

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Evaluación de la interferencia electromagnética generada por ensayos de impulso en laboratorio de la UTFSM y propuestas de mitigación

IVÁN JOSÉ TAPIA CUEVAS

2026

Requisito parcial para obtener el título de:
Ingeniero Electricista

Profesor Guía:
Dr. Johny Montaña Chaparro (UTFSM)

Comisión:
Dr. Roger Schurch Brandt (UTFSM)

Valparaíso, 3 de agosto de 2026.

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Evaluación de la interferencia electromagnética generada por ensayos de impulso en laboratorio de la UTFSM y propuestas de mitigación.

Nombre del candidato(a): Iván José Tapia Cuevas

Carrera / Grado: Ingeniería Eléctrica / Ingeniero Electricista

Campus: Casa Central, Valparaíso **Departamento:** Ingeniería Eléctrica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Johny Montaña Chaparro , en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

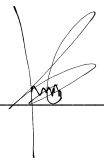
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 03-08-2026 **Firma:** Johny Montaña

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 03-08-2026 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

"El privilegio de una vida es convertirse en quien realmente eres."
— Carl Gustav Jung

Agradecimientos

Un especial agradecimiento a mi familia, a mis amigos y al profesor Johnny Montaña por la dirección de esta memoria y por las observaciones realizadas durante su desarrollo. Asimismo, agradezco a todas aquellas personas que, con su apoyo, sus palabras y su luz, me acompañaron en los momentos de mayor dificultad. Gracias a todos ellos he podido avanzar, crecer y llegar hasta donde estoy hoy.

Ex umbra in solem

Índice de Contenidos

Índice de Contenidos **1**

Índice de Figuras **3**

Índice de Tablas **8**

Resumen **1**

1. Introducción **2**
1.1. Motivación 2
1.2. Objetivo general 3
1.3. Objetivos específicos 3
1.4. Alcance del estudio 3

2. Marco teórico **4**
2.1. Ensayos de impulso en alta tensión 4
2.2. Sistemas de puesta a tierra 7
2.3. Técnicas de medición en sistemas de puesta a tierra 9
2.4. Compatibilidad electromagnética 13

3. Caracterización del fenómeno de interferencia en laboratorio de la UTFSM **18**

4. Caracterización del sistema de puesta a tierra **21**
4.1. Evaluación en baja frecuencia 21
4.2. Evaluación en alta frecuencia 29

5. Modelamiento transitorio **40**
5.1. Evaluación del sistema de puesta a tierra por medio de simulaciones computacionales 40

6. Sobretensiones transitorias en la red de baja tensión **49**
6.1. Evaluación experimental de la sobretensión transitoria 49
6.2. Análisis de sobretensión transitoria por medio de simulaciones computacionales 53

7. Propuestas de mitigación en laboratorio de la UTFSM **59**
7.1. Identificación de mecanismos de acoplamiento 59
7.2. Medidas de mitigación sobre el sistema de puesta a tierra 60
7.3. Medidas de mitigación del acoplamiento electromagnético 62

7.4. Implementación de dispositivos de protección 67
7.5. Recomendaciones adicionales 71

8. Conclusiones **72**

9. Trabajo futuro **74**

Apéndice **75**

A. Sistema de puesta a tierra **75**

B. Modelo de parámetros concentrados **77**

C. Implementación en ATPDraw de fuente de impulso de tensión con puntos de inyección y retorno independientes **78**

D. Esquemas de conexión para ensayos con y sin ruptura dieléctrica en ATPDraw **79**

E. Mecanismos de acoplamiento **80**

F. Planos constructivos del sistema de placas de aluminio propuesto **81**

Bibliografía **84**

Índice de Figuras

2.1. Parámetros temporales del impulso de tensión. Imagen extraída de la literatura referenciada [1]. 4
2.2. Generador de impulsos de una etapa en dos configuraciones equivalentes, diferenciadas por la disposición de las resistencias de frente y cola: (a) y (b). C_1: condensador principal de carga. C_2: capacitancia de descarga. R_1: resistencia de frente o de amortiguamiento. R_2: resistencia de descarga. Imagen extraída de la literatura referenciada [2]. 5
2.3. Modelo Π de parámetros concentrados para conductor horizontal. Esquema extraído de la literatura referenciada [3]. 8
2.4. Método de caída de potencial para medición de resistencia de puesta tierra. Esquema extraído de la norma IEEE Std 80 [4]. 10
2.5. Prueba de continuidad en el sistema de puesta a tierra por medio del método de cuatro conductores con inversión de polaridad. Elaboración propia. . . . 10
2.6. Esquema de conexionado para la medición de impedancia en el sistema de puesta a tierra (G: Generador, HFCT: Transformador de corriente de alta frecuencia). Adaptado de lo expuesto en la literatura [5]. 11
2.7. Esquema de conexionado para la medición de tensiones transitorias (G: Generador de impulsos, D: Divisor de tensión, MP: Muestra de prueba, HFCT: Transformador de corriente de alta frecuencia, R: Nodo de referencia, P: Nodo de prueba). Elaboración propia. 12
2.8. Relación entre niveles de perturbación, susceptibilidad, inmunidad y límites de emisión en el marco de la compatibilidad electromagnética. Esquema extraído de literatura referenciada [6]. 14
2.9. Características de las formas de onda asociadas a eventos transitorios. Elaboración propia, basada en lo descrito en la norma IEEE Std 1159 [7]. . . . 16

3.1. Laboratorio de alta tensión de la UTFSM. 18
3.2. Televisor dañado debido a ensayos de impulso. 18
3.3. Generadores de impulso de tensión pertenecientes al laboratorio de alta tensión de la UTFSM. (a) Generador HAEFELY 400 kV y 600 J. (b) Generador HAEFELY 900 kV y 18 kJ. 19
3.4. Metodología de análisis utilizada para identificar los mecanismos responsables de las interferencias electromagnéticas y sobretensiones observadas durante los ensayos de impulso en el Laboratorio de Alta Tensión de la UTFSM. 20

4.1. Configuración experimental utilizada para la medición de resistividad del suelo mediante el método de Wenner, utilizando el telurómetro Megabras EM-4058. Los terminales H y E corresponden a inyección de corriente, mientras que S y ES corresponden a medición de potencial. Imagen adaptada del manual del equipo EM-4058 [8]. 22
4.2. Representación gráfica de las mediciones de resistividad aparente del suelo y su valor promedio en la cancha deportiva de la UTFSM. 23
4.3. Configuración experimental utilizada para la medición de resistencia de puesta a tierra mediante el método de caída de potencial, utilizando el telurómetro Megabras, EM-4058. Imagen adaptada del manual del equipo EM-4058 [8]. 24
4.4. Resistencia del sistema de puesta a tierra del laboratorio de alta tensión de la UTFSM en función de la distancia. (a) Resistencia total del sistema. (b) Detalle de la resistencia para la zona estable de la medición. 25
4.5. Configuración experimental utilizada para la medición de continuidad del sistema de puesta a tierra mediante el método de cuatro conductores con cambio de polaridad. Elaboración propia. 26
4.6. Estado actual de cámaras del sistema de puesta a tierra ubicadas en el patio de contaminación del laboratorio de alta tensión, evidenciando exposición a la intemperie, ingreso de agua y corrosión avanzada en elementos metálicos. 27
4.7. Resistencia efectiva de la prueba de continuidad en cámaras del laboratorio en función de la distancia efectiva a la cámara de referencia, incluyendo línea de tendencia. 28
4.8. Esquema de continuidad eléctrica en cámaras del laboratorio. Basado en mediciones de resistencia respecto a la cámara de referencia $N°$ 5. 28
4.9. Esquema de conexión empleado para la medición de impedancia del sistema de puesta a tierra. Elaboración propia. 29
4.10. Esquema de conexión del electrodo de retorno del generador de impulsos de tensión. Elaboración propia. 30
4.11. Electrodo de retorno del generador de impulsos de tensión. 31
4.12. Medición de corriente inyectada al sistema de puesta a tierra mediante transformador de alta frecuencia Pearson. 31
4.13. Tensión de impulso aplicada al sistema de puesta a tierra y corriente medida para retorno lejano de 70 m. 31
4.14. Respuesta en frecuencia del sistema de puesta a tierra del laboratorio de alta tensión para retorno lejano de 70 m. 32
4.15. Esquema de conexión para la medición de potenciales transitorios en el sistema de puesta a tierra para ensayos con ruptura dieléctrica. Elaboración propia. 34
4.16. Elementos utilizados en la configuración experimental para la medición de tensiones transitorias: (a) spark gap empleado para ensayos con ruptura dieléctrica y (b) aislador empleado para ensayos sin ruptura dieléctrica. . . 35
4.17. Impulso de tensión aplicado y corriente medida para ensayo con ruptura dieléctrica. 35
4.18. Forma de onda de la tensión diferencial transitoria registrada en la cámara $N°$ 1 del sistema de puesta a tierra durante ensayo con y sin ruptura dieléctrica. 36

