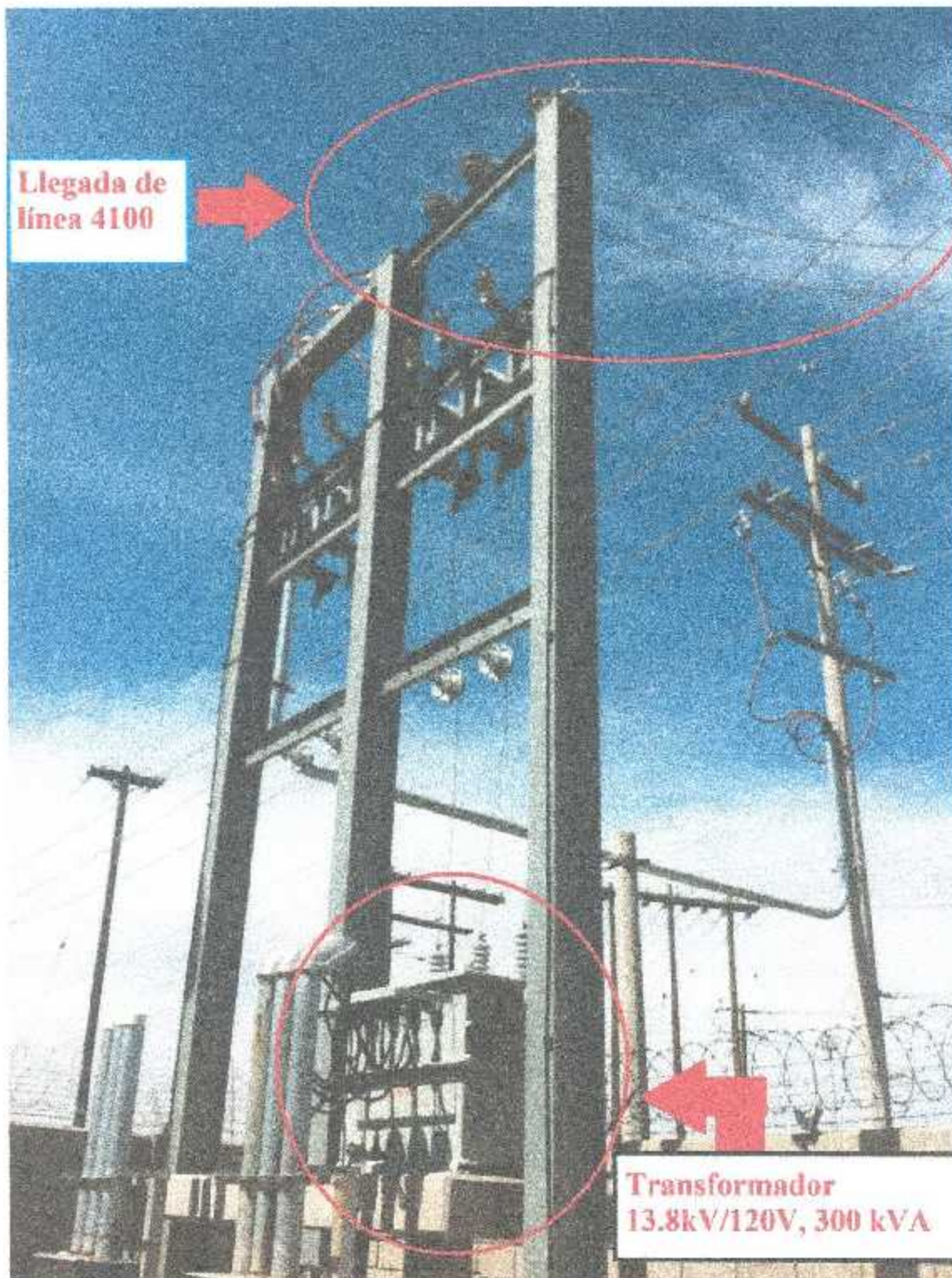


Figura 4.13 Transformador 13.8kV/120V, 300kVA

En ATP/EMTP el transformador se modela con el bloque " TRAF0_I3 - Ideal 3 phase transformer (Trafo_i3)", el cual es un transformador trifásico ideal, con conexión estrella a estrella con neutros conectados sólidamente a tierra, esto se muestra en la figura 4.13.

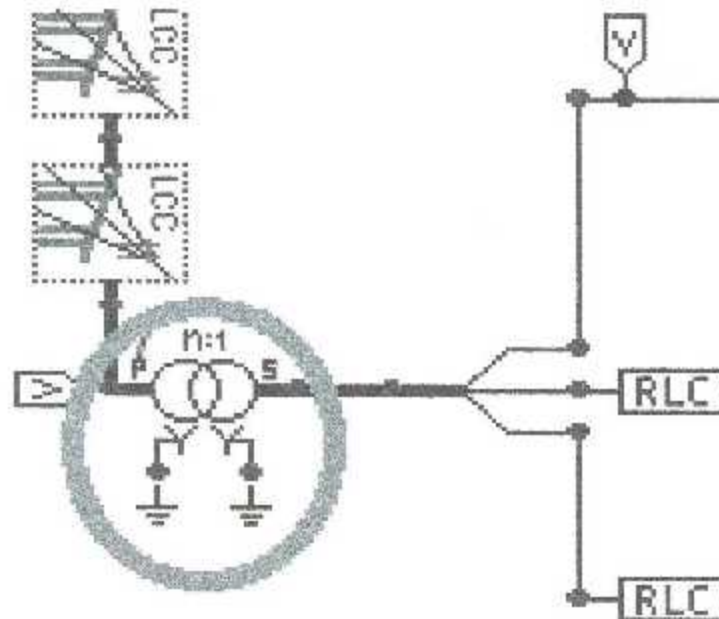


Figura 4.14 Transformador ideal trifásico

La relación de transformación es de 115:1, calculado para bajar la tensión de 13.8kV a 120V tensión de línea.

4.7 Información y modelado de fuente rectificadora y carga.

En esta parte del sistema se muestran 3 cargas RL en cada fase esto para simular dispositivos diferentes a los IED's que son la base de la tesis, en la fase A también se incluyen las 4 fuentes rectificadoras que alimentan los D25's, estos representados por diferentes resistencias con un valor de 35Ω para simular un consumo de 65 Watts por dispositivo[7] (figura 4.14).

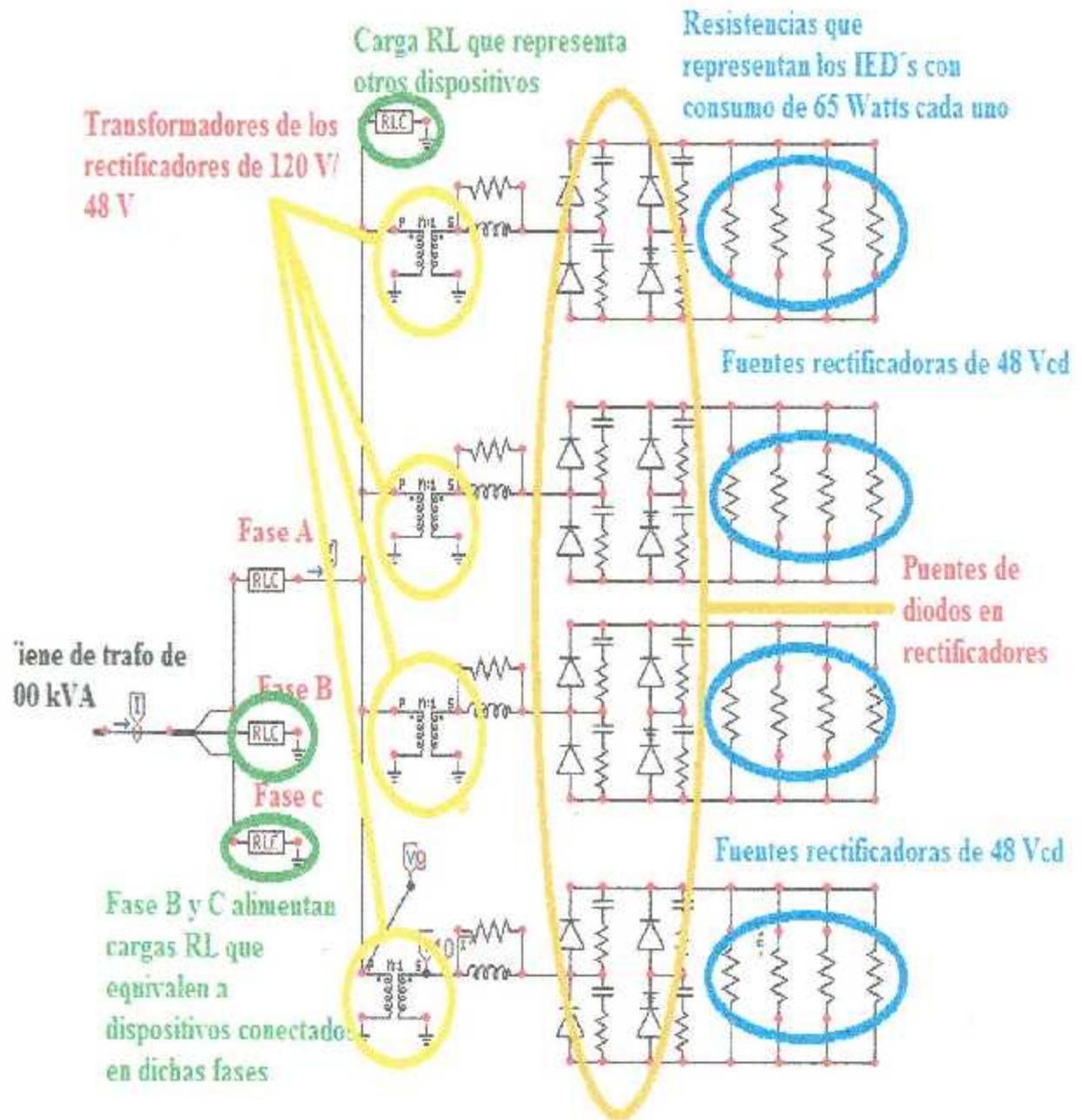


Figura 4.15 Cargas y fuentes rectificadoras

Para el estudio se optó por tener la máxima capacidad de corriente que puede dar el transformador de 300kVA suponiendo un factor de potencia de 0.95. Con lo anterior se calcularon los valores de las cargas RL, los cuales son de 0.136Ω para la resistencia y $0.11mH$ para la inductancia (el cálculo de estos elementos se muestra en el anexo B).

En el inicio cada circuito rectificador se coloca un transformador monofásico ideal de 120Vca a 48Vca, en ATP se utiliza el bloque " TRAF0_I - Ideal transformer (TRAF0_D)" para representar el transformador, se coloca una relación de transformación de 3.5:1 (relación ideal debido a que es en simulación) para obtener la señal de 48Vac.

Una vez que el nivel de tensión sea de 48 Vac se procesara la señal para conseguir que esta sea de corriente directa con ayuda del rectificador antes mostrado, el puente de diodos está formado por cuatro diodos ideales (datos en tabla 4.7) cada uno con un circuito amortiguador en paralelo los cuales están formado por una resistencia de 33Ω y un capacitor de $1\mu\text{F}$, en este punto se tendrá una señal de tensión y corriente de onda completa, después del puente de diodos se colocan 4 resistencias en paralelo de un valor de 35Ω cada una, estas resistencias consumirán 65 watts de potencia como se mencionó con anterioridad.

| Elemento | Aplicación | Valor |
|----------|--|-------|
| Vig | Tensión de encendido (V) | 0 |
| Ihold | Corriente mínima (A) | 0 |
| T deion | Tiempo de deionización (s) | 0 |
| CLOSED | Si >0: El diodo cierra durante estado estable. | 0 |

Tabla 4.7 Valores ingresados en la sección "Diode" del ATP.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

5.1 Introducción

En esta sección se mostrarán las diferentes pruebas que se aplicaron a los modelos realizados. Se analizarán señales del sistema desde antes que se genere la interrupción por falla (estado estable) y después de la apertura del interruptor (estado transitorio). Los resultados que se presentan son en diferentes puntos de todo el sistema de alimentación de los equipos.

5.2 Simulaciones en estado estable

- a) Señal de tensión después de la fuente de 13.8 kV_{RMS} (Bus 1). La figura 5.1 muestra el voltaje de las 3 fases que está generando la fuente trifásica, se tiene un pico de tensión de 19.516 kV_{pico} según la ecuación $V_{pico} = V_{RMS} * \sqrt{2}$.

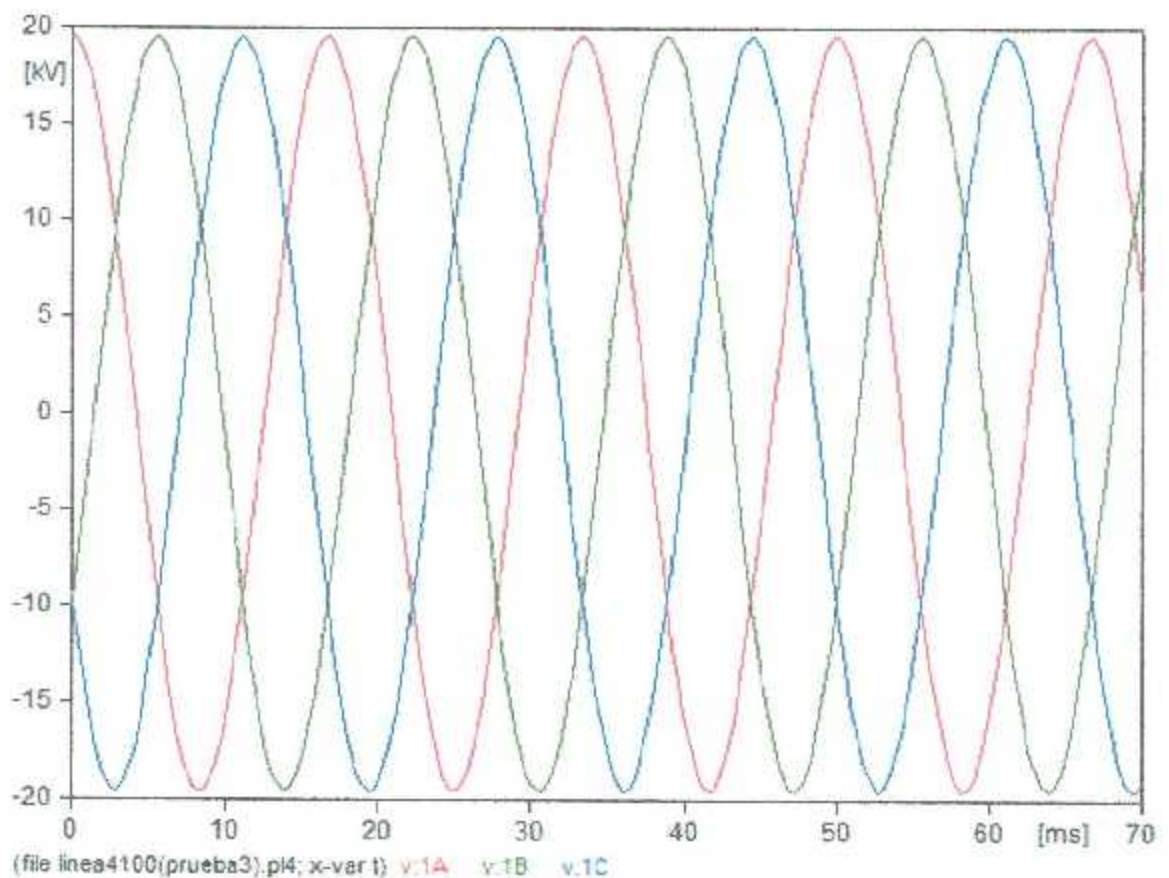


Figura 5.1 Tensión en la fuente trifásica

- b) Señal de tensión después del transformador de 13.8 kV_{RMS} a 120 V_{RMS} . La figura 5.2 muestra el voltaje en las 3 fases después del transformador con un pico de tensión de 169.7 V_{pico} . No se muestran las tensiones a través de los 140 metros de la línea ya que al ser una línea corta la variación según la distancia es prácticamente nula.