4.19. Tensión diferencial transitoria máxima registrada en las cámaras del sistema de puesta a tierra durante ensayos con ruptura dieléctrica, en función de la distancia efectiva respecto de la cámara de referencia $N°$ 5. 36
4.20. Tensión diferencial transitoria máxima registrada en las cámaras del sistema de puesta a tierra durante ensayos sin ruptura dieléctrica, en función de la distancia efectiva respecto de la cámara de referencia $N°$ 5. 37
4.21. Comparación experimental de la impedancia de impulso Z_1, obtenida en cámaras del laboratorio para ensayos con y sin ruptura dieléctrica. 38
4.22. Comparación experimental asociada al parámetro Z_3, obtenida en cámaras del laboratorio para ensayos con y sin ruptura dieléctrica. 39

5.1. Medición de la resistencia del sistema de puesta a tierra por medio de simulación en ATPDraw para estado estacionario en modelo de parámetros concentrados (RLC). Elaboración propia. 42
5.2. Puntos de inyección en el modelo de parámetros concentrados (RLC). Elaboración propia. 43
5.3. Respuesta en frecuencia de la magnitud de la impedancia del sistema de puesta a tierra obtenida mediante simulación en ATPDraw. 43
5.4. Respuesta en frecuencia del ángulo de la impedancia del sistema de puesta a tierra obtenida mediante simulación en ATPDraw. 44
5.5. Tensión diferencial máxima simulada para pruebas con ruptura dieléctrica, en función de la distancia efectiva respecto a la cámara de referencia. 46
5.6. Tensión diferencial máxima simulada para pruebas sin ruptura dieléctrica, en función de la distancia efectiva respecto a la cámara de referencia. 46
5.7. Comparación de la impedancia de impulso Z1 obtenida experimentalmente y mediante simulación para ensayos con ruptura dieléctrica. 47
5.8. Comparación de la impedancia de impulso Z1 obtenida experimentalmente y mediante simulación para ensayos sin ruptura dieléctrica. 47
5.9. Comparación del parámetro Z3 obtenido experimentalmente y mediante simulación para ensayos con ruptura dieléctrica. 48
5.10. Comparación del parámetro Z3 obtenido experimentalmente y mediante simulación para ensayos sin ruptura dieléctrica. 48

6.1. Configuración experimental empleada para la medición de sobretensiones transitorias en tomacorrientes de la red de baja tensión del laboratorio. . . 49
6.2. Zona de ensayos del laboratorio utilizada para la medición de sobretensiones en la red de baja tensión. Elaboración propia. 50
6.3. Impulso de tensión aplicado y corriente de inyección para prueba de sobretensión en tablero cercano al generador de impulsos (TDF-2). 51
6.4. Sobretensión transitoria registrada en tablero TDF-2 durante medición de tensión Fase–Neutro en tomacorriente lateral asociado al tablero. 52
6.5. Representación tridimensional simplificada del sistema de puesta a tierra y canalizaciones del laboratorio, utilizada como base para el modelado de sobretensiones. Elaboración propia. 53
6.6. Vista superior de la canalización subterránea cercana a la zona de ensayos principal. Elaboración propia. 54
6.7. Esquema general de simulación por segmentos propuesto para análisis de sobretensión. . Elaboración propia. 55

6.8. Respuesta de sobretensión transitoria obtenida mediante simulación del modelo segmentado en ATPDraw, con representación de las tensiones fasetierra, faseneutro y neutrotierra. 57
6.9. Respuesta de sobretensión transitoria obtenida mediante simulación en ATPDraw del modelo segmentado, considerando la incorporación de cubierta aterrizada en los conductores de fase y neutro. 58

7.1. Tiras típicas y recomendadas de interconexión. Imagen extraída de norma IEC 61000-5-2 [9]. 61
7.2. Comparación entre configuraciones de interconexión de bandejas conductoras y su impacto en la impedancia del sistema. Imágenes extraídas de la literatura referenciada [6]. 62
7.3. Placas de aluminio implementadas en el generador de impulsos HAEFELY 400 kV/600 J. 63
7.4. Impulso de tensión aplicado y corriente medida durante ensayo experimental con placas de aluminio. 64
7.5. Comparación de sobretensiones transitorias medidas en el tablero TDF-2 con y sin implementación de placas de aluminio. 64
7.6. Sistema de placas de aluminio propuesto para generador de impulsos de tensión Haefely 400 kV / 600 J, vista superior. Elaboración propia. 65
7.7. Sistema de placas de aluminio propuesto para generador de impulsos de tensión Haefely 900 kV / 18 kJ, vista superior. Elaboración propia. 65
7.8. Canalización subterránea en PVC Conduit empleada en tableros del laboratorio de alta tensión. 66
7.9. Esquema simplificado de la reconfiguración propuesta para las canalizaciones eléctricas del laboratorio de alta tensión. Elaboración propia. 66
7.10. Funcionamiento básico del filtro pasivo. Imagen extraída de la literatura referenciada [6]. 67
7.11. Espectro de amplitud en frecuencia de la máxima sobretensión registrada en el tablero TDF-2. 68
7.12. Composición del material frente al rango de frecuencias cubierto. Esquema extraído de la literatura referenciada [10]. 69
7.13. Principales geometrías de ferritas empleadas en aplicaciones de compatibilidad electromagnética. Imagen extraída de literatura referenciada [11]. . . . 69
7.14. Transformador de aislamiento de 2 kVA utilizado para prueba experimental. 70
7.15. Comparación entre la tensión registrada en los devanados primario y secundario del transformador de aislamiento durante ensayo de impulso. 70
7.16. Configuración simplificada propuesta para alimentación de cargas sensibles en laboratorio de alta tensión. Elaboración propia. 71

A.1. Sistema de puesta a tierra del laboratorio de alta tensión de la UTFSM, Campus Casa Central, Valparaíso. Elaboración propia. 76

D.1. Esquema de simulación en ATPDraw para prueba con ruptura dieléctrica. Elaboración propia. 79
D.2. Esquema de simulación en ATPDraw para prueba sin ruptura dieléctrica. Elaboración propia. 79

F.1. Diseño general del sistema de placas de aluminio para el generador de impulsos de tensión Haefely 400 kV / 600 J. 82
F.2. Diseño general del sistema de placas de aluminio para el generador de impulsos de tensión Haefely 900 kV / 18 kJ. 83

Índice de Tablas

2.1. Principales fenómenos que causan perturbaciones electromagnéticas según la clasificación de la IEC. Extraído de la norma IEC 61000-2-5:2017 [12]. . . 15

3.1. Parámetros eléctricos representativos de las configuraciones A, B y C del generador de impulsos HAEFELY 400 kV / 600 J. 19
3.2. Parámetros eléctricos representativos de las configuraciones A, B y C del generador de impulsos HAEFELY 900 kV / 18 kJ. 19

4.1. Resultados de resistividad del suelo obtenidos mediante mediciones realizadas con arreglo Wenner en la cancha deportiva de la UTFSM. 22
4.2. Valores obtenidos para la medición de resistencia del sistema de puesta a tierra del laboratorio de alta tensión de la UTFSM. 24
4.3. Resumen de las mediciones de continuidad efectuadas en las cámaras del sistema de puesta a tierra del laboratorio de alta tensión de la UTFSM mediante el método de cuatro conductores con inversión de polaridad. . . . 26
4.4. Especificaciones técnicas del trasformador de corriente de banca ancha tipo Pearson, modelo 150 [13]. 30
4.5. Especificaciones técnicas de la sonda de alta tensión Tektronix P6015A [14]. 30

5.1. Principales variables físicas requeridas para la obtención de los parámetros concentrados del modelo para conductor horizontal. 41
5.2. Resumen de parámetros concentrados requeridos por el modelo para conductor horizontal. 41

6.1. Resumen de las mediciones de tensión Fase–Neutro realizadas para la evaluación de sobretensiones transitorias en los tableros TDF-2 y TDF-7. . . . 51

Resumen

Los ensayos de impulso realizados en laboratorios de alta tensión pueden generar perturbaciones electromagnéticas capaces de propagarse a través de los sistemas de puesta a tierra y de las instalaciones eléctricas, afectando el funcionamiento de equipos electrónicos sensibles. En este trabajo se evalúa la interferencia electromagnética presente en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Técnica Federico Santa María mediante una metodología basada en mediciones experimentales y simulaciones computacionales.

La investigación comprende la caracterización del sistema de puesta a tierra mediante mediciones de resistencia, continuidad, impedancia y potenciales transitorios, el análisis de las sobretensiones presentes en la red de baja tensión durante los ensayos de impulso y la implementación de modelos transitorios en ATPDraw para contrastar los resultados experimentales e identificar los mecanismos de propagación involucrados.

Con base en el análisis realizado, se proponen y evalúan distintas medidas de mitigación orientadas a reducir la interferencia electromagnética sobre equipos sensibles. Los resultados obtenidos permiten caracterizar el comportamiento transitorio del laboratorio y proporcionan criterios técnicos para el diseño e implementación de soluciones de mitigación en instalaciones sometidas a ensayos de impulso.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Los sistemas de puesta a tierra cumplen un rol fundamental en la protección de personas y equipos eléctricos. Su implementación es obligatoria tanto en instalaciones de baja como de alta tensión, y su diseño debe realizarse conforme a las normativas vigentes.

Un sistema de puesta a tierra confiable se caracteriza por presentar una baja resistencia en régimen permanente y un incremento de potencial moderado ante eventos de alta frecuencia. Por ello, su diseño debe considerar el tipo de instalación eléctrica donde será implementado, ya que distintos entornos pueden requerir criterios adicionales para asegurar un comportamiento satisfactorio en un amplio rango de frecuencias.

En particular, los laboratorios de pruebas de alta tensión presentan exigencias adicionales respecto de los sistemas convencionales. Entre los aspectos más relevantes se encuentran la compatibilidad electromagnética con equipos sensibles, el manejo de corrientes disruptivas y la respuesta frente a transitorios de alta frecuencia generados durante ensayos de impulso.

Este tipo de ensayos representa un desafío importante para los sistemas de puesta a tierra. Si bien en condiciones normales estos sistemas pueden comportarse con una impedancia predominantemente resistiva, frente a corrientes de impulso o a elevados gradientes de tensión pueden exhibir un comportamiento inductivo significativo. Esto puede provocar elevaciones peligrosas de potencial cerca del punto de inyección, reduciendo la efectividad del sistema para disipar energía y favoreciendo la aparición de tensiones inducidas en canalizaciones metálicas y equipos cercanos.

La presente memoria surge a partir del análisis de una serie de perturbaciones que han afectado a equipos electrónicos sensibles en el laboratorio de alta tensión y sus oficinas adyacentes en la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM), Valparaíso. En la cual, durante la realización de ensayos de impulso se han registrado interferencias en la red eléctrica del recinto y sobretensiones que han provocado daños significativos en algunos equipos electrónicos.

La motivación principal de este estudio es identificar y cuantificar las perturbaciones generadas durante ensayos de impulso de alta tensión, con el objetivo de proponer medidas de mitigación efectivas. Para ello, se recurre a bibliografía especializada y al análisis experimental del sistema de puesta a tierra del laboratorio, con la finalidad de mejorar la compatibilidad electromagnética entre los distintos equipos y sistemas presentes en el laboratorio de alta tensión de la universidad.

1.2. Objetivo general

El objetivo general de la presente memoria es evaluar la interferencia electromagnética que afecta a equipos sensibles en el laboratorio de Alta Tensión de la UTFSM durante las pruebas de impulso, y proponer medidas de mitigación.

1.3. Objetivos específicos

Con el fin de abordar el problema planteado y dar cumplimiento al objetivo general de esta memoria, se definen los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar el estado actual del sistema de puesta a tierra del laboratorio de alta tensión de la UTFSM, mediante mediciones normadas de resistencia e impedancia de puesta a tierra, continuidad y potenciales transitorios.
- Comparar los resultados experimentales en la malla de puesta a tierra del laboratorio, con los resultados de simulaciones computacionales en régimen transitorio.
- Determinar mediante mediciones experimentales y simulaciones computacionales, la magnitud y forma de las sobretensiones que aparecen en la instalación eléctrica de baja tensión durante los ensayos de impulso, con el fin de identificar riesgos en equipos sensibles conectados a la red.
- Identificar y especificar, con base en la literatura, posibles acciones de mejora que contribuyan a mitigar las perturbaciones electromagnéticas y permitan el funcionamiento adecuado de los equipos sensibles en la instalación eléctrica.

1.4. Alcance del estudio

La presente memoria surge a partir de una problemática actual que afecta al laboratorio de alta tensión de la UTFSM, asociada a perturbaciones electromagnéticas observadas durante la realización de ensayos de impulso. Si bien existe una fuente clara de perturbación, los mecanismos de propagación e interacción involucrados corresponden a un fenómeno complejo, influenciado por múltiples factores eléctricos y electromagnéticos.

En este contexto, el presente estudio no pretende resolver completamente la problemática ni establecer un diagnóstico absoluto de todos los mecanismos involucrados. En cambio, el enfoque de esta investigación se centra en el análisis experimental y computacional del fenómeno, abordándolo desde la perspectiva de la compatibilidad electromagnética.

De esta manera, el estudio busca caracterizar y cuantificar las perturbaciones, contrastando los resultados experimentales con simulaciones computacionales y antecedentes bibliográficos especializados. Con la finalidad de proponer medidas de mitigación y buenas prácticas orientadas a mejorar el desempeño general de la instalación frente a eventos transitorios.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Ensayos de impulso en alta tensión

2.1.1. Fundamentos

Los ensayos de impulso en alta tensión permiten evaluar la capacidad de aislamiento de equipos eléctricos frente a sobretensiones rápidas y de gran magnitud.
La norma IEC 60060-1 [1] establece los requerimientos y definiciones generales para este tipo de ensayos, definiendo el impulso de tensión como una tensión transitoria aperiódica aplicada intencionalmente. Cuya característica principal consiste en que su valor aumenta rápidamente hasta un valor máximo, para luego decaer lentamente hasta cero.

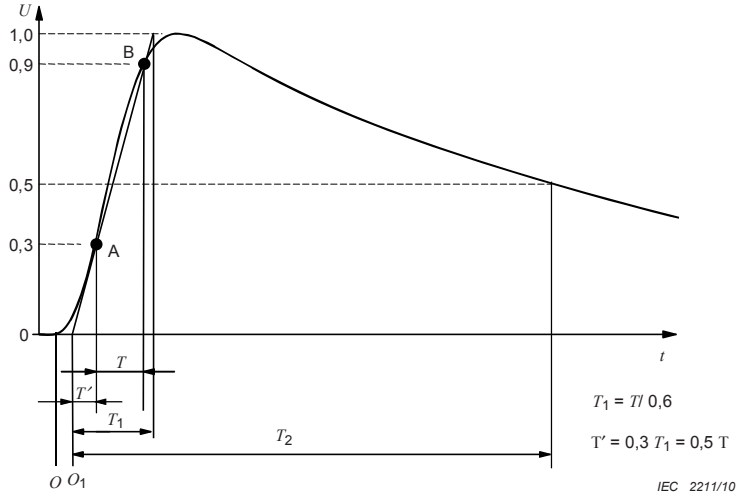


Figura 2.1: Parámetros temporales del impulso de tensión. Imagen extraída de la literatura referenciada [1].

La Figura 2.1 presenta los principales parámetros temporales que caracterizan un impulso de tensión, los cuales son definidos a continuación [1]:

- T_1: tiempo de frente, se define como 1,67 veces el intervalo T entre los instantes en que el impulso alcanza el 30 % y el 90 % de su valor máximo en la curva de tensión de prueba.
- O_1: punto de origen virtual que se presenta como el instante anterior al expuesto en el punto A, en un intervalo de tiempo igual a $0{,}3T_1$. Para registros con escalas de

tiempo lineales, O_1 corresponde a la intersección de una línea recta trazada a través de los puntos de referencia A y B con el eje de tiempo de la curva.

- T_2: tiempo de cola, corresponde al intervalo de tiempo entre el origen virtual O_1 y el instante en que la curva de tensión de prueba decrece hasta el 50 % de su valor máximo.

La tensión de impulso tipo rayo estándar, se define como un impulso con un tiempo de frente T_1 de 1,2 μs y un tiempo de cola T_2 de 50 μs, por lo que suele referenciarse como impulso 1,2/50. Además, en ensayos normalizados, la norma IEC 60060-1 [1] establece tolerancias de prueba de ±3 % para el valor máximo, ±30 % para el tiempo de frente y ±20 % para el tiempo de cola.