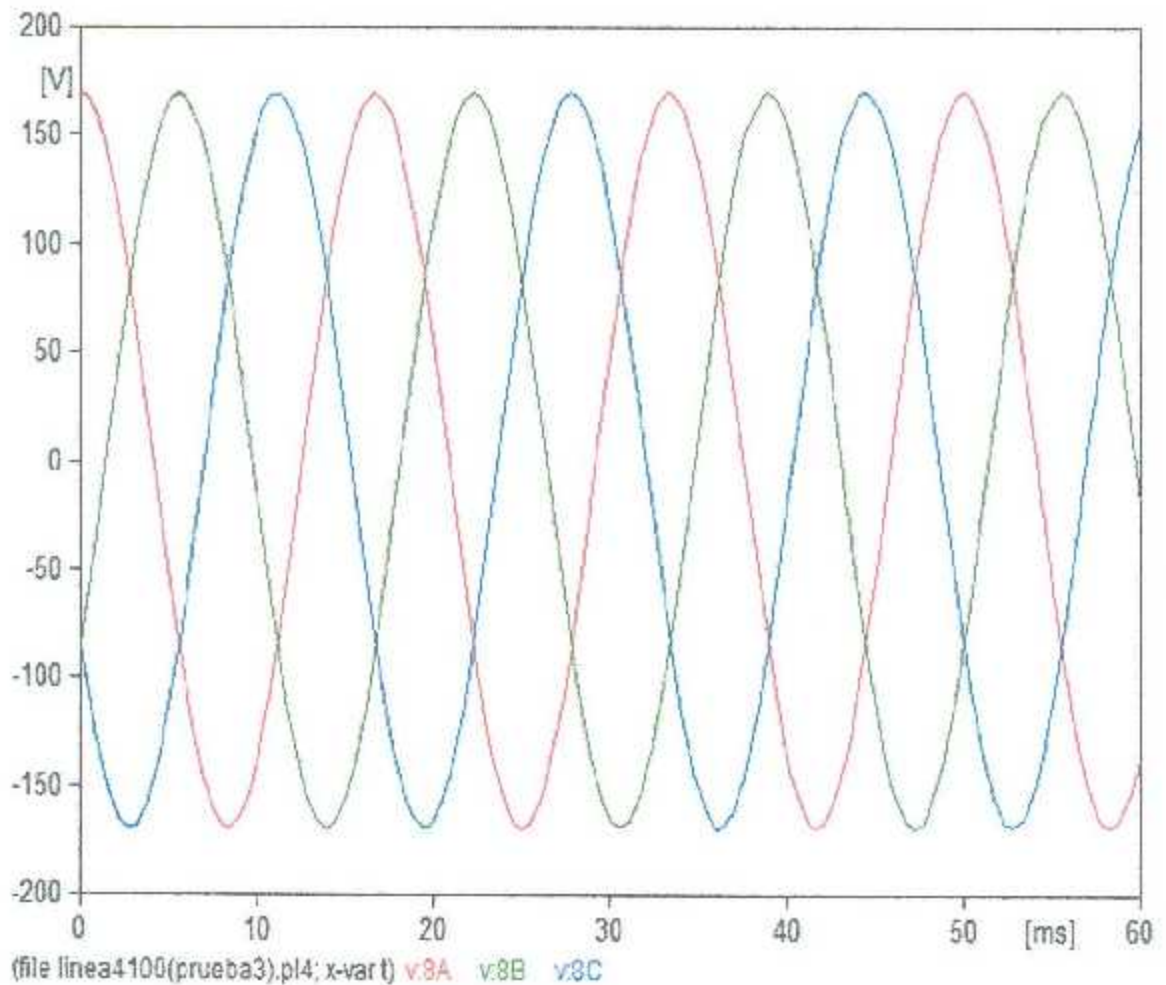


Figura 5.2 Tensión después del transformador de 300kVA.

- c) Señal de corriente trifásica entregada por el transformador de 300 kVA, esta corriente es a la máxima capacidad del transformador (ver anexo C). El pico de corriente de cada fase es de 1.178 kA (figura 5.3).

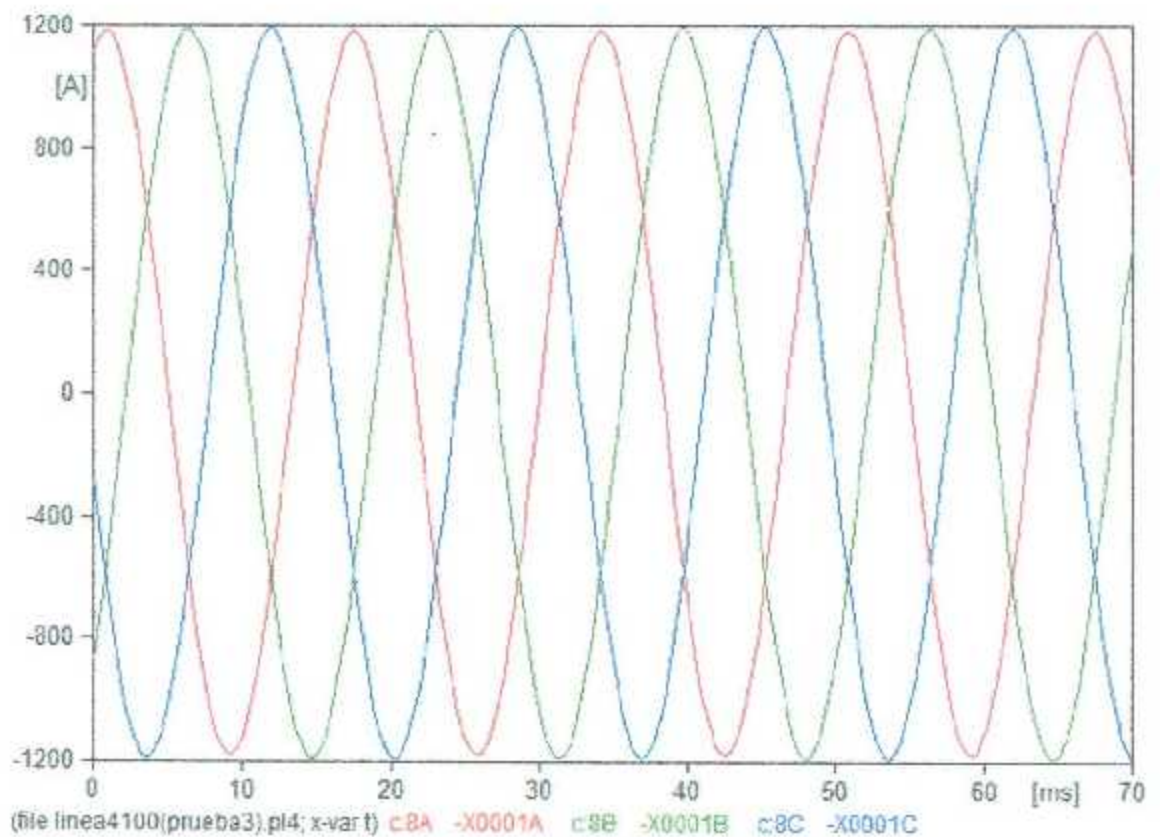


Figura 5.3 Tensión después del transformador.

- d) Señal de tensión rectificadora en la carga sin capacitor. La figura 5.4 muestra el voltaje que reciben los equipos IED's después del rectificador, el pico de tensión es de 48 Vcd, esta tensión es debido al transformador anterior al puente de diodos.

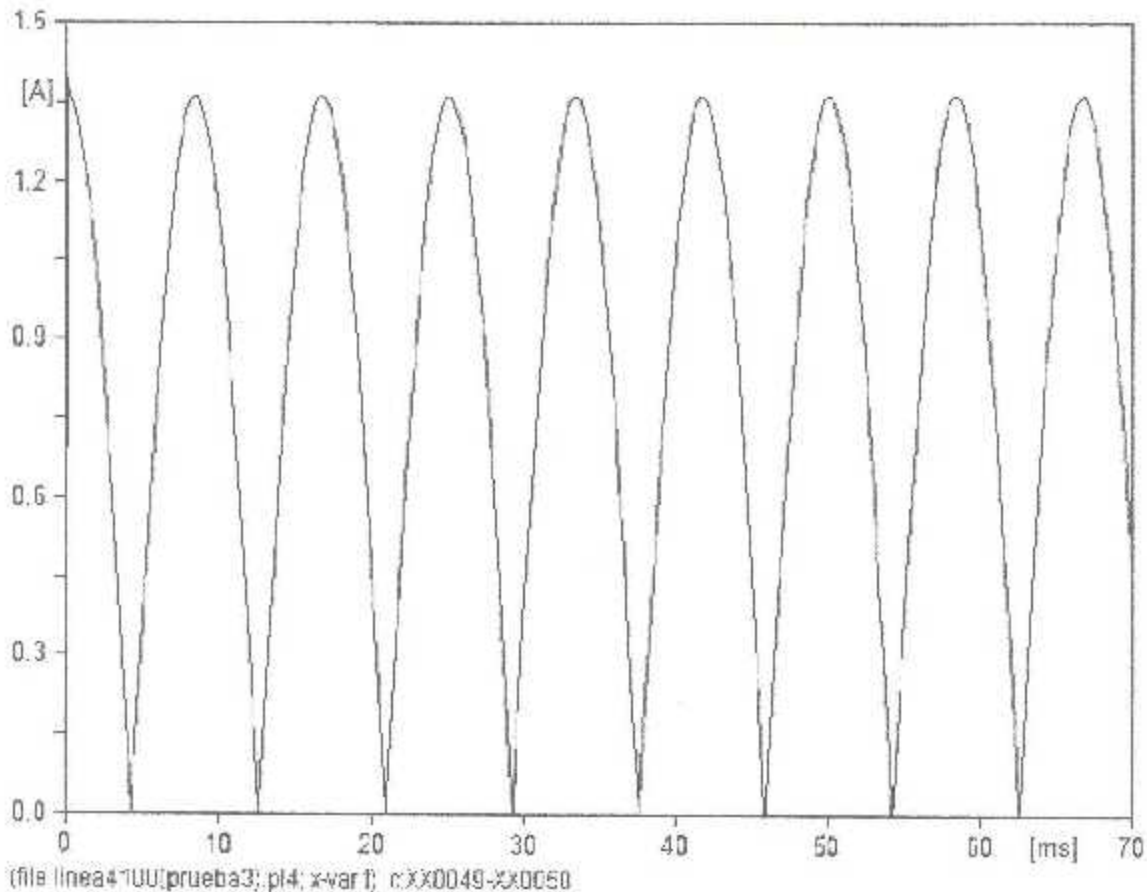


Figura 5.5 Corriente rectificada.

5.3 Simulaciones en estado transitorio.

Los siguientes resultados de las simulaciones nos muestran las señales de corriente y voltaje que se generan al abrirse los interruptores por la existencia de alguna falla. Para la simulación se supondrá que la apertura ocurrirá a 0.04999 segundos después del inicio de la simulación (0 segundos). A continuación se mostrarán los resultados obtenidos en diferentes puntos después la apertura de los interruptores.

- a) Señal de tensión después de la fuente de 13.8 kV_{RMS} (Bus 1). La figura 5.6 muestra el voltaje de las 3 fases que está generando la fuente trifásica.

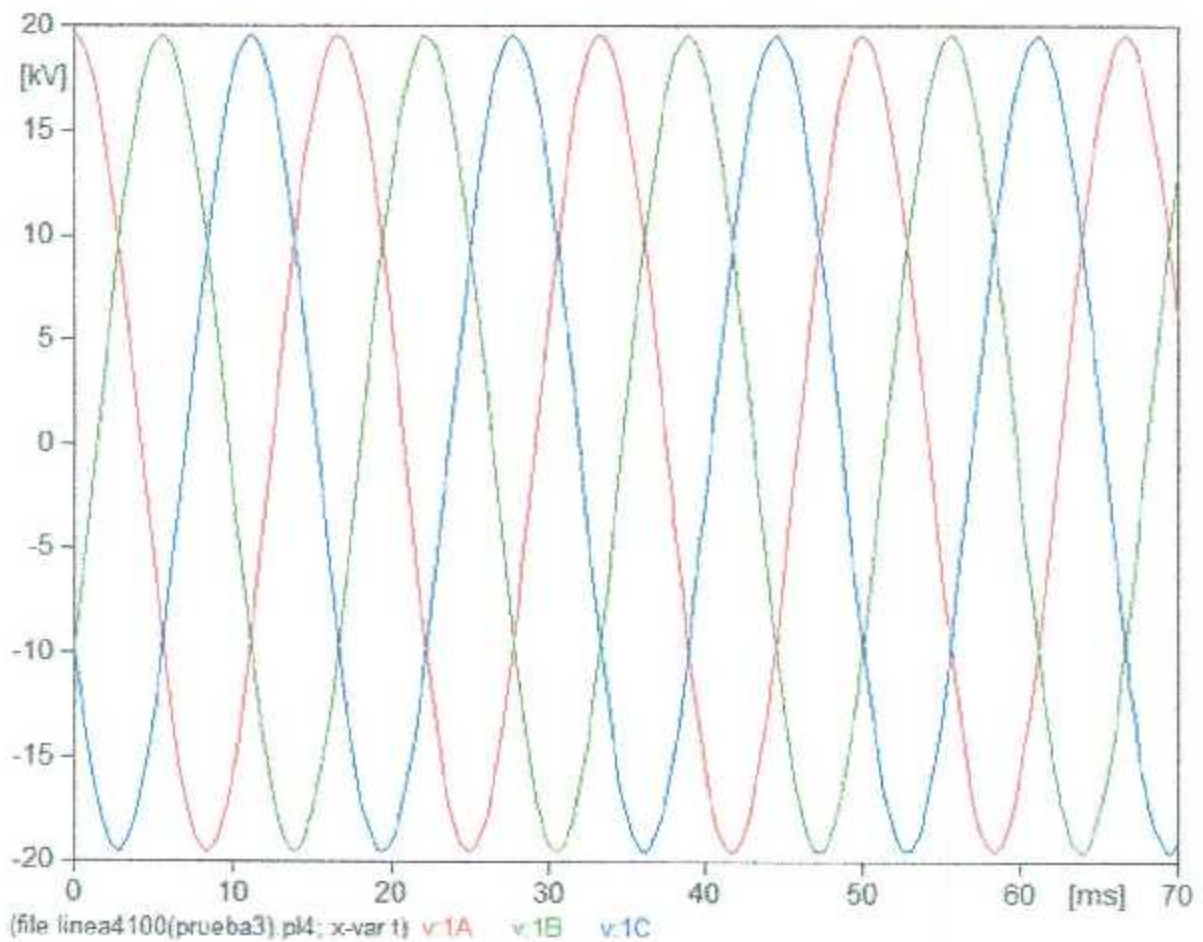


Figura 5.6 Tensión en la fuente trifásica (bajo estado transitorio).

- b) Señal de tensión a 20 metros de la fuente. La figura 5.7 muestra la señal trifásica a 20 metros de la fuente (justo antes de los interruptores), en esta imagen se observa que se genera una alta frecuencia sobre la señal de alta tensión debido al arco eléctrico que se produce, esto para las 3 fases.

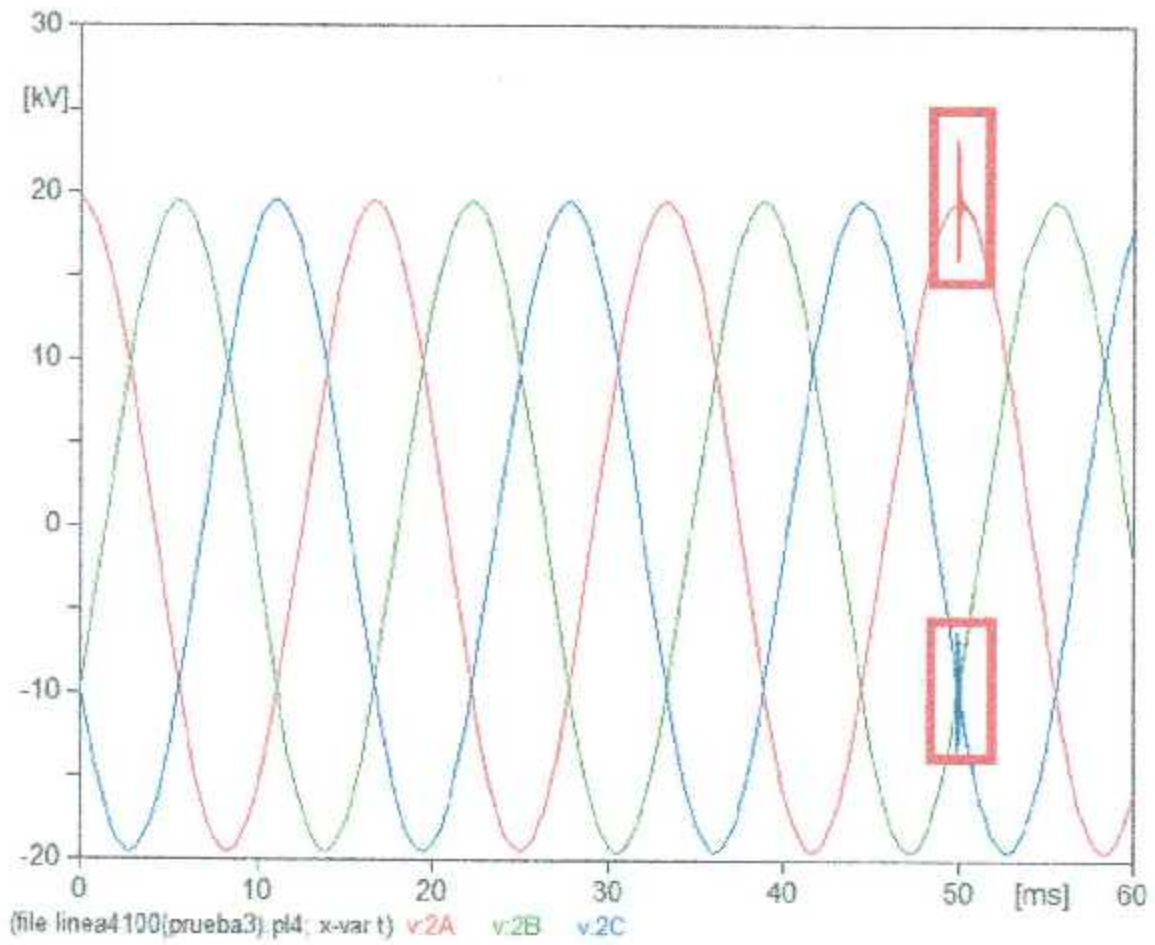


Figura 5.7 Tensión a 20 metros de la fuente.