2.1.2. Generadores de impulso

El generador de impulsos de una etapa corresponde a la configuración más básica utilizada para la generación de impulsos de tensión. Este tipo de circuito permite obtener formas de onda normalizadas mediante la descarga controlada de energía almacenada en un condensador, utilizando una red de conformación RC y un *spark gap* o descargador de tensión (interruptor dependiente de la tensión), como se observa en la Figura 2.2 [2].

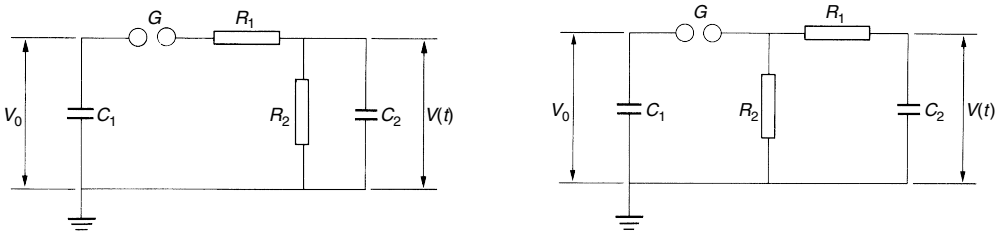


Figura 2.2: Generador de impulsos de una etapa en dos configuraciones equivalentes, diferenciadas por la disposición de las resistencias de frente y cola: (a) y (b). C_1: condensador principal de carga. C_2: capacitancia de descarga. R_1: resistencia de frente o de amortiguamiento. R_2: resistencia de descarga. Imagen extraída de la literatura referenciada [2].

El principio de funcionamiento se basa en la carga del condensador principal C_1 mediante una fuente de corriente continua hasta alcanzar la tensión de ruptura del descargador G. Una vez producido el disparo, la energía almacenada en C_1 se descarga a través de la red formada por R_1 y R_2, la cual determina principalmente la forma de la onda de salida. En particular, la resistencia R_1 influye en el tiempo de frente del impulso, mientras que R_2 controla el tiempo de cola. La capacitancia C_2 representa la carga del ensayo, incluyendo el sistema bajo prueba y los distintos elementos conectados en paralelo, tales como dispositivos de medición, entre otros.

Si bien el generador de una etapa constituye la configuración más básica, en la práctica existen generadores de múltiples etapas que permiten alcanzar niveles de tensión más elevados. Su principio de funcionamiento es análogo, con la diferencia de que emplean una disposición en cascada de condensadores que se cargan en paralelo y se descargan en serie, lo que permite incrementar la energía almacenada y la amplitud del impulso de salida [2].

2.1.3. Modelo matemático del impulso de tensión

Dado que el impulso de tensión corresponde a una forma de onda en particular, es necesario disponer de un modelo matemático que permita representarlo adecuadamente en entornos de simulación transitoria. Una de las expresiones más utilizadas para este propósito es la función de Heidler [15] [16], originalmente propuesta para modelar corrientes de rayo [17]. No obstante, debido a su capacidad para reproducir de manera independiente el frente y la cola de una onda impulsiva mediante una combinación de funciones racionales y exponenciales, también resulta adecuada para representar impulsos de tensión.

Desde luego, considerando un impulso de tensión de valor máximo V_m, un exponente entero n que controla la pendiente del frente (que por lo general varía entre 2 y 10) y los parámetros temporales τ_1 y τ_2, asociados al tiempo de frente y al tiempo de cola respectivamente, la función de Heidler [3] [16] se expresa como:

$$v(t) = \frac{V_m}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} e^{-t/\tau_2} \tag{2.1}$$

$$\eta = e^{\left(-(\tau_1/\tau_2)(n\tau_2/\tau_1)^{(1/n)}\right)} \tag{2.2}$$

donde η corresponde al factor de corrección [18] que garantiza que el valor máximo de la función sea cercano a V_m.

2.1.4. Efectos electromagnéticos asociados a los ensayos de impulso

Los efectos electromagnéticos asociado a este tipo de ensayos pueden abordarse mediante una analogía con los fenómenos producidos por descargas tipo rayo, debido a las similitudes existentes entre ambos transitorios.

En estos eventos, corrientes de elevada magnitud se inyectan en el sistema de puesta a tierra para su disipación en el suelo. Bajo condiciones impulsivas, la respuesta del sistema puede diferir significativamente respecto del comportamiento en régimen de baja frecuencia, debido a la mayor influencia de efectos inductivos y a posibles fenómenos no lineales asociados al suelo bajo altas corrientes [19].
Estas condiciones pueden generar tensiones inducidas en conductores cercanos, las cuales dependen tanto del valor máximo de la corriente como de su derivada temporal [20].

Por ello, los ensayos de impulso requieren considerar medidas destinadas a garantizar la seguridad de las personas y el correcto funcionamiento de equipos sensibles, debido a la presencia de interferencias electromagnéticas durante su ejecución. La norma IEEE Std 4-2013 [21] indica que este tipo de interferencia puede mitigarse mediante el uso de apantallamientos adecuados, como jaulas de Faraday, así como mediante filtros o transformadores de aislamiento con baja capacitancia entre devanados.

2.2. Sistemas de puesta a tierra

2.2.1. Fundamentos

Un sistema de puesta a tierra se define como el conjunto de elementos conductores interconectados que permiten establecer una conexión eléctrica con el suelo, proporcionando un camino de retorno para corrientes de falla, descargas atmosféricas y otros fenómenos transitorios, además de mantener una referencia de potencial segura para personas y equipos [4].

Los sistemas de puesta a tierra en instalaciones eléctricas pueden clasificarse en tres categorías según su función [19]: puesta a tierra de servicio, asociada a la conexión del neutro de los sistemas de potencia; puesta a tierra de protección, correspondiente a la conexión de las masas de los equipos; y puesta a tierra de protección contra rayos.

El principal parámetro utilizado para caracterizar estos sistemas es la resistencia de puesta a tierra, definida como la relación entre la tensión del sistema respecto a un punto de referencia remoto de potencial cero y la corriente inyectada al suelo. Cuando la corriente inyectada corresponde a frecuencia industrial, este parámetro se denomina resistencia de puesta a tierra. En cambio, cuando la excitación corresponde a una corriente impulsiva, como una corriente de rayo, se define la impedancia de puesta a tierra por impulso, la cual presenta un comportamiento transitorio dependiente del tiempo [19].

2.2.2. Modelado de sistemas de puesta a tierra

Los electrodos son el elemento principal de cualquier sistema de puesta a tierra. Al estar en contacto directo con el suelo otorgan un camino de baja impedancia para la circulación de corrientes de falla o fuga hacia tierra. A continuación, se presenta un modelo circuital que permite representar electrodos horizontales a través de parámetros concentrados.

2.2.2.a. Modelo para conductores horizontales bajo condiciones transitorias

Los conductores horizontales son usados con frecuencia como electrodos de puesta a tierra. Su implementación suele generarse por medio de conductores retorcidos (cables) o cintas de cobre de alta conductividad. Siendo esta última la geometría más conveniente a usar, debido a un mejor comportamiento a altas frecuencias [22].

Estos conductores pueden ser representados mediante una combinación RLC, orientado como un modelo de línea de transmisión Π [23] [24]. Tal como se presenta en la Figura 2.3.

La resistencia longitudinal R_{cond} de cualquier segmento puede calcularse usando la Eq. (2.3). Mientras que la inductancia propia L_{cond}, a través de la Eq. (2.4). En conjunto, simulan la impedancia al flujo de corriente en la malla [3].
Las ramas en paralelo de los extremos se estructuran en base a la resistencia transversal R_t y la capacitancia a tierra C_{cond}. Ambas representan la corriente que fluye hacia el suelo y pueden calcularse por medio de la Eq. (2.8) y Eq. (2.6) respectivamente.
La resistencia transversal R_t debe multiplicarse por el coeficiente de impulso del conductor horizontal α_c para considerar la ionización del suelo, el que puede ser calculado por medio de la Eq. (2.5)[1] .

[1]En la ecuación, I_m corresponde a la magnitud de la corriente máxima de impulso, expresada en kA.

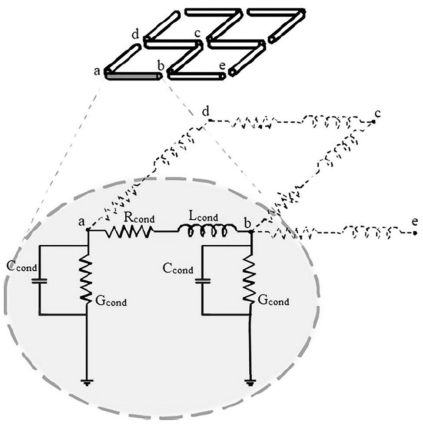


Figura 2.3: Modelo Π de parámetros concentrados para conductor horizontal. Esquema extraído de la literatura referenciada [3].