Se realiza un acercamiento a la parte donde se genera la alta frecuencia debido al arco eléctrico en la fase A. (Figura 5.8)

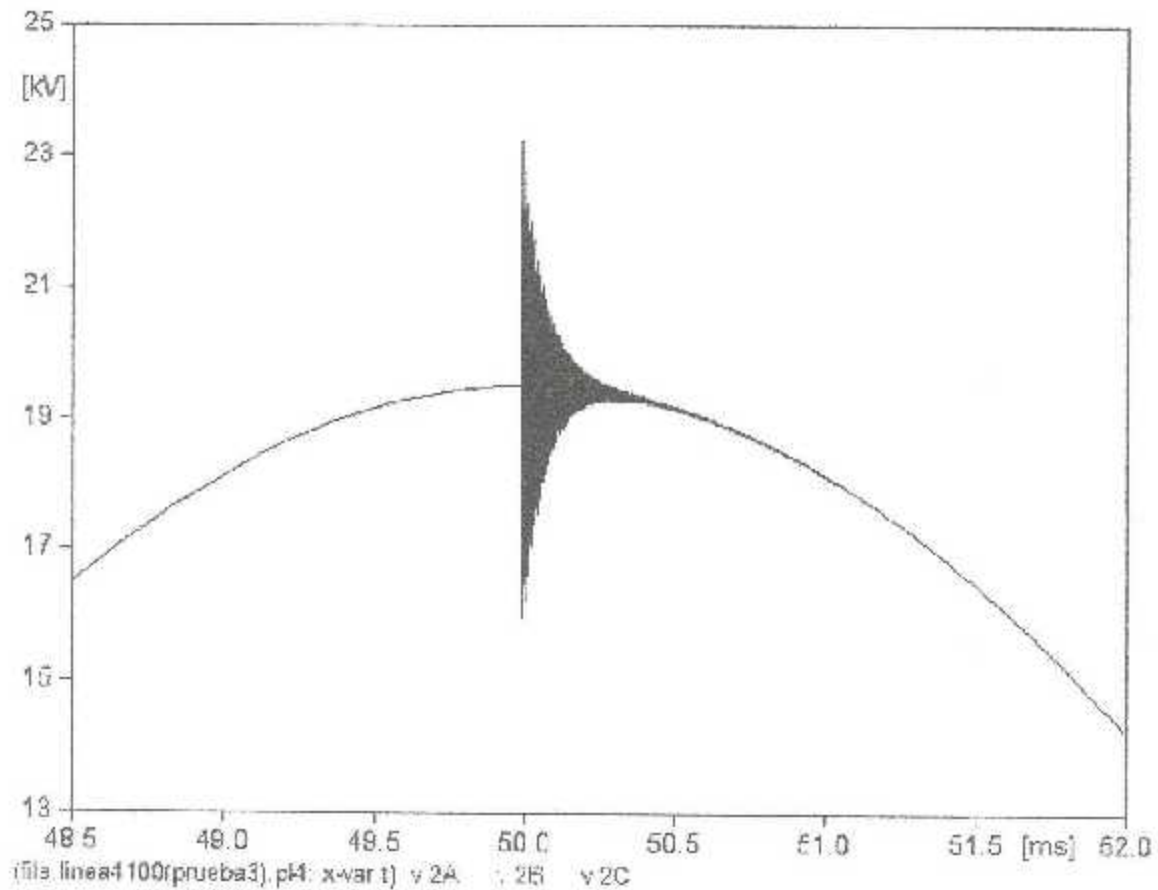


Figura 5.8 Acercamiento a la alta frecuencia debida al arco eléctrico (fase A).

- c) Señal de tensión después de interruptores. La figura 5.9 muestra el transitorio generado debido a la apertura de los interruptores en la fase A. Se muestra esta señal ya que esta fase es la que alimenta a los equipos electrónicos, por lo que estos verán el transitorio generado en dicha fase.

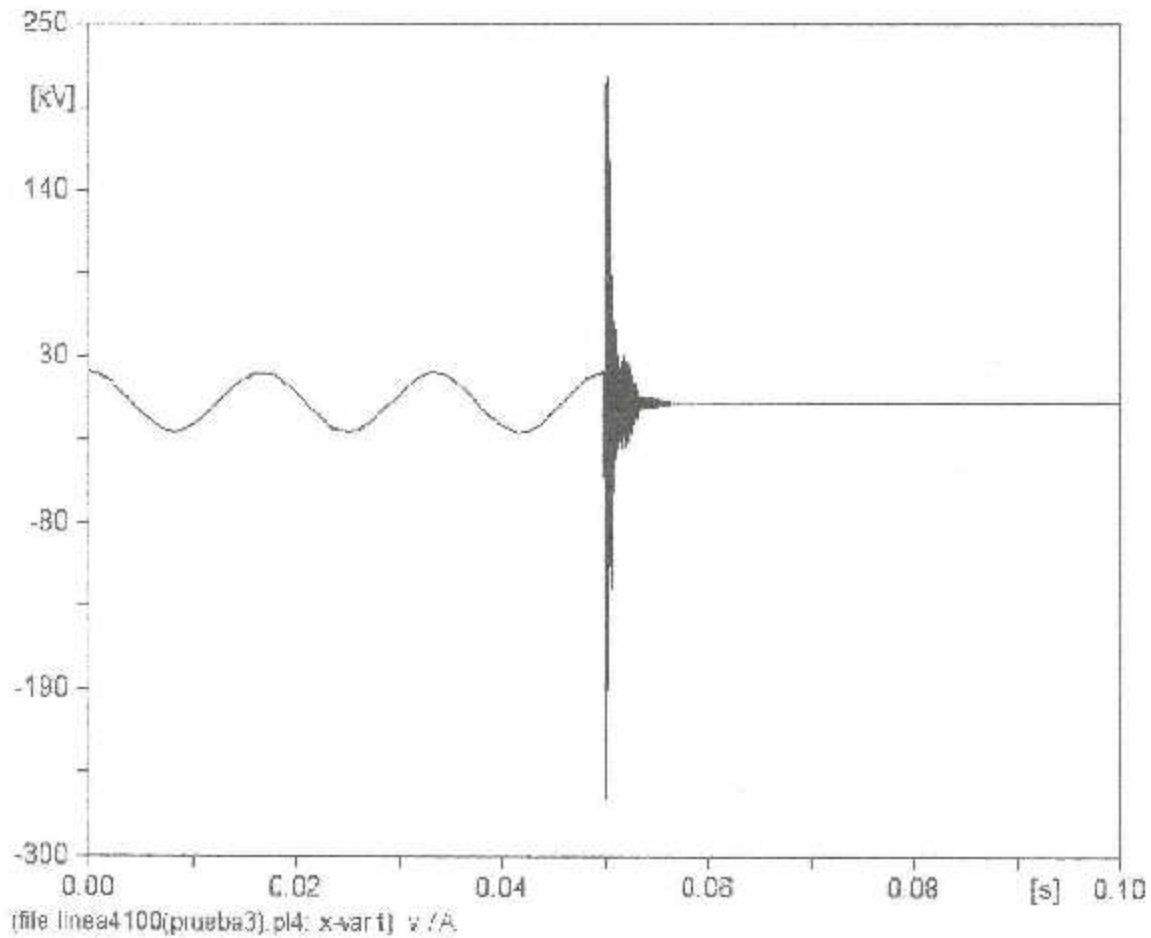


Figura 5.9 Transitorio generado por la apertura del interruptor 4100 fase A.

La siguiente figura muestra un acercamiento al transitorio generado en el cual se puede ver el pico positivo de tensión que se genera con un valor de 212 kV y un pico mayor negativo con un valor de 260.31 kV, la frecuencia del transitorio es de 3.7 kHz.

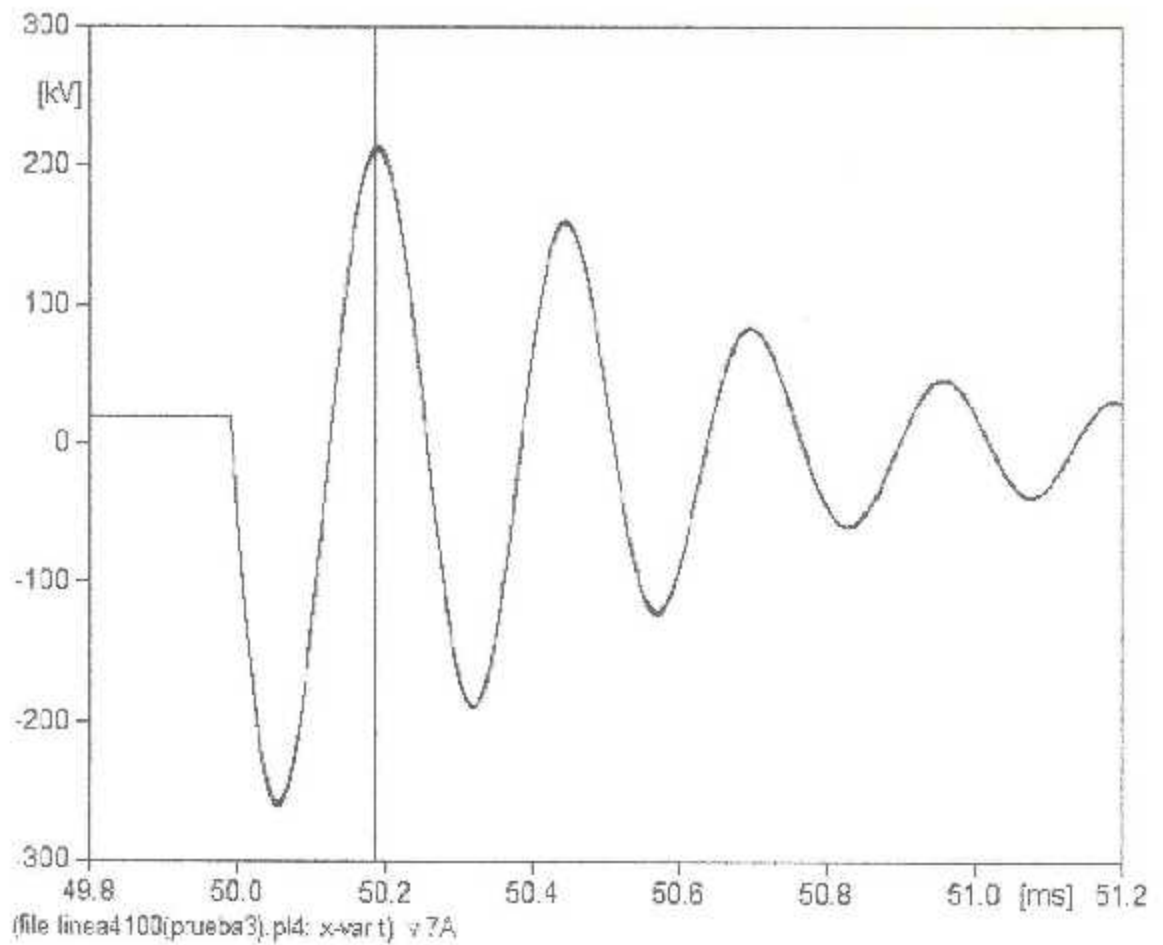


Figura 5.10 Acercamiento al transitorio generado por la apertura del interruptor 4100 en fase A.

Sobre el mismo transitorio se observa una alta frecuencia la cual es la generada por el arco eléctrico.

- d) Señal de tensión después del transformador de 300 kVA. La figura 5.11 muestra el transitorio generado en baja tensión debido a la apertura de los interruptores en la fase A.

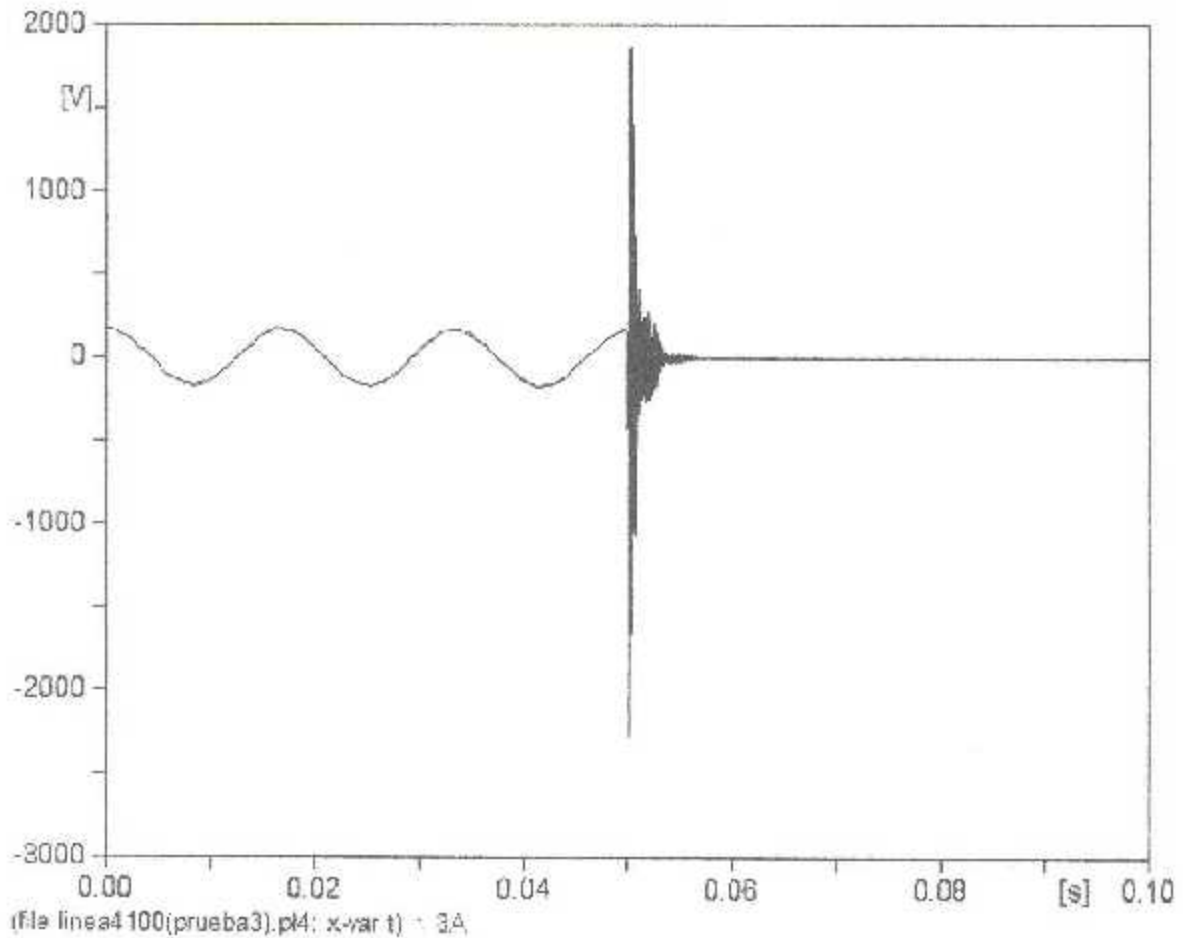


Figura 5.11 Transitorio generado en la parte de baja tensión por la apertura del interruptor 4100 fase A.

La siguiente figura muestra un el acercamiento al transitorio, donde se puede observar que la frecuencia es la misma que se tenía en la parte de alta tensión, mientras que el pico positivo es de 1860 V y el pico negativo es 2252.6 V, se respeta el factor de transformación de 115:1.

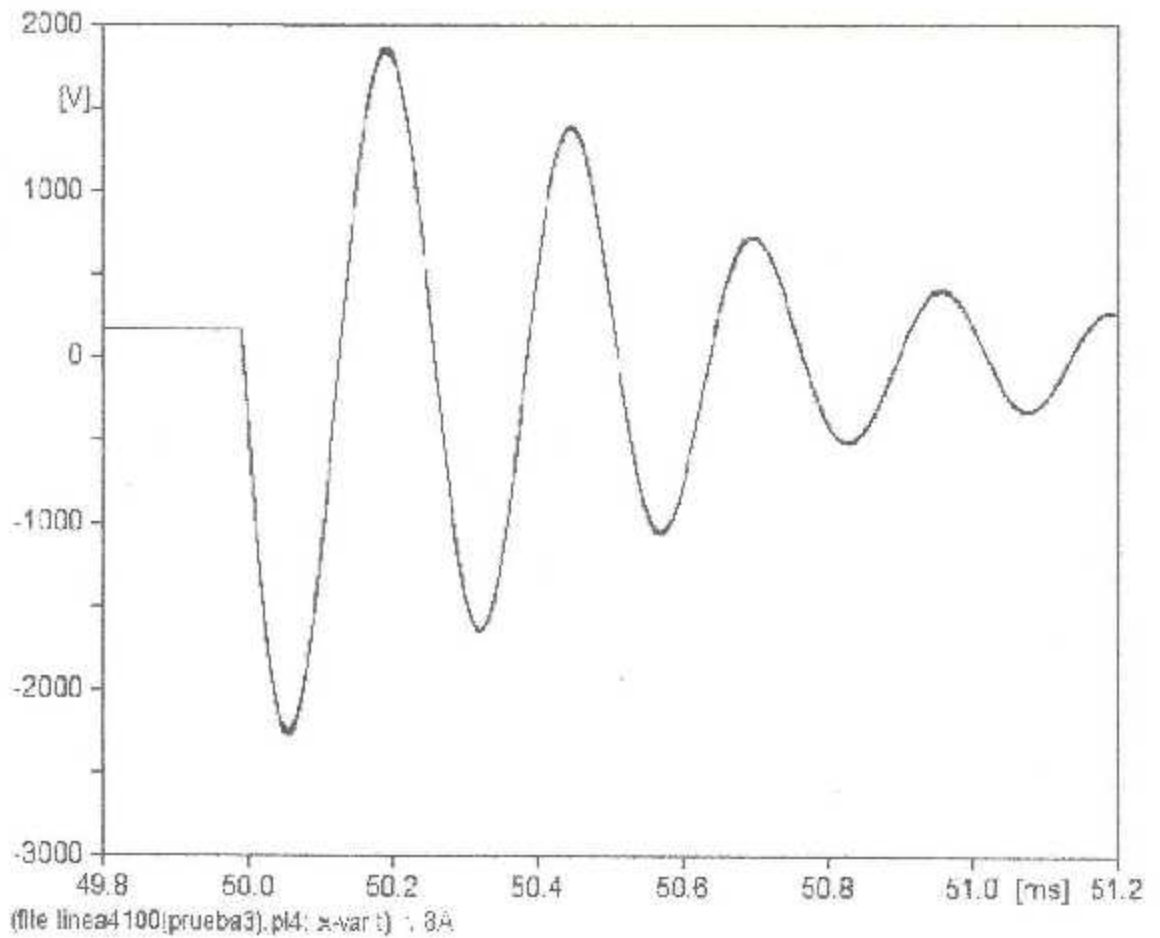


Figura 5.12 Acercamiento al transitorio generado en baja tensión por la apertura del interruptor 4100 en fase A.

- e) Señal de tensión después de rectificador. La siguiente parte para analizar es la señal rectificadora para ver cómo llega el pico de tensión a esta instancia (figura 5.13).

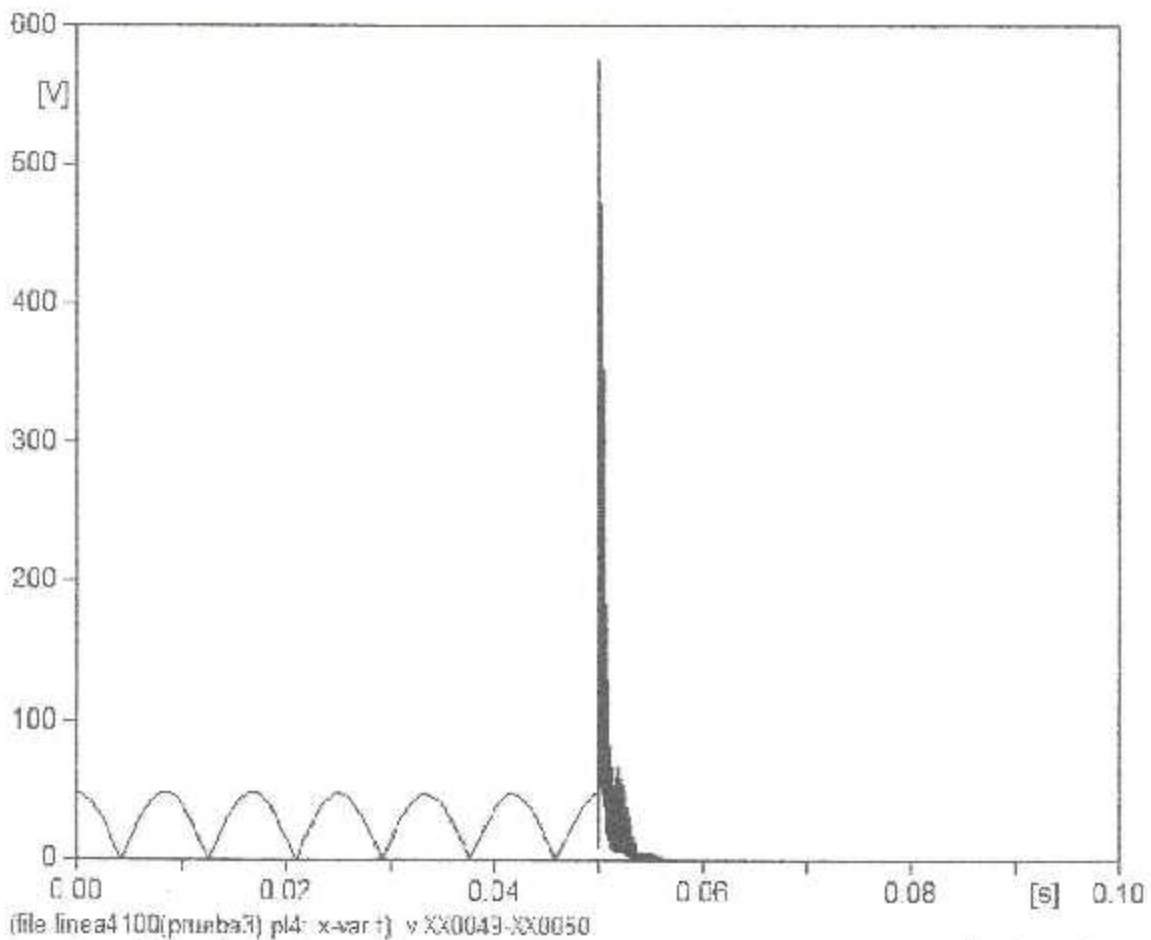


Figura 5.13 Señal de tensión rectificada con transitorio.

La siguiente figura muestra un acercamiento a la alta frecuencia generada en la señal rectificada por el transitorio, al ser una onda rectificada de onda completa la frecuencia ahora será aproximadamente el doble que los casos anteriores la cual es de 7.4 kHz, el pico de tensión es de 575.5 V. Este pico de tensión es la posible razón de las fallas en los equipos D'25's ya que supera los límites de tensión aceptados por el equipo[7].

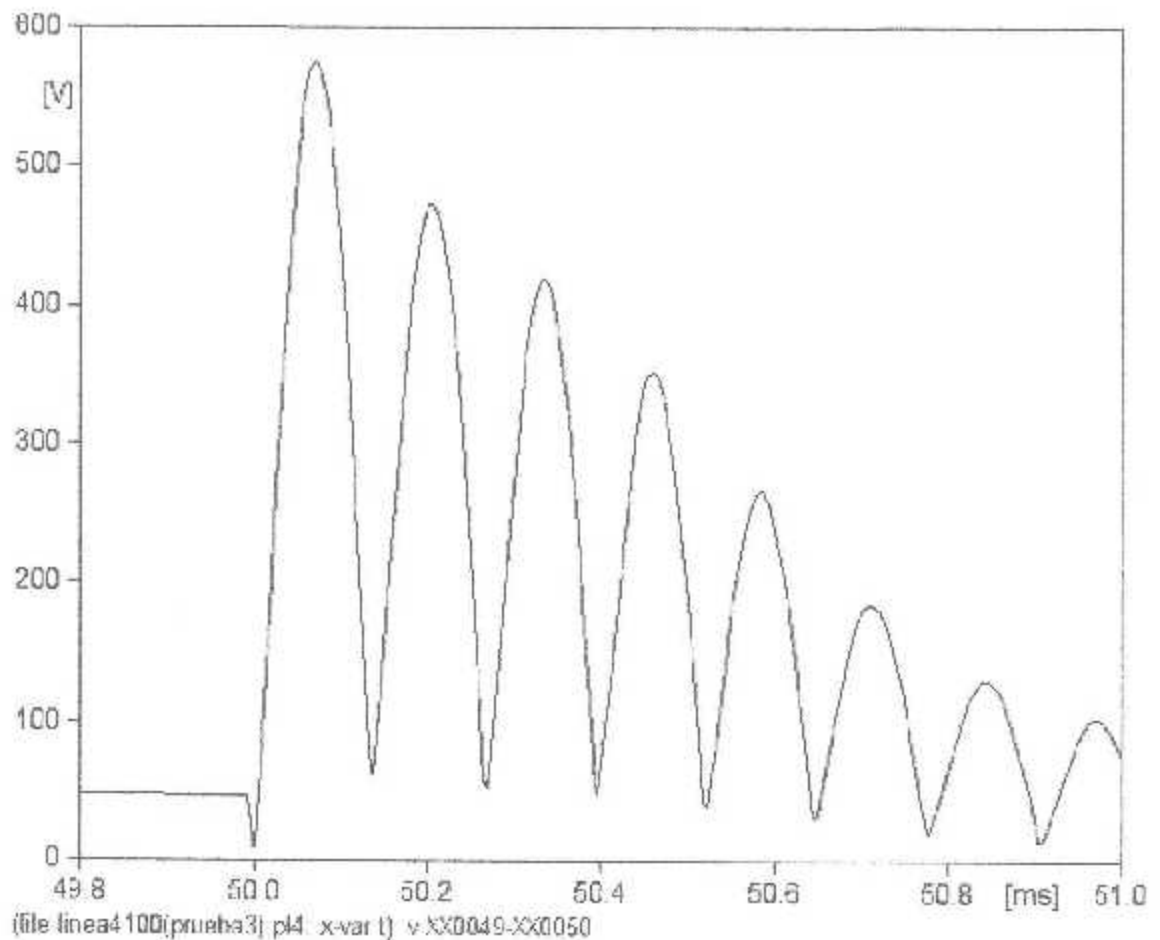


Figura 5.14 Acercamiento a la señal de tensión rectificadora

5.4 Propuesta para la solución de problemas.

Los resultados mostrados con anterioridad son los valores que se manejan en el sistema real, se incluyen todos los elementos que hacen parte de la estructura de alimentación de los dispositivos electrónicos inteligentes (IED), no existe ningún elemento en el sistema que elimine los picos de tensión transitorios, solo se cuentan con fusibles que se abren para sobretensiones permanentes, por lo que se dio el trabajo de buscar y proponer una solución para eliminar las sobretensiones transitorias.

La propuesta se basa en la instalación de circuitos supresores de sobretensiones transitorias, como pueden ser descargadores o apartarrayos para la parte de alta tensión, lo cual también nos puede ayudar a proteger transformadores, y para la baja tensión el uso de varistores para eliminación de altas corrientes [15].

A continuación se muestra el modelado de descargadores utilizados en la simulación y los resultados finales al incluirlos.

5.4.1 Modelación del apartarrayos utilizado en alta tensión.

Se han utilizado los datos del descargador comercial PDV-65, el mismo que satisface los requerimientos de la norma IEC 60099-4, para 5 kA, y que la EERCS CA utiliza para proteger la mayoría de sus transformadores de distribución. La tensión nominal es 18 kV y MCOV (Tensión Máxima de Operación Continua) de 15.3 kV.

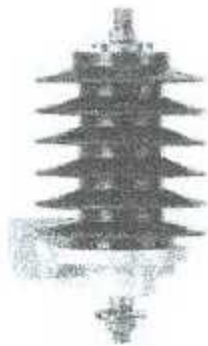


Figura 5.15 Descargador PDV-65 MCOV 15.3 kV.

| U _R Rated Voltage | U _C Continuous Operating Voltage | Catalog Number | | Residual Voltage U _m (kV) | | | | | | | |
|------------------------------------|--|--------------------------------------|--|--------------------------------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------------|
| | | US hardware Prefix = 2133XX | Metric hardware Prefix = 2140XX | 0.5µs Steep Front | 8/20 µs Lightning Surge | | | | | | 60/100 Switching Surge |
| | | | | | 10kA | 1.5kA | 3kA | 5kA | 10kA | 20kA | |
| (kV) | (kV) | xx# | xx# | 10kA | 1.5kA | 3kA | 5kA | 10kA | 20kA | 40kA | 500A |
| 3 | 2.55 | 53 | 03 | 11.6 | 9.2 | 9.9 | 10.5 | 11.7 | 13.4 | 16.3 | 6.5 |
| 6 | 5.1 | 55 | 05 | 23.1 | 18.5 | 19.8 | 21.0 | 23.3 | 26.8 | 32.6 | 17.1 |
| 9 | 7.65 | 58 | 08 | 33.1 | 26.4 | 28.3 | 30.0 | 33.3 | 38.2 | 46.5 | 24.4 |
| 10 | 8.4 | 59 | 09 | 34.7 | 27.7 | 29.7 | 31.5 | 35.0 | 40.1 | 48.8 | 25.6 |
| 12 | 10.2 | 60 | 10 | 42.4 | 33.8 | 36.3 | 38.5 | 42.8 | 49.0 | 59.7 | 31.3 |
| 15 | 12.7 | 63 | 13 | 54.0 | 43.1 | 46.3 | 49.0 | 54.4 | 62.4 | 76.0 | 39.9 |
| 18 | 15.3 | 65 | 15 | 62.0 | 50.1 | 53.8 | 57.0 | 63.3 | 72.6 | 88.4 | 46.4 |
| 21 | 17 | 67 | 17 | 68.3 | 54.5 | 58.5 | 62.0 | 68.9 | 79.0 | 96.1 | 50.5 |
| 24 | 19.5 | 70 | 20 | 84.9 | 67.7 | 72.7 | 77.0 | 85.5 | 98.1 | 119.4 | 62.7 |
| 27 | 22 | 72 | 22 | 98.4 | 78.9 | 82.6 | 87.5 | 97.2 | 111.5 | 135.6 | 71.2 |
| 30 | 24.4 | 74 | 24 | 103.0 | 82.2 | 88.3 | 93.5 | 103.9 | 119.1 | 144.9 | 76.1 |
| 36 | 29 | 79 | 29 | 122.3 | 97.6 | 104.8 | 111.0 | 122.3 | 141.4 | 172.1 | 90.4 |

Tabla 5.1. Características eléctricas para descargador[15].

Estos descargadores se colocarán uno por fase justo antes del transformador de 300 kVA para la simulación en ATP, se utilizará el módulo MOV "ZNO - exponential current-dependent resistor", conectado en paralelo con un capacitor y en serie con una inductancia cuyos valores son de $2E^{-5} \mu F$ y $5E^{-6} mF$ respectivamente, estos valores se explican en el anexo C. La siguiente figura muestra el modelado en ATP con la inclusión de los descargadores.

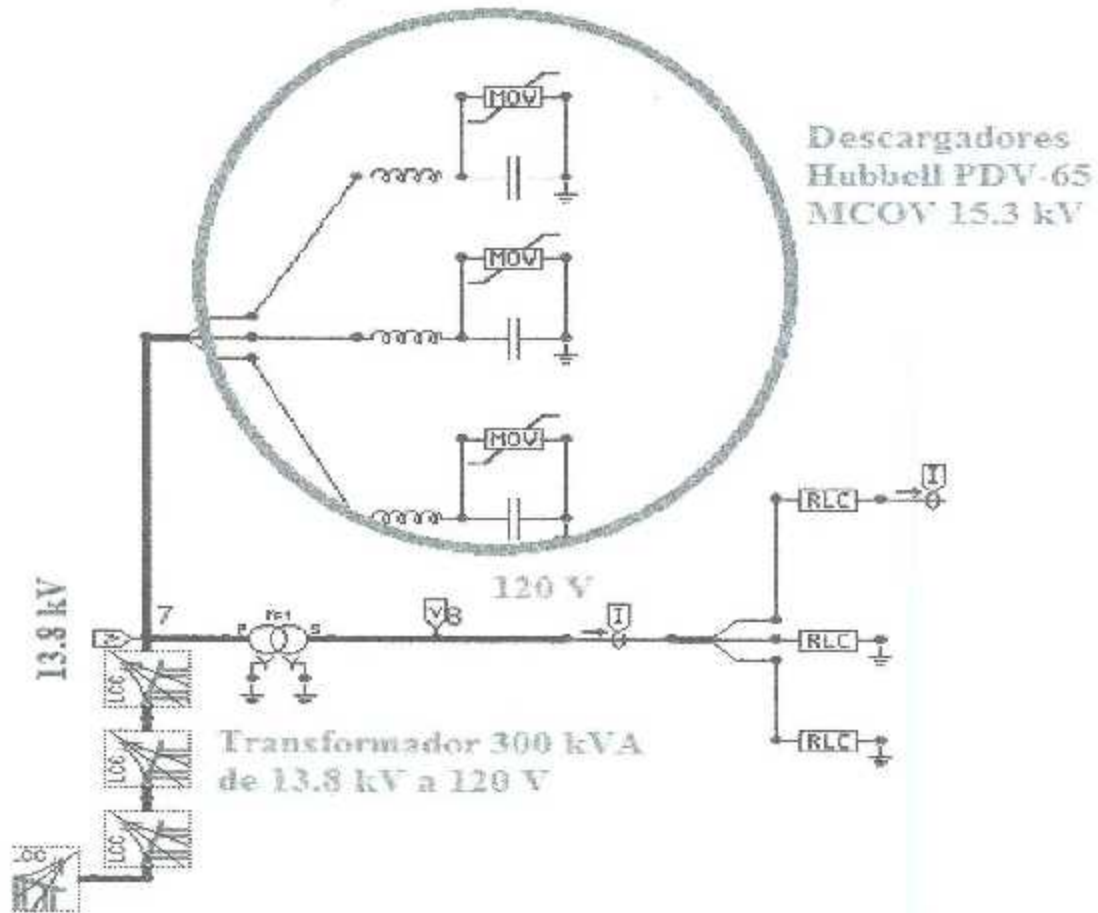


Figura 5.16 Modelado de descargadores en ATP.