Donde:

R_{cond}	:	resistencia longitudinal de cualquier segmento (Ω).
L_{cond}	:	inductancia propia de cualquier segmento del conductor (H).
C_{cond}	:	capacitancia del segmento del conductor respecto a tierra (F).
G_{cond}	:	conductancia del conductor respecto a tierra (S).
R_t	:	resistencia transversal del segmento del conductor respecto a tierra (Ω).
d_c	:	diámetro del segmento del conductor (m).
ℓ	:	longitud del segmento del conductor (m).
ρ_{cu}	:	resistividad del material conductor (Ωm).
h	:	profundidad de enterramiento de la malla (m).
ρ	:	resistividad del suelo (Ωm).
α_c	:	coeficiente de impulso para conductor horizontal.
I_m	:	valor máximo de la corriente de impulso (kA).
ϵ_r	:	Permitividad relativa del suelo.

$$R_{cond} = \rho_{cu}\frac{4\ell}{\pi d_c^2} \tag{2.3}$$

$$L_{cond} = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi}\left[ln\left(\frac{2\ell}{\sqrt{d_c h}}\right) - 1\right] \tag{2.4}$$

$$\alpha_c = 1{,}62\rho^{-0,4}(5{,}0 + \sqrt{\ell})[0{,}79 - e^{(-2,3I_m^{-0,2})}] \tag{2.5}$$

$$C_{cond} = \pi\varepsilon_0\varepsilon_r\ell\left[ln\left(\frac{2\ell}{\sqrt{d_c h}}\right) - 1\right]^{-1} \tag{2.6}$$

$$G_{cond} = \frac{\pi\ell}{\rho}\left[ln\left(\frac{2\ell}{\sqrt{d_c h}}\right) - 1\right]^{-1} \tag{2.7}$$

$$R_t = \frac{1}{G_{cond}} \tag{2.8}$$

2.2.3. Efectos de las corrientes impulsivas

La impedancia de puesta a tierra puede exhibir un comportamiento inductivo ante corrientes impulsivas con un elevado contenido de componentes de alta frecuencia. Este fenómeno es de especial relevancia, ya que la inductancia del sistema influye directamente en la elevación transitoria del potencial de tierra [5].

Cuando una corriente impulsiva es inyectada en un sistema de puesta a tierra, la onda electromagnética asociada se propaga a lo largo de los electrodos, dando origen principalmente a dos fenómenos [25]: la atenuación y la distorsión de la forma de onda. La atenuación corresponde a la disminución progresiva de la amplitud de la corriente durante su propagación, efecto que depende, entre otros factores, del contenido espectral de la señal y de la conductividad del terreno. Por su parte, la distorsión consiste en la modificación de la forma de onda, originada por las diferentes velocidades de propagación de sus componentes espectrales.

En consecuencia, la respuesta transitoria del sistema de puesta a tierra difiere significativamente de su comportamiento en régimen permanente. La reducción de la componente inductiva de la impedancia favorece una propagación más uniforme de la onda impulsiva, contribuyendo a limitar la elevación transitoria del potencial de tierra y a mejorar el desempeño del sistema frente a sobretensiones impulsivas [25].

2.3. Técnicas de medición en sistemas de puesta a tierra

La correcta caracterización de los sistemas de puesta a tierra resulta fundamental para garantizar la seguridad de las personas y el adecuado funcionamiento de los equipos eléctricos. Por ello, se han desarrollado distintas técnicas destinadas a evaluar parámetros críticos del sistema, tales como la resistencia, la impedancia y la equipotencialidad. A continuación, se describen las principales características de estas técnicas de medición.

2.3.1. Medición en baja frecuencia

2.3.1.a. Medición de resistividad

La estimación de la resistividad del suelo mediante una simple clasificación del terreno solo permite obtener una aproximación inicial de este parámetro, por ello las mediciones reales resultan imprescindibles [4]. En este contexto, el método de Wenner se establece como la técnica más comúnmente utilizada para su determinación.
Este método consiste en la instalación de cuatro sondas en el terreno, dispuestas a lo largo de una línea recta y separadas uniformemente una distancia a. Las sondas se introducen a una profundidad b, la cual se considera pequeña en comparación con la separación entre electrodos.

La diferencia de potencial entre los dos electrodos interiores (electrodos de potencial) se mide y, junto con la corriente inyectada entre los electrodos exteriores (electrodos de corriente), permite determinar una resistencia equivalente R [4]. Si $b \ll a$, la resistividad aparente del suelo ρ_a puede obtenerse mediante la expresión simplificada [4]:

$$\rho_a = 2\pi a R \tag{2.9}$$

2.3.1.b. Medición de resistencia del sistema de puesta a tierra

El método más empleado para la medición de resistencia de puesta a tierra es el método de caída de potencial. Este consiste en la determinación de la resistencia respecto de un electrodo de referencia remoto. El que se define como un punto ubicado a una distancia suficientemente grande del sistema de puesta a tierra, donde la densidad de corriente en el suelo se considera despreciable [4].

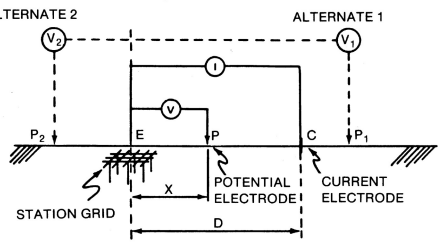


Figura 2.4: Método de caída de potencial para medición de resistencia de puesta tierra. Esquema extraído de la norma IEEE Std 80 [4].

La Figura 2.4 presenta la implementación básica de este método, en el cual se inyecta una corriente entre la malla de puesta a tierra (E) y un electrodo de corriente (C) ubicado a una distancia suficientemente alejada. La diferencia de potencial se mide mediante un electrodo auxiliar (P), desplazado entre ambos electrodos para determinar la resistencia de puesta a tierra, la cual se obtiene en la zona de meseta correspondiente a la regla del 62 % [4], donde la influencia mutua entre los electrodos de corriente y potencial es mínima.

2.3.1.c. Prueba de continuidad eléctrica en el sistema de puesta a tierra

El propósito de la prueba de continuidad es verificar la integridad eléctrica del sistema de puesta a tierra, evaluando la continuidad entre sus distintos elementos mediante la medición de la resistencia de sus conexiones. Dado que este ensayo no se encuentra normalizado, habitualmente se emplea la configuración de medición de cuatro conductores, presentada en la Figura 2.5 [26].

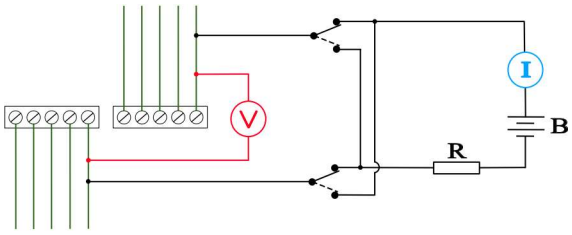


Figura 2.5: Prueba de continuidad en el sistema de puesta a tierra por medio del método de cuatro conductores con inversión de polaridad. Elaboración propia.

En esta configuración, se inyecta corriente continua entre un punto de referencia y el punto de medición, mientras se mide simultáneamente la diferencia de potencial entre ambos puntos. A partir de estas mediciones se calcula la resistencia eléctrica correspondiente. Posteriormente, la medición debe repetirse invirtiendo la polaridad de la fuente,

con el fin de compensar el efecto diodo que pueden presentar las conexiones oxidadas, cuya resistencia aparente depende de la polaridad de la tensión aplicada [26]. Como criterio conservador, se considera el mayor valor de resistencia obtenido. Si bien no existe un estándar que establezca valores de aceptación para este ensayo, la literatura señala que, como regla general, la resistencia de continuidad en un sistema de puesta a tierra debería encontrarse en el rango de los miliohmios [26].

2.3.2. Medición en alta frecuencia

2.3.2.a. Medición de impedancia del sistema puesta a tierra

La medición de la impedancia del sistema de puesta a tierra es fundamental para caracterizar su respuesta dinámica en alta frecuencia. En estas condiciones, además de una baja resistencia a frecuencia industrial, el sistema debe presentar una baja impedancia [5].

Al igual que otros ensayos descritos anteriormente, esta prueba no cuenta con una configuración experimental estandarizada. Por esta razón, se adopta como referencia la metodología propuesta en la literatura. En este contexto, la Figura 2.6 presenta un esquema básico de medición empleado [5].

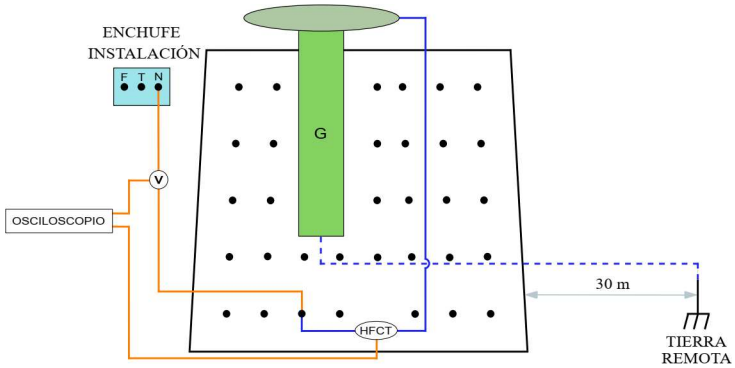


Figura 2.6: Esquema de conexionado para la medición de impedancia en el sistema de puesta a tierra (G: Generador, HFCT: Transformador de corriente de alta frecuencia). Adaptado de lo expuesto en la literatura [5].

En esta configuración, se inyecta una corriente impulsiva mediante un generador de impulsos, cuya magnitud es medida utilizando un transformador de corriente de alta frecuencia (HFCT). El conductor de retorno del generador se ubica a una distancia aproximada de 30 m del sistema de puesta a tierra, con el objetivo de establecer una referencia de tierra remota. La tensión se mide en el punto de inyección respecto al neutro de un tomacorriente de la instalación, utilizado como referencia debido a su conexión con el punto neutro del tablero de distribución principal. Posteriormente, se aplica la transformada rápida de Fourier (FFT) a las señales de corriente y tensión, obteniéndose la impedancia del sistema como el cociente entre sus respectivos espectros en función de la frecuencia [5].

2.3.2.b. Medición de potenciales transitorios en el sistema de puesta a tierra

Uno de los principales objetivos de diseño de un sistema de puesta a tierra consiste en garantizar que las elevaciones de potencial originadas por corrientes de alta frecuencia, par-

ticularmente aquellas de naturaleza impulsiva, permanezcan dentro de niveles seguros. En consecuencia, resulta necesario identificar los puntos del sistema que pueden experimentar las mayores elevaciones de potencial durante este tipo de eventos.

Actualmente, no existe un procedimiento normalizado que establezca una metodología única para evaluar el comportamiento transitorio de un sistema de puesta a tierra mediante mediciones de tensión. Por esta razón, la mayoría de los estudios experimentales emplean configuraciones propuestas en la literatura. La Figura 2.7 presenta un esquema básico de medición, basado en las metodologías reportadas en [5], donde se inyecta una corriente impulsiva y se mide la diferencia de potencial entre el punto de prueba (P) y un nodo de referencia (R). Cuyo propósito es determinar la respuesta transitoria de los distintos puntos accesibles del sistema de puesta a tierra, permitiendo identificar aquellos que presentan mayores elevaciones de potencial y que, por tanto, podrían representar un mayor riesgo frente a perturbaciones impulsivas [5].

Debido a que el punto de inyección y el punto de retorno de la corriente se encuentran ubicados sobre la misma malla de puesta a tierra y separados por una distancia reducida, la mayor parte de la corriente circula entre ambos puntos sin dispersarse completamente hacia el terreno. En consecuencia, las tensiones registradas en los distintos puntos de la instalación corresponden principalmente a diferencias de potencial transitorias originadas por la circulación de la corriente a través de la propia estructura conductora de la malla, más que a una elevación de potencial referida a una tierra remota [5].

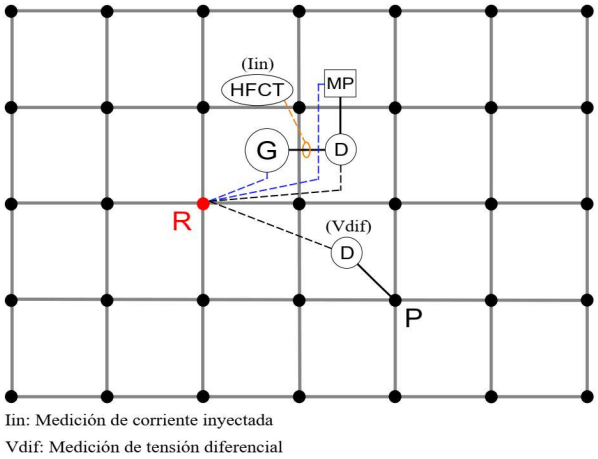


Figura 2.7: Esquema de conexionado para la medición de tensiones transitorias (G: Generador de impulsos, D: Divisor de tensión, MP: Muestra de prueba, HFCT: Transformador de corriente de alta frecuencia, R: Nodo de referencia, P: Nodo de prueba). Elaboración propia.

Dado que la amplitud de la corriente inyectada puede variar entre ensayos debido a la dispersión estadística inherente al funcionamiento del generador de impulsos, resulta conveniente normalizar los resultados mediante parámetros obtenidos de la relación entre la tensión y la corriente [5]. Así, con el objetivo de caracterizar el desempeño impulsivo de los sistemas de puesta a tierra, se han propuesto diversos parámetros basados en relaciones entre valores característicos de tensión y corriente medidos durante el ensayo. El más

utilizado corresponde a la denominada **impedancia de impulso** [27], definida como:

$$Z_1 = \frac{V_p}{I_p} \tag{2.10}$$

donde V_p corresponde a la tensión máxima registrada e I_p a la corriente máxima inyectada. Este parámetro permite estimar la elevación de potencial de tierra (*Ground Potential Rise*, GPR) producida por una corriente impulsiva de magnitud determinada.

Además, también puede considerarse el parámetro:

$$Z_3 = \frac{V_p}{i_(t_{V_p})} \tag{2.11}$$

donde $i(t_{V_p})$ corresponde al valor de la corriente en el instante en que se registra la tensión máxima. Para electrodos con un comportamiento altamente inductivo, este parámetro suele presentar un valor más elevado en comparación con Z_1, siendo generalmente superior a la resistencia medida a baja frecuencia [27].

Estos parámetros pueden verse afectados por diversos factores, tales como: la longitud del electrodo, el tiempo de frente de la corriente impulsiva y la configuración experimental empleada [27]. En consecuencia, la evaluación del desempeño impulsivo de un sistema de puesta a tierra puede variar dependiendo del parámetro seleccionado para el análisis, aspecto que debe considerarse al interpretar los resultados obtenidos [27].

2.4. Compatibilidad electromagnética

2.4.1. Fundamentos

En entornos de investigación es frecuente que múltiples equipos operen simultáneamente y en proximidad. Bajo estas condiciones, procedimientos experimentales que involucran altas tensiones, impulsos o maniobras transitorias pueden generar intensos campos electromagnéticos, capaces de acoplarse a otros sistemas y afectar el funcionamiento de los equipos presentes en la instalación. Como consecuencia, pueden producirse fallas temporales, mal funcionamiento o incluso daño permanente en dispositivos electrónicos sensibles.

La compatibilidad electromagnética (EMC) se define como la "capacidad de un sistema electrónico para: (1) funcionar correctamente en su entorno electromagnético previsto y (2) no constituir una fuente de perturbación para dicho entorno electromagnético" [28].

La EMC comprende dos aspectos fundamentales: la emisión y la susceptibilidad. La emisión corresponde al potencial de un equipo para generar interferencias electromagnéticas, mientras que la susceptibilidad representa la capacidad de un dispositivo o circuito para responder a la energía electromagnética no deseada (ruido[2]). El concepto opuesto a la susceptibilidad es la inmunidad, la cual se define como la capacidad de un equipo para operar satisfactoriamente en un determinado entorno electromagnético sin experimentar degradación en su funcionamiento y con un margen de seguridad definido [28]. La Figura 2.8 presenta un esquema simplificado que ilustra la relación entre los principales niveles de perturbación asociados a la compatibilidad electromagnética.

[2]El **ruido** corresponde a cualquier señal eléctrica presente en un circuito distinta de la señal deseada, mientras que la **interferencia** es el efecto indeseado producido por dicho ruido. En la práctica, el ruido no puede eliminarse por completo, pero sí reducirse hasta un nivel que no genere interferencias [28].