Los datos recalcados con un sombreado en la tabla 3.4 se pasan a la pestaña "Characteristic" en la ventana del MOV como se muestra en la figura 5.17

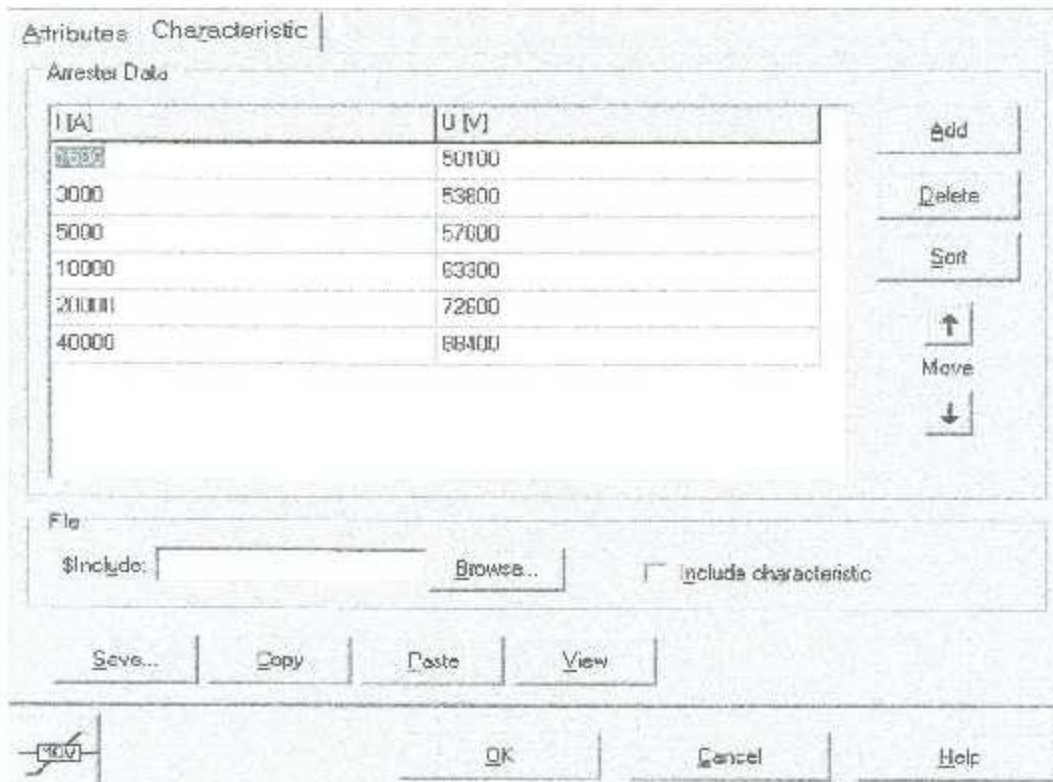


Figura 5.17 Datos I-V para descargador.

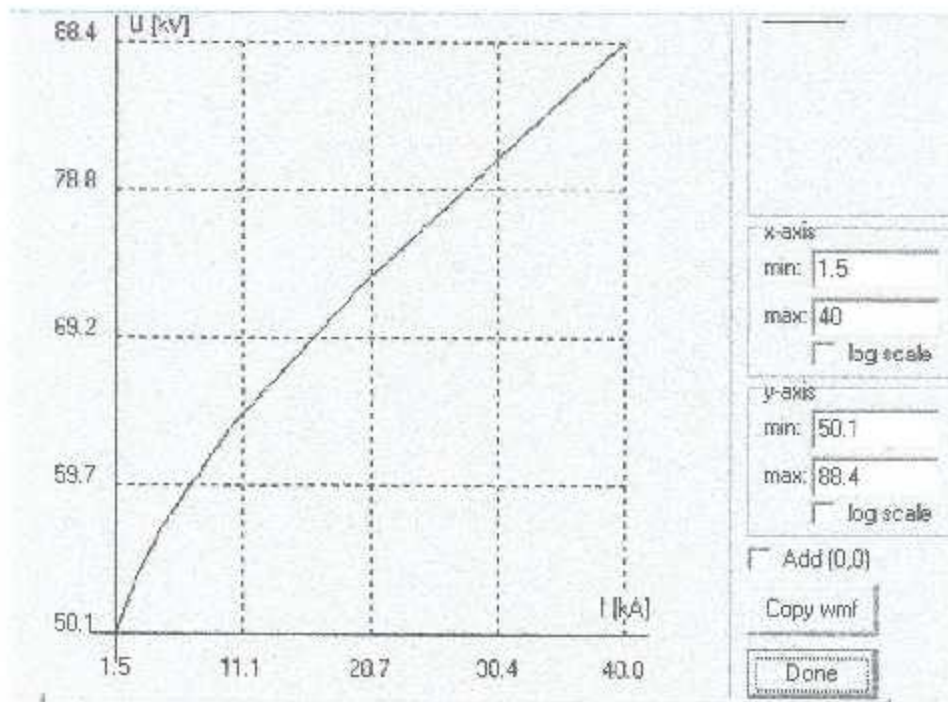


Figura 5.18 Curva I-V del descargador.

5.4.2 Resultados de simulaciones al incluir los descargadores.

Una vez colocado los descargadores antes del transformador de 300 kVA se nota una disminución en los picos de tensión como se mostrará en las siguientes figuras

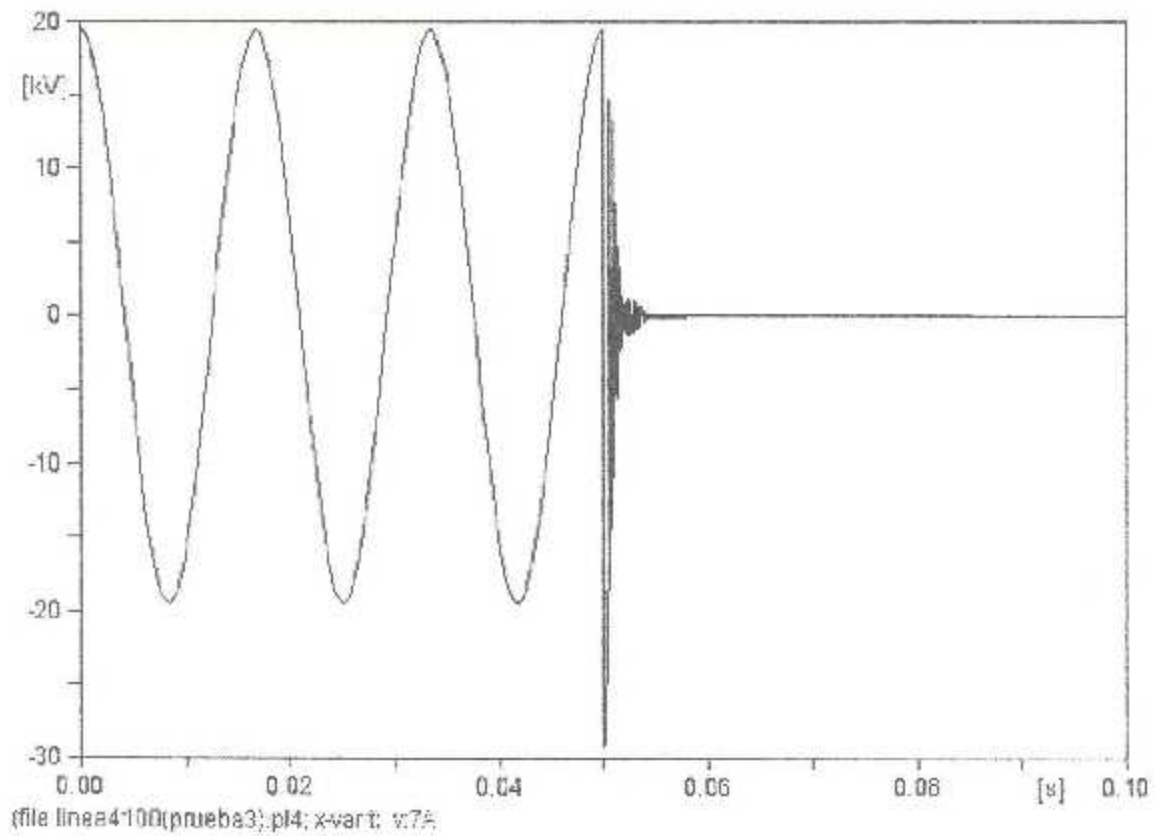


Figura 5.19 Señal de tensión antes del transformador 300 kVA con la inclusión de descargadores.

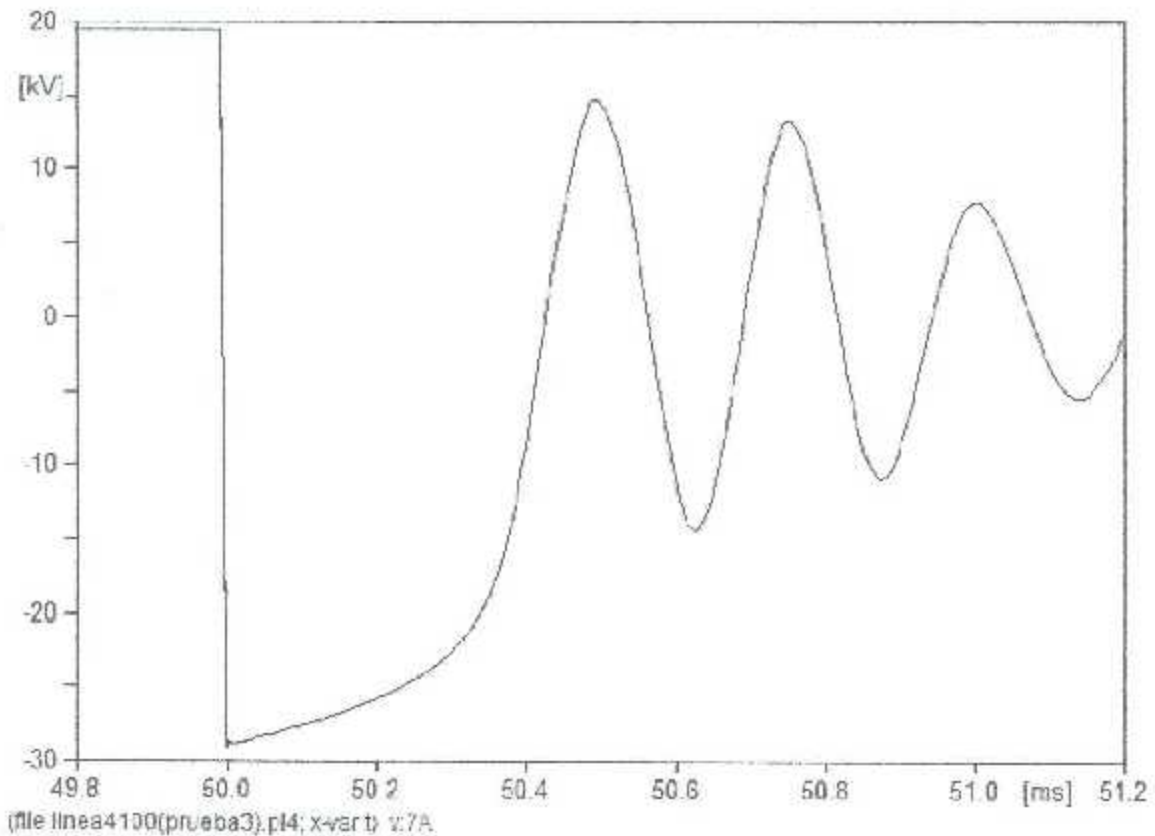


Figura 5.20 Acercamiento al transitorio de la figura 5.19

En las figuras 5.17 y 5.18 se observa cómo se ha eliminado el pico de sobretensión positivo generado por la apertura de los interruptores, pero aun existe un pico de sobrevoltaje negativo el cual tiene un valor de -28.910 kV, un valor aceptable en comparación con los de -260.31 kV mostrados en la figura 5.10.

A continuación se muestra la tensión que existe en la parte de baja tensión (120 V)

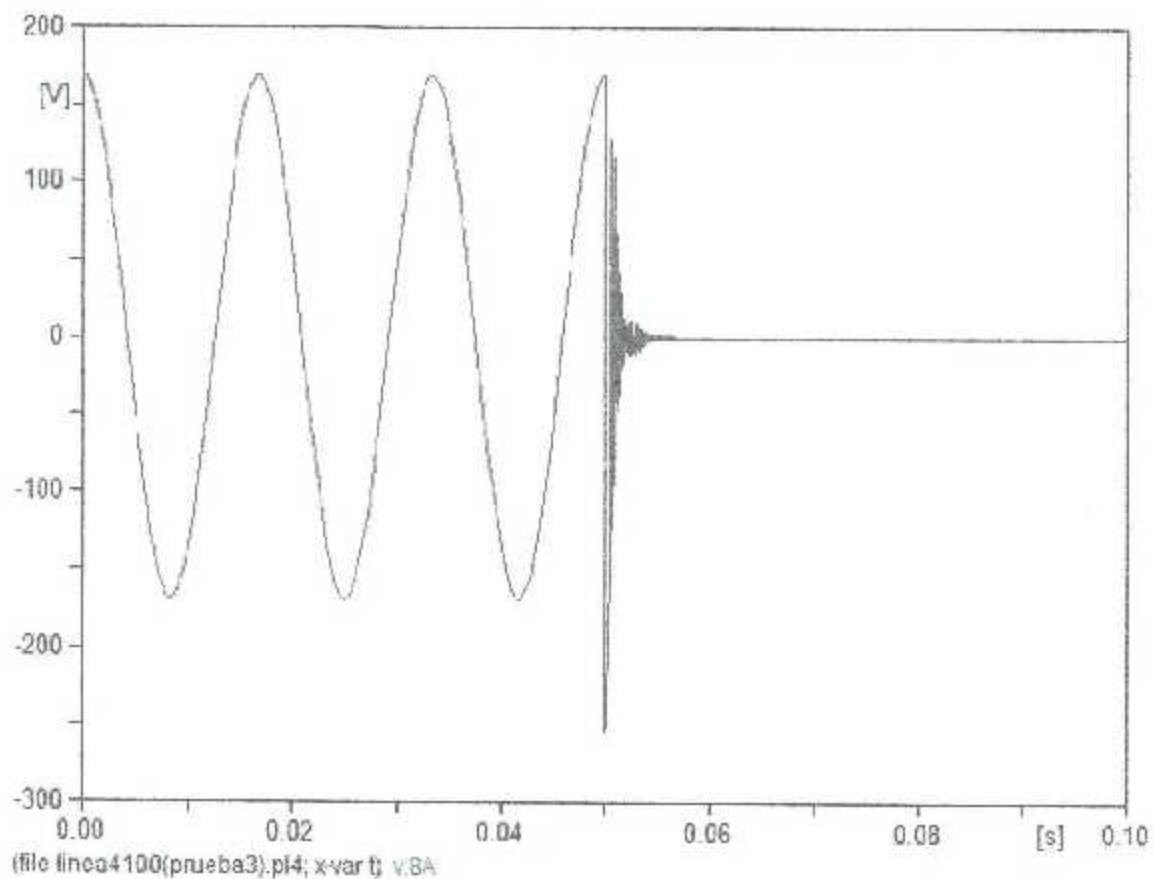


Figura 3.27 Señal de tensión en la parte de bajo voltaje con la inclusión de descargadores.

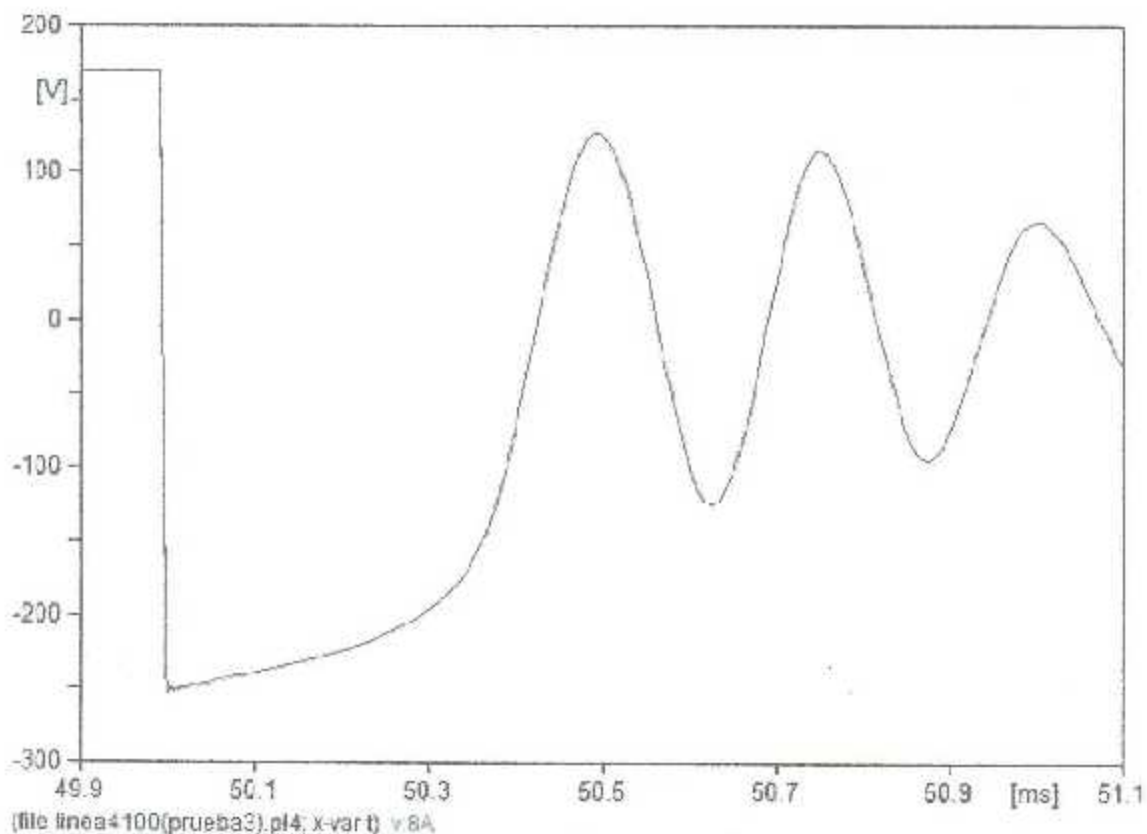


Figura 5.22 Acercamiento al transitorio de la figura 5.21.

Las dos últimas figuras nos muestran la eliminación absoluta de picos de sobretensión positivos, pero al igual que en alta tensión sigue existiendo un pico de tensión negativa en este caso con un valor de -250.6 V un valor más que aceptable en comparación con los -2252.6V que se tenían antes de la instalación de los supresores de sobretensiones (figura 5.12).

La última parte muestra la parte más importante de la simulación, la tensión después de los rectificadores, la cual es la que alimenta a los equipos IED's que son los que han salido dañados.

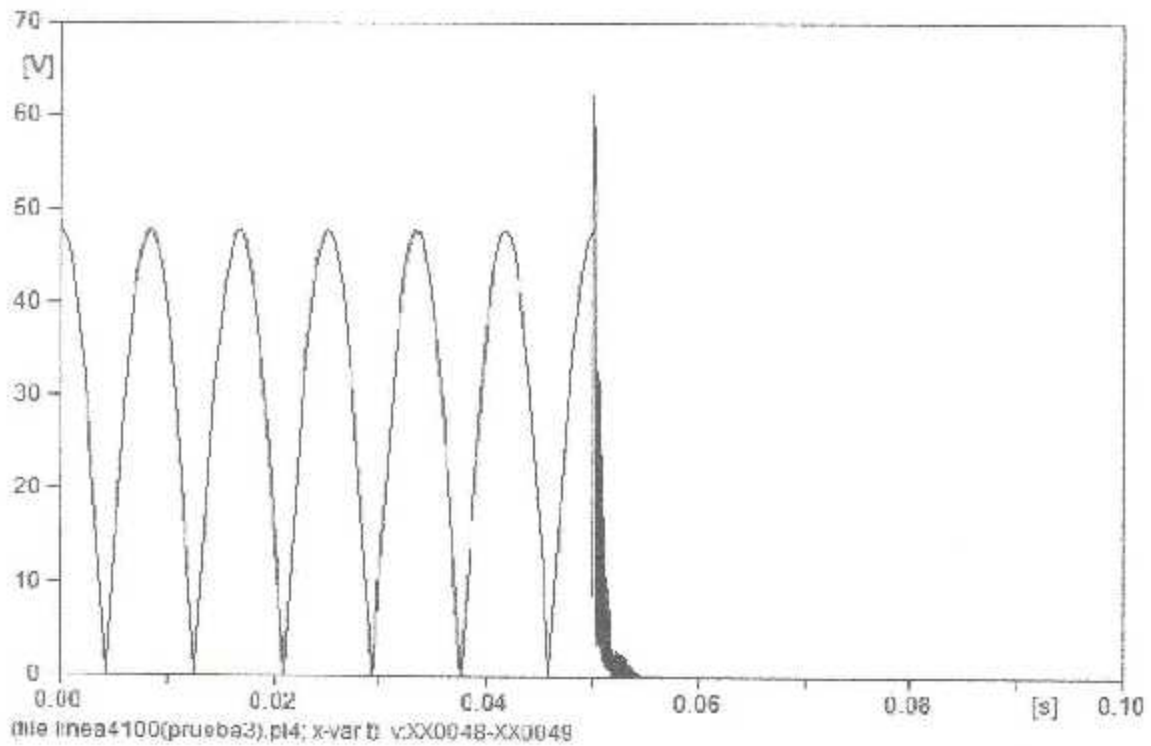


Figura 5.23 Señal rectificada que alimenta a los equipos IED (48 Vcd).

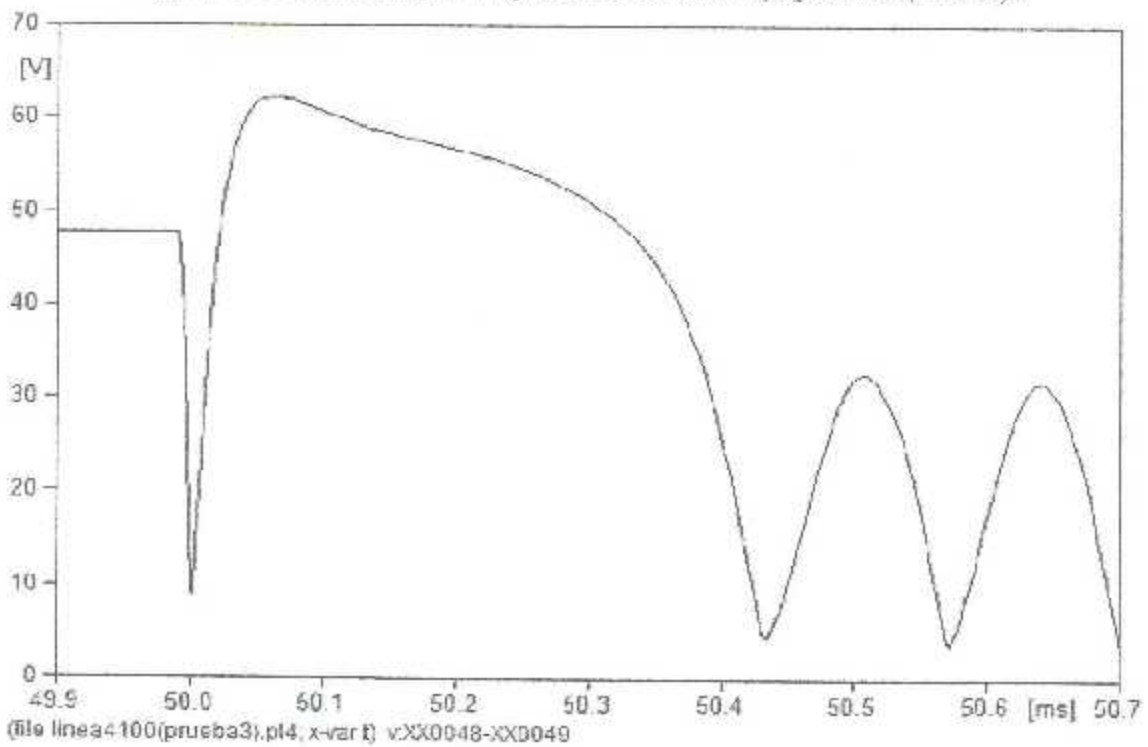


Figura 5.24 Acercamiento al transitorio de la figura 5.23

En las figuras 5.21 y 5.22 se observa un pico de sobretensión positivo, esto debido al rectificador de onda completa el cual invierte las señales negativas a positivas, el pico generado tiene un valor de 62.26 V, el cual está en un rango aceptable según el manual de los equipos D'25 [7], cabe destacar que el pico que se tenía era de de 575.5 V (figura 5.14), un valor muy elevado en comparación al último obtenido.

La solución presentada con anterioridad es un método teórico e ideal, por lo que se presume que sería diferente en la práctica, ya que los elementos de protección utilizados tienen capacitancias e inductancias parásitas lo que podría modificar los cálculos y modelos presentados, tanto en valores de tensión y corriente así como en las frecuencias. Para esto se utilizan circuitos de protección más detallados, a continuación se muestran algunos ejemplos de estos circuitos encontrados en la bibliografía[3][15].

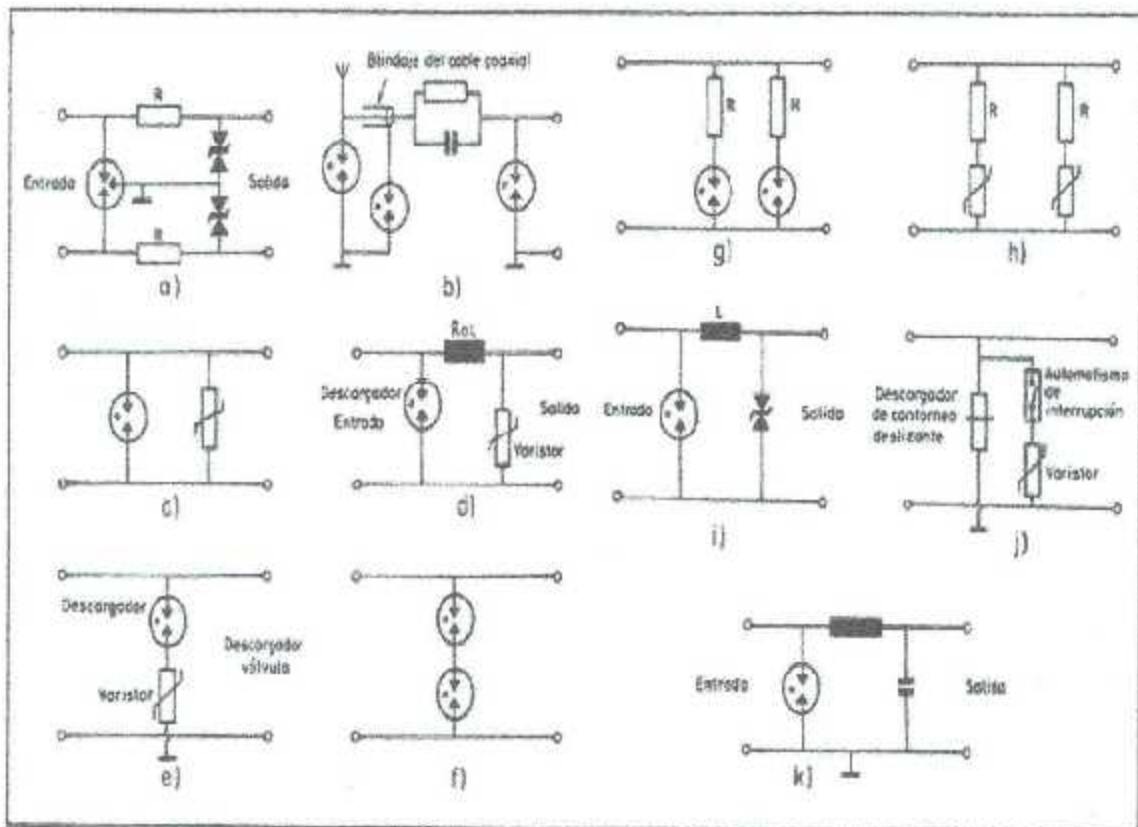


Figura 5.25 Circuitos de protección[3].

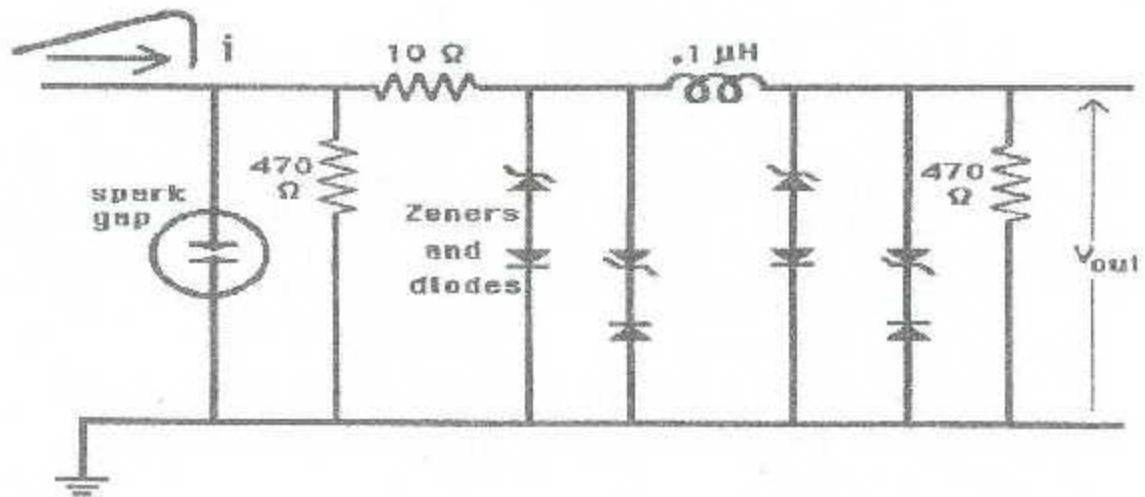


Figura 5.26 Circuito de protección usado contra descargas atmosféricas[15].

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

En este trabajo de tesis pudimos observar el tipo de ruido que puede generar la apertura de interruptores de potencia, demostrando como éste puede generar interferencias en equipos electrónicos aledaños, en este caso particular, acoplada de manera resistiva a través de las líneas de alimentación de los equipos.

En este estudio fue de mucha importancia los parámetros que presentan las líneas de alta tensión, así como el tipo de carga que alimentan y cualquier elemento por el cual circule la corriente, como llegó a ser en este caso, la simulación del arco eléctrico al abrirse los interruptores, lo cual nos generó una muy alta frecuencia; y aunque en este caso la modificación de la resistencia de arco no afectó niveles de tensión, existen casos donde es de la otra manera.

En esta prueba se toma como el mayor problema los altos picos de tensión transitorios que se generan ya que superan los niveles que soportan los equipos D'25, llegando a generarse tensiones de 575.5 V lo cual es un nivel muy alto en comparación a los 48 V con que se alimenta el dispositivo, todo esto en la parte de baja tensión.

El transitorio en alta tensión también debe de ser de consideración para la protección de los elementos que se encuentren en 13.8 kV, ya que si consideramos los resultados de las simulaciones de esta tesis los picos de tensión generados son extremadamente altos (260 kV) con respecto al voltaje base.

Aunque no fue tanto de llamar la atención en este trabajo, la frecuencia también tiene un rol importante en la compatibilidad electromagnética, ya que si se tienen ruidos de alta frecuencia se pueden acoplar de manera radial con elementos electrónicos provocando mandos falsos, daños en tarjetas, bloqueos, etc.

En la propuesta para la eliminación de picos se consultaron diferentes maneras para suprimirlos, encontrando en la presentada un solución rápida y eficaz, aunque un poco caro en términos monetarios, se decidió instalar los descargadores antes del transformador de 300 kVA, ya que consiguió atenuar esos altos picos de tensión de mejor manera que colocándolos en otra parte del sistema, también se pensó en incluir varistores en la parte de baja tensión, pero los picos no bajaban su valor de manera significativa y sería una pérdida de tiempo y dinero.

6.2 Recomendaciones

Este documento nos presentó uno de los primeros estudios de compatibilidad electromagnética realizados en la zona de Gómez Palacio, por lo que aún faltan varios detalles a tomar en cuenta para concretar una solución exacta a la problemática de interferencias electromagnéticas presentadas en la subestación Gómez Palacio.

La principal recomendación para mejorar el estudio es medir la alimentación de los equipos, con lectores de transitorios de alta velocidad, al momento de la apertura de los interruptores para conocer las magnitudes de la interferencia con mayor precisión y así poder trabajar sobre eso y buscar la solución más adecuada en caso de ser diferente.

También un trabajo a futuro es diseñar un circuito de protección más detallados incluyendo todas las magnitudes parásitas que se puedan presentar en la práctica, un diseño de filtros sería una parte relevante para poder eliminar altas frecuencias, y hacer un análisis detallado de los blindajes que se utilizan y en caso de no tenerlo el diseño de blindajes efectivos.