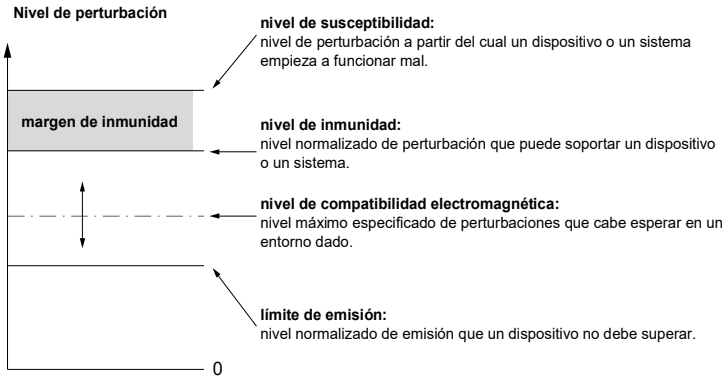


Figura 2.8: Relación entre niveles de perturbación, susceptibilidad, inmunidad y límites de emisión en el marco de la compatibilidad electromagnética. Esquema extraído de literatura referenciada [6].

Una perturbación electromagnética corresponde a cualquier fenómeno capaz de degradar el funcionamiento de un dispositivo, equipo o sistema [6]. Esta perturbación puede manifestarse como ruido electromagnético, una señal no deseada o una modificación del propio medio de propagación. Entre las perturbaciones electromagnéticas[3] más frecuentes se distinguen las perturbaciones de baja frecuencia (BF) y de alta frecuencia (AF).

Para analizar los fenómenos asociados a la compatibilidad electromagnética, es fundamental identificar los mecanismos mediante los cuales las perturbaciones se propagan y afectan a los dispositivos. Estos mecanismos se describen a continuación [6]:

1. Acoplamiento por conducción: La perturbación se transmite a través de los conductores eléctricos. En una conexión bifilar (dos conductores), la propagación considera:
   a) Modo diferencial: La corriente circula por uno de los conductores, atraviesa el dispositivo y retorna por el conductor de retorno.
   b) Modo común: La corriente se propaga por todos los conductores en el mismo sentido y retorna a través de las capacitancias parásitas, por lo que su trayectoria resulta difícil de identificar.
2. Acoplamiento por radiación: Las perturbaciones se propagan a través del medio ambiente (aire) y pueden clasificarse en:
   a) Acoplamiento capacitivo: Se produce debido a la capacitancia existente entre dos circuitos próximos. Una diferencia de potencial variable genera una corriente que circula entre ambos a través del medio aislante, dando lugar a la denominada capacitancia parásita[4].
   b) Acoplamiento inductivo: Se origina cuando una corriente variable genera un campo magnético que induce una tensión en un conductor cercano.

[3] Ciertos fenómenos transitorios, como los impulsos de alta tensión, presentan un comportamiento de banda ancha, abarcando componentes tanto de baja como de alta frecuencia.

[4] Las capacitancias parásitas son despreciables a 50 Hz, pero adquieren una relevancia significativa a alta frecuencia (AF), pudiendo provocar fallos en el funcionamiento de las instalaciones [6].

2.4.2. Fenómenos de calidad de energía

La calidad de energía se refiere a una "amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente en un momento determinado y en un punto específico del sistema eléctrico" [7]. Esta se encuentra estrechamente relacionada con el concepto de compatibilidad electromagnética (EMC), ya que ambos abordan la interacción entre los sistemas eléctricos y los equipos conectados a ellos. Mientras la EMC se enfoca en asegurar que los equipos operen correctamente en su entorno electromagnético, la calidad de energía se centra en la caracterización de dichas perturbaciones en términos de variaciones de tensión y corriente. En este contexto, la calidad de energía puede entenderse como una aplicación particular de la EMC en sistemas de potencia.

La norma IEC 61000-2-5 [12] clasifica los fenómenos electromagnéticos en varios grupos, tal como presenta la Tabla 2.1. Donde los términos de alta frecuencia y baja frecuencia no se definen en función de un rango específico, sino que están destinados a indicar la diferencia relativa en el contenido de frecuencia predominante de los fenómenos listados.

Grupo	Ejemplos
Fenómenos conducidos de baja frecuencia	Armónicos, Interarmónicos
	Sistemas de señalización (portadora por línea de potencia)
	Fluctuaciones de tensión
	Caídas de tensión e interrupciones
	Desequilibrio de tensión
	Variaciones en la frecuencia de potencia
	Tensiones inducidas de baja frecuencia
	Corriente continua en redes de corriente alterna
Fenómenos radiados de baja frecuencia	Campos mágnéticos
	Campos eléctricos
Fenómenos conducidos de alta frecuencia	Tensiones o corrientes inducidas de onda continua (CW)
	Transitorios unidireccionales
	Transitorios oscilatorios
Fenómenos radiados de alta frecuencia	Campos magnéticos
	Campos eléctricos
	Campos electromagnéticos
	Ondas continuas
	Transitorios

Tabla 2.1: Principales fenómenos que causan perturbaciones electromagnéticas según la clasificación de la IEC. Extraído de la norma IEC 61000-2-5:2017 [12].

Considerando la diversidad de fenómenos que pueden presentarse, el presente estudio se centra en el análisis de los transitorios. Los que en términos generales, se clasifican en dos categorías: impulsivos y oscilatorios. Un transitorio impulsivo se define como un cambio repentino en la tensión, la corriente o ambas, distinto de la frecuencia fundamental, cuya polaridad es predominantemente positiva o negativa [7]. Estos fenómenos suelen caracterizarse mediante su valor máximo, tiempo de subida y tiempo de decaimiento o duración.

Por otra parte, un transitorio oscilatorio corresponde a una tensión o corriente cuyo valor instantáneo cambia de polaridad repetidamente y, por lo general, decae dentro de

un ciclo de la frecuencia fundamental. Este tipo de perturbación, también conocida como *ringing*, se caracteriza por su magnitud, duración y contenido espectral, siendo la frecuencia predominante uno de sus parámetros más representativos [7].
Tanto los transitorios impulsivos como los oscilatorios pueden caracterizarse considerando o excluyendo la componente fundamental de la señal. Por ello, al reportar la magnitud de un transitorio, es importante indicar el criterio empleado [7].

La Figura 2.9 presenta ejemplos representativos de las principales formas de onda transitorias descritas en la literatura, permitiendo identificar sus características temporales y su comportamiento respecto de la onda sinusoidal nominal [7].

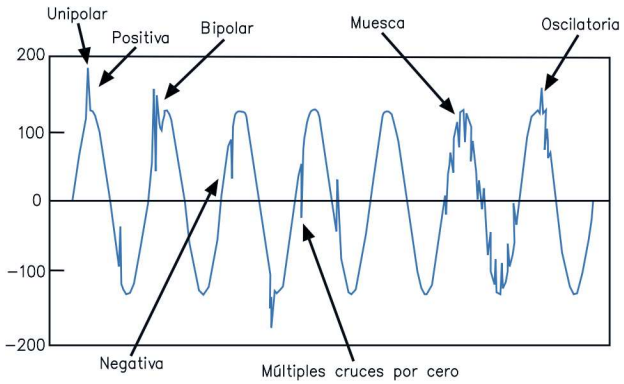


Figura 2.9: Características de las formas de onda asociadas a eventos transitorios. Elaboración propia, basada en lo descrito en la norma IEEE Std 1159 [7].

2.4.3. Eventos transitorios: sobretensiones

De acuerdo con la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución (NTCSD) en Chile [29], la sobretensión se define como "aumento temporal de la tensión eficaz en un punto del Sistema de Distribución por encima de un umbral inicial y durante un periodo de tiempo especificado". Esta norma determina en su Artículo 3–3 que las variaciones rápidas de tensión deben detectarse, medirse y registrarse de acuerdo a lo establecido en la norma IEC 61000-4-30 [30]. Tal que para el caso en específico de las sobretensiones, el umbral de detección corresponde al 110 % de la tensión nominal.

La versión mas reciente de la norma IEC 61000-4-30 [30] en su anexo informativo A.4 señala que los transitorios en circuitos de potencia se presentan con una amplia variedad de onda, amplitudes y duraciones. Lo que ocasiona que sea difícil describirlos mediante un conjunto simple de parámetros; sin embargo, la obtención de sus características distintivas permite clasificarlos en algunas formas de onda típicas.