Otra parte importante a analizar sería como se encuentran las redes de tierras donde se conectan los equipos de alta tensión y los equipos de baja, conocer su disposición, que otras interconexiones tiene, saber si existen elementos faltantes en la red, etc. Ya que si se tiene una sólida red de tierras se pueden eliminar muchas interferencias y así tener un ambiente electromagnético sano.

ANEXOS

Anexo A: Características de conductores

Tabla A.1 Características de cable de aluminio y acero reforzado (ACSR)

| Conductor Mils at A.C.S.R. Al- St- Ratio | Aluminum | | Steel Zinc Coated 75% Aluminum 15% Carbon 15% Copper 10% | Copper Equivalent Mils at A.C.S.R. | Ultimate Strength Pounds | Weight Pounds per Mile | Geometric Mean Radius at 90 Degrees Feet | Approximate Clearance Height ft/ft Amps | Resistance Chart per Conductor per Mile | | | | | | | | | | Inductive Reactance Chart per Conductor per Mile at 1 P.S. Spanning All Overhead | | | | | | | | | | Short Capacity Resistance Approx. per Conductor per Mile at 1 P.S. Spanning | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------|--------|---|--|--------------------------------|---------------------------------|---|---|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------|--------------|--------------|--------------|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | W | R | | | | | | | d-c cycles | 60 cycles | 50 cycles | 40 cycles | 30 cycles | 20 cycles | d-c | 60 cycles | 50 cycles | 40 cycles | 30 cycles | 20 cycles | 25 cycles | 30 cycles | 35 cycles | 40 cycles | 45 cycles | 50 cycles | 55 cycles | 60 cycles | 65 cycles | 70 cycles | 75 cycles | 80 cycles | 85 cycles | 90 cycles | 95 cycles | 100 cycles | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1,000,000 | 1 | 0.1174 | 1 | 0.1036 | 1,840 | 10,777 | 0.0220 | 1,900 | 0.0468 | 0.0569 | 0.0669 | 0.0769 | 0.0869 | 0.0969 | 0.1069 | 0.1169 | 0.1269 | 0.1369 | 0.1469 | 0.1569 | 0.1669 | 0.1769 | 0.1869 | 0.1969 | 0.2069 | 0.2169 | 0.2269 | 0.2369 | 0.2469 | 0.2569 | 0.2669 | 0.2769 | 0.2869 | 0.2969 | 0.3069 | 0.3169 | 0.3269 | 0.3369 | 0.3469 | 0.3569 | 0.3669 | 0.3769 | 0.3869 | 0.3969 | 0.4069 | 0.4169 | 0.4269 | 0.4369 | 0.4469 | 0.4569 | 0.4669 | 0.4769 | 0.4869 | 0.4969 | 0.5069 | 0.5169 | 0.5269 | 0.5369 | 0.5469 | 0.5569 | 0.5669 | 0.5769 | 0.5869 | 0.5969 | 0.6069 | 0.6169 | 0.6269 | 0.6369 | 0.6469 | 0.6569 | 0.6669 | 0.6769 | 0.6869 | 0.6969 | 0.7069 | 0.7169 | 0.7269 | 0.7369 | 0.7469 | 0.7569 | 0.7669 | 0.7769 | 0.7869 | 0.7969 | 0.8069 | 0.8169 | 0.8269 | 0.8369 | 0.8469 | 0.8569 | 0.8669 | 0.8769 | 0.8869 | 0.8969 | 0.9069 | 0.9169 | 0.9269 | 0.9369 | 0.9469 | 0.9569 | 0.9669 | 0.9769 | 0.9869 | 0.9969 | 1.0069 | 1.0169 | 1.0269 | 1.0369 | 1.0469 | 1.0569 | 1.0669 | 1.0769 | 1.0869 | 1.0969 | 1.1069 | 1.1169 | 1.1269 | 1.1369 | 1.1469 | 1.1569 | 1.1669 | 1.1769 | 1.1869 | 1.1969 | 1.2069 | 1.2169 | 1.2269 | 1.2369 | 1.2469 | 1.2569 | 1.2669 | 1.2769 | 1.2869 | 1.2969 | 1.3069 | 1.3169 | 1.3269 | 1.3369 | 1.3469 | 1.3569 | 1.3669 | 1.3769 | 1.3869 | 1.3969 | 1.4069 | 1.4169 | 1.4269 | 1.4369 | 1.4469 | 1.4569 | 1.4669 | 1.4769 | 1.4869 | 1.4969 | 1.5069 | 1.5169 | 1.5269 | 1.5369 | 1.5469 | 1.5569 | 1.5669 | 1.5769 | 1.5869 | 1.5969 | 1.6069 | 1.6169 | 1.6269 | 1.6369 | 1.6469 | 1.6569 | 1.6669 | 1.6769 | 1.6869 | 1.6969 | 1.7069 | 1.7169 | 1.7269 | 1.7369 | 1.7469 | 1.7569 | 1.7669 | 1.7769 | 1.7869 | 1.7969 | 1.8069 | 1.8169 | 1.8269 | 1.8369 | 1.8469 | 1.8569 | 1.8669 | 1.8769 | 1.8869 | 1.8969 | 1.9069 | 1.9169 | 1.9269 | 1.9369 | 1.9469 | 1.9569 | 1.9669 | 1.9769 | 1.9869 | 1.9969 | 2.0069 | 2.0169 | 2.0269 | 2.0369 | 2.0469 | 2.0569 | 2.0669 | 2.0769 | 2.0869 | 2.0969 | 2.1069 | 2.1169 | 2.1269 | 2.1369 | 2.1469 | 2.1569 | 2.1669 | 2.1769 | 2.1869 | 2.1969 | 2.2069 | 2.2169 | 2.2269 | 2.2369 | 2.2469 | 2.2569 | 2.2669 | 2.2769 | 2.2869 | 2.2969 | 2.3069 | 2.3169 | 2.3269 | 2.3369 | 2.3469 | 2.3569 | 2.3669 | 2.3769 | 2.3869 | 2.3969 | 2.4069 | 2.4169 | 2.4269 | 2.4369 | 2.4469 | 2.4569 | 2.4669 | 2.4769 | 2.4869 | 2.4969 | 2.5069 | 2.5169 | 2.5269 | 2.5369 | 2.5469 | 2.5569 | 2.5669 | 2.5769 | 2.5869 | 2.5969 | 2.6069 | 2.6169 | 2.6269 | 2.6369 | 2.6469 | 2.6569 | 2.6669 | 2.6769 | 2.6869 | 2.6969 | 2.7069 | 2.7169 | 2.7269 | 2.7369 | 2.7469 | 2.7569 | 2.7669 | 2.7769 | 2.7869 | 2.7969 | 2.8069 | 2.8169 | 2.8269 | 2.8369 | 2.8469 | 2.8569 | 2.8669 | 2.8769 | 2.8869 | 2.8969 | 2.9069 | 2.9169 | 2.9269 | 2.9369 | 2.9469 | 2.9569 | 2.9669 | 2.9769 | 2.9869 | 2.9969 | 3.0069 | 3.0169 | 3.0269 | 3.0369 | 3.0469 | 3.0569 | 3.0669 | 3.0769 | 3.0869 | 3.0969 | 3.1069 | 3.1169 | 3.1269 | 3.1369 | 3.1469 | 3.1569 | 3.1669 | 3.1769 | 3.1869 | 3.1969 | 3.2069 | 3.2169 | 3.2269 | 3.2369 | 3.2469 | 3.2569 | 3.2669 | 3.2769 | 3.2869 | 3.2969 | 3.3069 | 3.3169 | 3.3269 | 3.3369 | 3.3469 | 3.3569 | 3.3669 | 3.3769 | 3.3869 | 3.3969 | 3.4069 | 3.4169 | 3.4269 | 3.4369 | 3.4469 | 3.4569 | 3.4669 | 3.4769 | 3.4869 | 3.4969 | 3.5069 | 3.5169 | 3.5269 | 3.5369 | 3.5469 | 3.5569 | 3.5669 | 3.5769 | 3.5869 | 3.5969 | 3.6069 | 3.6169 | 3.6269 | 3.6369 | 3.6469 | 3.6569 | 3.6669 | 3.6769 | 3.6869 | 3.6969 | 3.7069 | 3.7169 | 3.7269 | 3.7369 | 3.7469 | 3.7569 | 3.7669 | 3.7769 | 3.7869 | 3.7969 | 3.8069 | 3.8169 | 3.8269 | 3.8369 | 3.8469 | 3.8569 | 3.8669 | 3.8769 | 3.8869 | 3.8969 | 3.9069 | 3.9169 | 3.9269 | 3.9369 | 3.9469 | 3.9569 | 3.9669 | 3.9769 | 3.9869 | 3.9969 | 4.0069 | 4.0169 | 4.0269 | 4.0369 | 4.0469 | 4.0569 | 4.0669 | 4.0769 | 4.0869 | 4.0969 | 4.1069 | 4.1169 | 4.1269 | 4.1369 | 4.1469 | 4.1569 | 4.1669 | 4.1769 | 4.1869 | 4.1969 | 4.2069 | 4.2169 | 4.2269 | 4.2369 | 4.2469 | 4.2569 | 4.2669 | 4.2769 | 4.2869 | 4.2969 | 4.3069 | 4.3169 | 4.3269 | 4.3369 | 4.3469 | 4.3569 | 4.3669 | 4.3769 | 4.3869 | 4.3969 | 4.4069 | 4.4169 | 4.4269 | 4.4369 | 4.4469 | 4.4569 | 4.4669 | 4.4769 | 4.4869 | 4.4969 | 4.5069 | 4.5169 | 4.5269 | 4.5369 | 4.5469 | 4.5569 | 4.5669 | 4.5769 | 4.5869 | 4.5969 | 4.6069 | 4.6169 | 4.6269 | 4.6369 | 4.6469 | 4.6569 | 4.6669 | 4.6769 | 4.6869 | 4.6969 | 4.7069 | 4.7169 | 4.7269 | 4.7369 | 4.7469 | 4.7569 | 4.7669 | 4.7769 | 4.7869 | 4.7969 | 4.8069 | 4.8169 | 4.8269 | 4.8369 | 4.8469 | 4.8569 | 4.8669 | 4.8769 | 4.8869 | 4.8969 | 4.9069 | 4.9169 | 4.9269 | 4.9369 | 4.9469 | 4.9569 | 4.9669 | 4.9769 | 4.9869 | 4.9969 | 5.0069 | 5.0169 | 5.0269 | 5.0369 | 5.0469 | 5.0569 | 5.0669 | 5.0769 | 5.0869 | 5.0969 | 5.1069 | 5.1169 | 5.1269 | 5.1369 | 5.1469 | 5.1569 | 5.1669 | 5.1769 | 5.1869 | 5.1969 | 5.2069 | 5.2169 | 5.2269 | 5.2369 | 5.2469 | 5.2569 | 5.2669 | 5.2769 | 5.2869 | 5.2969 | 5.3069 | 5.3169 | 5.3269 | 5.3369 | 5.3469 | 5.3569 | 5.3669 | 5.3769 | 5.3869 | 5.3969 | 5.4069 | 5.4169 | 5.4269 | 5.4369 | 5.4469 | 5.4569 | 5.4669 | 5.4769 | 5.4869 | 5.4969 | 5.5069 | 5.5169 | 5.5269 | 5.5369 | 5.5469 | 5.5569 | 5.5669 | 5.5769 | 5.5869 | 5.5969 | 5.6069 | 5.6169 | 5.6269 | 5.6369 | 5.6469 | 5.6569 | 5.6669 | 5.6769 | 5.6869 | 5.6969 | 5.7069 | 5.7169 | 5.7269 | 5.7369 | 5.7469 | 5.7569 | 5.7669 | 5.7769 | 5.7869 | 5.7969 | 5.8069 | 5.8169 | 5.8269 | 5.8369 | 5.8469 | 5.8569 | 5.8669 | 5.8769 | 5.8869 | 5.8969 | 5.9069 | 5.9169 | 5.9269 | 5.9369 | 5.9469 | 5.9569 | 5.9669 | 5.9769 | 5.9869 | 5.9969 | 6.0069 | 6.0169 | 6.0269 | 6.0369 | 6.0469 | 6.0569 | 6.0669 | 6.0769 | 6.0869 | 6.0969 | 6.1069 | 6.1169 | 6.1269 | 6.1369 | 6.1469 | 6.1569 | 6.1669 | 6.1769 | 6.1869 | 6.1969 | 6.2069 | 6.2169 | 6.2269 | 6.2369 | 6.2469 | 6.2569 | 6.2669 | 6.2769 | 6.2869 | 6.2969 | 6.3069 | 6.3169 | 6.3269 | 6.3369 | 6.3469 | 6.3569 | 6.3669 | 6.3769 | 6.3869 | 6.3969 | 6.4069 | 6.4169 | 6.4269 | 6.4369 | 6.4469 | 6.4569 | 6.4669 | 6.4769 | 6.4869 | 6.4969 | 6.5069 | 6.5169 | 6.5269 | 6.5369 | 6.5469 | 6.5569 | 6.5669 | 6.5769 | 6.5869 | 6.5969 | 6.6069 | 6.6169 | 6.6269 | 6.6369 | 6.6469 | 6.6569 | 6.6669 | 6.6769 | 6.6869 | 6.6969 | 6.7069 | 6.7169 | 6.7269 | 6.7369 | 6.7469 | 6.7569 | 6.7669 | 6.7769 | 6.7869 | 6.7969 | 6.8069 | 6.8169 | 6.8269 | 6.8369 | 6.8469 | 6.8569 | 6.8669 | 6.8769 | 6.8869 | 6.8969 | 6.9069 | 6.9169 | 6.9269 | 6.9369 | 6.9469 | 6.9569 | 6.9669 | 6.9769 | 6.9869 | 6.9969 | 7.0069 | 7.0169 | 7.0269 | 7.0369 | 7.0469 | 7.0569 | 7.0669 | 7.0769 | 7.0869 | 7.0969 | 7.1069 | 7.1169 | 7.1269 | 7.1369 | 7.1469 | 7.1569 | 7.1669 | 7.1769 | 7.1869 | 7.1969 | 7.2069 | 7.2169 | 7.2269 | 7.2369 | 7.2469 | 7.2569 | 7.2669 | 7.2769 | 7.2869 | 7.2969 | 7.3069 | 7.3169 | 7.3269 | 7.3369 | 7.3469 | 7.3569 | 7.3669 | 7.3769 | 7.3869 | 7.3969 | 7.4069 | 7.4169 | 7.4269 | 7.4369 | 7.4469 | 7.4569 | 7.4669 | 7.4769 | 7.4869 | 7.4969 | 7.5069 | 7.5169 | 7.5269 | 7.5369 | 7.5469 | 7.5569 | 7.5669 | 7.5769 | 7.5869 | 7.5969 | 7.6069 | 7.6169 | 7.6269 | 7.6369 | 7.6469 | 7.6569 | 7.6669 | 7.6769 | 7.6869 | 7.6969 | 7.7069 | 7.7169 | 7.7269 | 7.7369 | 7.7469 | 7.7569 | 7.7669 | 7.7769 | 7.7869 | 7.7969 | 7.8069 | 7.8169 | 7.8269 | 7.8369 | 7.8469 | 7.8569 | 7.8669 | 7.8769 | 7.8869 | 7.8969 | 7.9069 | 7.9169 | 7.9269 | 7.9369 | 7.9469 | 7.9569 | 7.9669 | 7.9769 | 7.9869 | 7.9969 | 8.0069 | 8.0169 | 8.0269 | 8.0369 | 8.0469 | 8.0569 | 8.0669 | 8.0769 | 8.0869 | 8.0969 | 8.1069 | 8.1169 | 8.1269 | 8.1369 | 8.1469 | 8.1569 | 8.1669 | 8.1769 | 8.1869 | 8.1969 | 8.2069 | 8.2169 | 8.2269 | 8.2369 | 8.2469 | 8.2569 | 8.2669 | 8.2769 | 8.2869 | 8.2969 | 8.3069 | 8.3169 | 8.3269 | 8.3369 | 8.3469 | 8.3569 | 8.3669 | 8.3769 | 8.3869 | 8.3969 | 8.4069 | 8.4169 | 8.4269 | 8.4369 | 8.4469 | 8.4569 | 8.4669 | 8.4769 | 8.4869 | 8.4969 | 8.5069 | 8.5169 | 8.5269 | 8.5369 | 8.5469 | 8.5569 | 8.5669 | 8.5769 | 8.5869 | 8.5969 | 8.6069 | 8.6169 | 8.6269 | 8.6369 | 8.6469 | 8.6569 | 8.6669 | 8.6769 | 8.6869 | 8.6969 | 8.7069 | 8.7169 | 8.7269 | 8.7369 | 8.7469 | 8.7569 | 8.7669 | 8.7769 | 8.7869 | 8.7969 | 8.8069 | 8.8169 | 8.8269 | 8.8369 | 8.8469 | 8.8569 | 8.8669 | 8.8769 | 8.8869 | 8.8969 | 8.9069 | 8.9169 | 8.9269 | 8.9369 | 8.9469 | 8.9569 | 8.9669 | 8.9769 | 8.9869 | 8.9969 | 9.0069 | 9.0169 | 9.0269 | 9.0369 | 9.0469 | 9.0569 | 9.0669 | 9.0769 | 9.0869 | 9.0969 | 9.1069 | 9.1169 | 9.1269 | 9.1369 | 9.1469 | 9.1569 | 9.1669 | 9.1769 | 9.1869 | 9.1969 | 9.2069 | 9.2169 | 9.2269 | 9.2369 | 9.2469 | 9.2569 | 9.2669 | 9.2769 | 9.2869 | 9.2969 | 9.3069 | 9.3169 | 9.3269 | 9.3369 | 9.3469 | 9.3569 | 9.3669 | 9.3769 | 9.3869 | 9.3969 | 9.4069 | 9.4169 | 9.4269 | 9.4369 | 9.4469 | 9.4569 | 9.4669 | 9.4769 | 9.4869 | 9.4969 | 9.5069 | 9.5169 | 9.5269 | 9.5369 |

Anexo B: Cálculo de los valores de resistencia e inductancia de las cargas RL.

Si se tiene la potencia de 300 kVA, podemos obtener la corriente máxima por cada fase a una tensión de 120 V de la siguiente manera, hay que recordar que serán 100 kVA por fase:

$$S = VI \quad (\text{B.1})$$

$$I = \frac{S}{V} \quad (\text{B.2})$$

$$I = \frac{100000 \text{ (Volts * Amp)}}{120 \text{ Volts}} \quad (\text{B.3})$$

$$I = 833 \text{ Amp} \quad (\text{B.4})$$

Si f.d.p es de 0.95 podemos calcular el ángulo entre la potencia activa P y el valor absoluto de la aparente S (φ), para así poder tener los valores de potencia activa y reactiva Q.

$$\varphi = \cos^{-1}(f, d, p) \quad (\text{B.5})$$

$$\varphi = \cos^{-1}(0.95) \quad (\text{B.6})$$

$$\varphi = 18.194^\circ \quad (\text{B.7})$$

Una vez conocido el valor del ángulo entre P y S, se procede a calcular las potencias activa P y reactiva Q de la siguiente manera.

$$P = S \cos \varphi \quad (\text{B.8})$$

$$P = 100000 \cos(18.194) \quad (\text{B.9})$$

$$P = 95000 \text{ Watts} \quad (\text{B.10})$$

$$Q = S \sin \varphi \quad (\text{B.11})$$

$$Q = 100000 \sin(18.194) \quad (\text{B.12})$$

$$Q = 31223 \text{ VAR's} \quad (\text{B.13})$$

Con estos valores de potencia activa P y reactiva Q obtenemos el valor de la resistencia y de la inductancia que se pondrán en la carga RL de la simulación.

Si

$$P = I^2 R \quad (\text{B.14})$$

$$R = \frac{P}{I^2} \quad (\text{B.15})$$

$$R = \frac{95000}{833^2} = 0.136\Omega \quad (\text{B.16})$$

$$Q = I^2 X_L \quad (\text{B.17})$$

Donde X_L es la reactancia inductiva de L con un valor de $X_L = 2\pi fL$, f es la frecuencia del sistema, en este caso es de 60 Hz, sustituyendo en la ecuación B.16 tenemos

$$Q = I^2 2\pi fL \quad (\text{B.18})$$

$$L = \frac{Q}{I^2 2\pi f} \quad (\text{B.19})$$

$$L = \frac{31223}{(833)^2 2\pi(60)} = 0.11\text{mH} \quad (\text{B.20})$$

Estos valores se introducen en los módulos RLC.

Anexo C: Descargadores de sobretensiones transitorias.

La puesta a tierra, el apantallamiento y la conexión equipotencial no pueden garantizar siempre inmunidad frente a una interferencia. Por lo tanto, se requiere una protección complementaria, los cuales restrinjan los niveles de tensión a valores tolerables para evitar tensiones peligrosas que puedan poner en peligro a las personas, o dañar los aislamientos de los equipos conectados a la red.

Los dispositivos limitadores de tensión en la actualidad son, normalmente, varistores de óxido metálico, que se conectan entre fase y tierra. Otros dispositivos manejados por voltaje, bruscamente cambian de alta a baja resistencia cuando se supera un voltaje umbral. Estos incluyen chisperos y tubos de descarga de gas. Otros dispositivos empleados incluyen filtros de atenuación de onda (para dar protección adicional a equipo electrónico sensible) y barreras de onda (donde penetran o salen cables del edificio).

C.1 Clasificación de los dispositivos de protección.

Para la protección contra sobretensiones transitorias existen dos tipos de descargadores, uno basado en el principio de la disrupción eléctrica (dispositivos de arco, encapsulados en gas, o al vacío), mientras que el segundo utiliza resistencias no lineales, dependientes de la tensión en sus bornes (Varistores de óxido metálico).

C.1.1 Dispositivos de arco.

Básicamente disponen de dos electrodos, cerrados por un tubo de gas, o al vacío. Estos dispositivos permanecen inactivos a tensión nominal de la red, pero, cuando alcanzan un valor de tensión establecido, actúan como un cortocircuito, descargando toda la energía transitoria a tierra.

Tomando en cuenta la rapidez de elevación de energía transitoria, especialmente por descargas atmosféricas, estos dispositivos son considerablemente lentos, pues requieren de algunos microsegundos para alcanzar la tensión de disrupción y empezar a conducir. Por esta razón, estos equipos no son recomendables para su uso en baja tensión, a menos que se los use combinados con otro tipo de protecciones.

C.1.2 Dispositivos basados en resistencias no lineales.

Este tipo de protecciones conduce muy bajas cantidades de corriente a tensión nominal de la red, pero al momento de un disturbio, su impedancia cae a medida que la tensión aumenta, incrementando la cantidad de corriente conducida para limitar la tensión en los bornes del equipo. Una de las ventajas de estos dispositivos es que el nivel de tensión no cae por debajo del nominal de la red durante una descarga.

Los equipos más comunes dentro de esta categoría son los Varistores de Oxido Metálico (MOV). Cuando están conectados al circuito en operación normal, estos presentan alta impedancia, por lo que la tensión de salida es, prácticamente, igual a la de entrada.

C.2 Modelación de un varistor.

Un varistor de óxido metálico MOV es una resistencia variable dependiente de la tensión, cuyo valor disminuye, a medida que la tensión aplicada al dispositivo se incrementa.

La característica no lineal V-I de un MOV viene dado por la ecuación.

$$I = KV^\alpha \quad (C.1)$$

Donde:

- K= Factor dependiente de las dimensiones del dispositivo.
- α = Parametro dependiente de las propiedades del material constitutivo del dispositivo.

Para un SiC, α oscila alrededor de 5, mientras que para un ZnO, puede ser mayor a 30.

La característica V-I de un MOV diseñado para baja tensión puede dividirse en tres regiones:

- Zona de fuga. I menor a 1 mA, se comporta como un capacitor.
- Operación normal del Varistor. I desde 1 mA hasta alrededor de 100 A, existe un componente principalmente resistivo.
- Región de superior. I mayor a 100 A, el dispositivo se vuelve puramente resistivo.

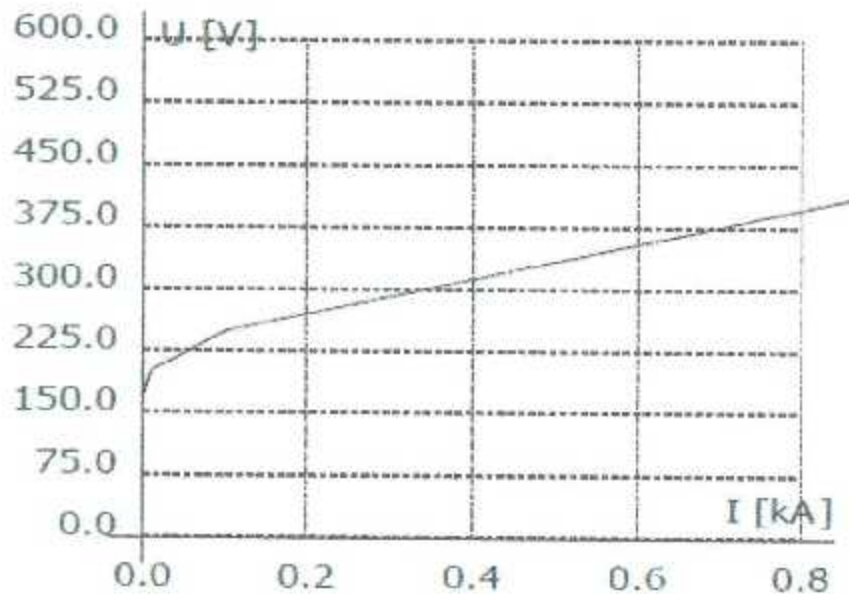


Figura C.1 Curva característica V-I de MOV de 130V.

C.3 Modelo eléctrico de un MOV

Un equivalente eléctrico para un varistor puede representarse como una resistencia dependiente de la tensión, en serie con una inductancia de muy bajo valor y una resistencia de valor fijo. La capacitancia en paralelo representa el efecto que ofrece el dispositivo en sus extremos, generalmente con valores inferiores a los microfaradios. Una representación circuital puede ser de la siguiente manera:

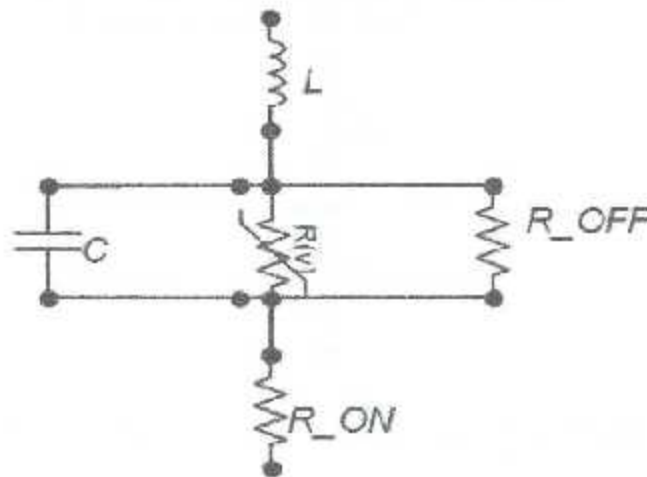


Figura C.2 Representación eléctrica de un varistor.

- L = Inductancia equivalente, en el orden de los mH.
- C = Capacitancia equivalente, en el orden de los μF .
- R_{OFF} = Resistencia de operación en la zona de fuga, generalmente en el orden de $1000\text{M}\Omega$.
- $R(V)$ = Resistencia variable, dependiente de la tensión, va desde 0 hasta valores superiores a R_{OFF} .
- R_{ON} = Resistencia de salida, generalmente con valor de 1Ω .

C.3.1 Operación en la zona de fuga.

A bajos niveles de corriente, la curva característica del MOV es casi óhmica, pero con alta dependencia de la temperatura. La Resistencia $R(V)$ se puede ignorar, pues su valor es mayor que R_{OFF} , de igual manera con R_{ON} , pudiendo interpretarse de esta manera:

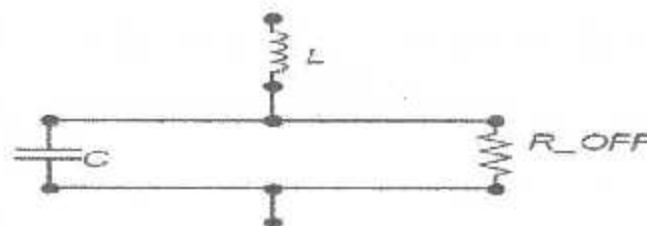


Figura C.3 Representación eléctrica de un varistor en modo de fuga.

La capacitancia C , generalmente permanece constante para un amplio rango de frecuencias y tensiones, dentro de la zona de fuga. Este valor varía ligeramente cuando la tensión se ubica dentro de los valores nominales de operación, reduciéndose considerablemente.

C.3.2 Región de operación normal del MOV.

En esta región, el comportamiento responde a la ecuación. El varistor se vuelve conductivo, y $R(V)$ predomina sobre R_{ON} y R_{OFF}

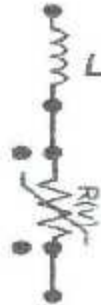


Figura C.4 Representación eléctrica de un varistor en modo de operación normal.

C.3.3 Región de operación superior

Ante altas corrientes, el varistor se comporta como un cortocircuito, donde el valor de $R(V)$ alcanza valores de R_{ON} , dependiendo únicamente de la resistencia del material por unidad de volumen. La resistencia es lineal, oscilando en valores de corriente desde 50A a 50000A, según el modelo en estudio, su geometría, tamaño, etc.

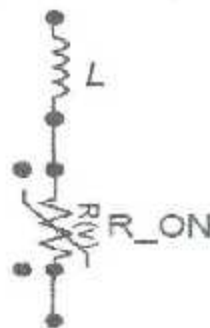


Figura C.5 Representación eléctrica de un varistor en modo de operación superior.

C.4 Criterios para escoger un MOV

Un dispositivo de descarga para sobretensiones transitorias debería cumplir con las siguientes características:

- Tensión Máxima de Operación Continua (MCOV). Es el valor de tensión máxima a la que debe estar expuesto el dispositivo para que permanezca operando dentro de la zona de fuga (no conductiva). El valor de MCOV no será menor que el 115% del valor RMS de la tensión nominal del sistema.
- Corriente de fuga. Su valor RMS no debe exceder los 100 μA al valor de MCOV.
- Tensión de encendido. La tensión mínima en el dispositivo que permite que éste entre en modo conductivo. Este valor no debe exceder el 125% de MCOV.
- Tensión de descarga. El nivel de tensión máximo en el dispositivo mientras está descargando corrientes transitorias. Este valor no debe superar el 160% de MCOV.
- Capacidad de recuperación. El dispositivo debe ser capaz de volver a estado de alta impedancia luego de descargar las corrientes transitorias.
- Tiempo de vida útil. Número de descargas garantizadas antes de ser reemplazado.

Al evaluar un dispositivo se debe asegurar que se consiga una vida prolongada tanto por la presencia de los transitorios como por las variaciones del sistema eléctrico y que los niveles de tensión de operación tengan margen suficiente sobre el nivel de sensibilidad de los equipos para conseguir la protección deseada. No se debe comprometer la vida de los dispositivos por tratar de obtener estos valores bajos.

El costo de los dispositivos de protección contra transitorios debe ser bajo, comparado con los costos de reemplazo y mantenimiento de los equipos y los beneficios de disponibilidad y productividad.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Hugh W. Denny. "Grounding for the control of EMI", First edition, Don White Consultants, Inc, 1983, ISBN 0-932263-17-8
- [2] Intertec electrical group. "Practical guide to quality power for sensitive electronic equipment". EC&M, 1992, ISBN 0-87288-512-7.
- [3] Josep Balcells, Francesc Daura, Rafael Esparza, Ramón Pallás. "Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos". Alfaomega marcombo, 1992, ISBN 968-6223-87-8.
- [4] "IEEE Recommended practice for powering and grounding electronic equipment". IEEE Std 1100-1999, 1999, ISBN 0-7381-1660-2 SH94741.
- [5] GE Energy systems. "D25 Multifunctional IED Installation & Maintenance Guide" Versión 4.00994-0023, 2002
- [6] GE Energy systems. "D25 IED User's Manual" Versión 3.00994-0081.
- [7] GE Harris Energy control systems Canada, Inc. "Hardware technical manual D25" 994-0011.
- [8] Tesis para el grado de Doctor en ciencias presentada por el M.C. Gastón Hernández Martínez. "Análisis, simulación y control de transitorios electromagnéticos en subestaciones aisladas en SF6 por medio de redes de tierra". Instituto Tecnológico de Morelia, 2007.
- [9] Bernhard Keiser, "Principles of electromagnetic compatibility", 3rd edition, Artech House, 1987, ISBN 0-89006-206-4.
- [10] Fischer/Balzer/Lutz, "EMV Störfestigkeitsprüfungen", Franzis-Verlag GmbH & Co., 1992, ISBN 3-7723-4371-6
- [11] Allan Greenwood. "Electrical transients in power systems", Second edition. Wiley-Interscience, 1991, ISBN 0-471-62058-0
- [12] Gustavo Carrasco "Electromagnetic Interference in the Substation Jose 400/115 kV", 1-4244-0288-3 © 2006 IEEE.
- [13] S. Carsimamovic and Z. Bajramovic, M. Veleđar, M. Ljevak, A. Carsimatovic, P. Osmokrović, "Influence of resistance of electric arc on transients due to disconnect switch in air-insulated substations", 1-4244-0914-4 ©2007 IEEE.
- [14] Rubén Barbecho, Milton Cabrera, "Aplicación de interruptores diferenciales para la protección eléctrica de instalaciones de baja tensión residenciales", Tesis para el grado de ingeniero eléctrico, Director Ing. Modesto Salgado. Convenio interinstitucional empresa eléctrica regional centrosur C.A. - Universidad de Cuenca, Ecuador 2012.
- [15] Victor M. Cabrera M. "Transient Behaviour of a Surge Protection Circuit Under Standard Lightning Current Pulse A theoretical study", Institute for High Voltage Research Uppsala University, UURIE: 209-88, ISSN 0349-8352, Uppsala, October 1988.