2.4.3.a. Medición de tensiones transitorias

Para realizar mediciones confiables de transitorios, la frecuencia de muestreo debe ser, como mínimo, el doble de la máxima frecuencia presente en la señal, debiendo además utilizarse un filtro anti-aliasing (filtro pasa bajo) con características adecuadas. Asimismo, los transductores empleados deben dimensionarse de forma que la señal aproveche el rango dinámico del instrumento sin provocar saturación y posean una respuesta en frecuencia suficiente para reproducir fielmente el contenido espectral del transitorio. En particular,

para la medición de transitorios de alta frecuencia, la literatura recomienda el empleo de divisores capacitivos o puramente resistivos, ya que los transformadores de tensión convencionales y los transformadores de tensión capacitivos pueden presentar limitaciones en su respuesta en frecuencia [30].

Los resultados de una medición de transitorios dependen de la naturaleza del fenómeno y de los parámetros de adquisición seleccionados por el usuario, además de las características del instrumento empleado. Asimismo, el punto de medición depende del objetivo del ensayo. Cuando el interés principal es evaluar la solicitación del aislamiento, las mediciones suelen realizarse entre fase y tierra. En cambio, cuando se busca evaluar el posible daño en los equipos, las mediciones se realizan habitualmente entre fases o entre fase y neutro [30]. Esta puede realizarse mediante distintos algoritmos, entre ellos métodos comparativos, de envolvente, de ventana deslizante, basados en dv/dt o en el valor eficaz (RMS) [30].

2.4.3.b. Evaluación de tensiones transitorias

Una vez que el transitorio es detectado, este puede ser clasificado. Algunos de los métodos de clasificación incluyen [30]: el valor máximo de la tensión, el sobrepaso de tensión (overshoot[5]), la tasa de crecimiento (dv/dt) del frente de onda, parámetros de frecuencia, tiempo de duración (parámetro difícil de definir, debido al amortiguamiento, la irregularidad de las formas de onda, entre otros factores), el coeficiente de amortiguamiento, la frecuencia de ocurrencia, la energía y potencia, disponible o transferida, transitorios continuos (en cada ciclo) o de evento único (impredecibles).

2.4.4. Marco normativo de la compatibilidad electromagnética

La compatibilidad electromagnética (EMC) se encuentra regulada por un conjunto de estándares internacionales que establecen terminología, métodos de ensayo, técnicas de medición, límites de emisión y niveles de inmunidad, con el objetivo de asegurar la compatibilidad entre equipos eléctricos y electrónicos que operan en un mismo entorno electromagnético [31].

A nivel internacional, la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) desarrolla la serie de normas IEC 61000, la cual constituye el principal referente en materia de compatibilidad electromagnética. Esta serie se organiza en distintas partes según su ámbito de aplicación, entre las que destacan la Parte 4, correspondiente a las técnicas de prueba y medición, y la Parte 5, que establece directrices de instalación y medidas de mitigación [31].

Considerando el alcance del presente estudio, el análisis se centra principalmente en las normas IEC 61000-4 [30] e IEC 61000-5 [9]. La primera proporciona los procedimientos y criterios para la medición de perturbaciones electromagnéticas, mientras que la segunda entrega recomendaciones para el diseño e implementación de medidas de mitigación orientadas a mejorar el comportamiento electromagnético de las instalaciones.

Los estándares de la serie IEC 61000 constituyen la base normativa empleada en este trabajo para el análisis de las mediciones realizadas y el desarrollo de las estrategias de mitigación propuestas.

[5] El overshoot corresponde al valor máximo que excede el nivel esperado/estable de una señal, normalmente en el inicio de un transitorio.

Capítulo 3

Caracterización del fenómeno de interferencia en laboratorio de la UTFSM

El Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Técnica Federico Santa María, ubicado en la comuna de Valparaíso, posee una superficie aproximada de 130 m^2 y constituye el principal centro de experimentación del Departamento de Ingeniería Eléctrica.

Entre los distintos ensayos que se desarrollan en sus instalaciones destacan los ensayos de impulso en alta tensión, los cuales permiten realizar una amplia variedad de pruebas orientadas principalmente a la verificación del nivel de aislamiento de equipos y sistemas.

La presente memoria surge a partir de la observación de un problema reportado durante los últimos años por académicos del departamento, consistente en la aparición de interferencias en la red de baja tensión que alimenta las oficinas del laboratorio durante la ejecución de estos ensayos. Dichas interferencias se manifiestan principalmente en dispositivos electrónicos sensibles, tales como televisores. La Figura 3.1 muestra una vista general del Laboratorio de Alta Tensión.

Mediciones realizadas evidencian que la principal manifestación de estas interferencias corresponde a sobretensiones transitorias presentes en los enchufes de la red de baja tensión. Si bien estas perturbaciones no han generado efectos significativos durante períodos cortos de operación, su ocurrencia repetitiva y bajo elevados niveles de tensión ha provocado un deterioro progresivo en algunos equipos, llegando incluso a causar daños permanentes. Un ejemplo de ello corresponde a un televisor que resultó afectado durante la realización de ensayos de impulso. La Figura 3.2 presenta el aspecto físico del equipo.



Figura 3.1: Laboratorio de alta tensión de la UTFSM.



Figura 3.2: Televisor dañado debido a ensayos de impulso.

Actualmente, el laboratorio dispone de dos generadores de impulso con diferentes capacidades de tensión y energía. En particular, la Figura 3.3(a) muestra el generador de impulsos HAEFELY de 400 kV y 600 J, correspondiente al equipo de menor capacidad energética. Por su parte, la Figura 3.3(b) presenta el generador HAEFELY de 900 kV y 18 kJ, que constituye el equipo de mayor capacidad disponible en el laboratorio. Las características eléctricas principales de ambos generadores se presentan en la Tabla 3.1 y la Tabla 3.2, respectivamente.



(a) (b)

Figura 3.3: Generadores de impulso de tensión pertenecientes al laboratorio de alta tensión de la UTFSM. (a) Generador HAEFELY 400 kV y 600 J. (b) Generador HAEFELY 900 kV y 18 kJ.

Parámetro	**Configuración**		
	A	**B**	**C**
Tensión máxima	400 kV	200 kV	100 kV
Capacitancia de impulso	7.5 nF	15 nF	30 nF
Máxima energía contenida	600 J	300 J	150 J

Tabla 3.1: Parámetros eléctricos representativos de las configuraciones A, B y C del generador de impulsos HAEFELY 400 kV / 600 J.

Parámetro	**Configuración**		
	A	**B**	**C**
Tensión máxima de carga	900 kV	450 kV	225 kV
Capacitancia de impulso	45 nF	180 nF	720 nF
Inductancia	42 μH	21 μH	16 μH
Máxima energía contenida	18 kJ	18 kJ	18 kJ

Tabla 3.2: Parámetros eléctricos representativos de las configuraciones A, B y C del generador de impulsos HAEFELY 900 kV / 18 kJ.

Considerando los niveles de tensión y energía asociados a los generadores de impulso descritos, el Laboratorio de Alta Tensión constituye un entorno particularmente exigente desde el punto de vista de la compatibilidad electromagnética. En efecto, la operación de estos equipos genera transitorios impulsivos de elevada amplitud, asociados a un sistema

que, de acuerdo con la normativa chilena [32], se clasifica como de extra alta tensión al superar los 230 kV.

En este contexto, surge la necesidad de comprender los mecanismos responsables de las sobretensiones transitorias observadas en los circuitos de baja tensión del laboratorio durante la realización de ensayos de impulso. En particular, resulta de interés identificar los mecanismos de acoplamiento involucrados, evaluar su contribución al fenómeno observado y establecer posibles medidas de mitigación orientadas a reducir su impacto sobre los equipos electrónicos de la instalación. Por ello, la presente memoria desarrolla la metodología general de análisis presentada en la Figura 3.4.

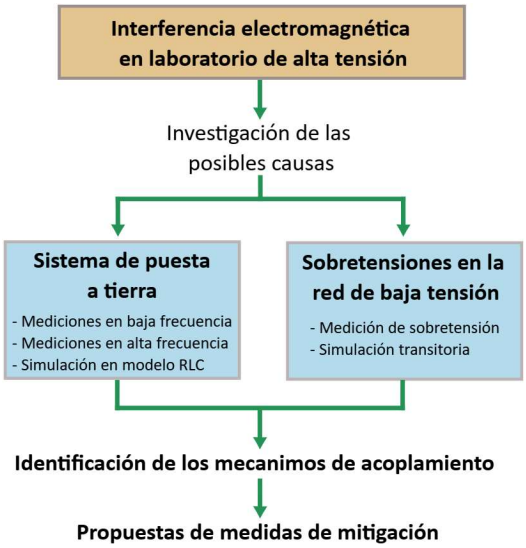


Figura 3.4: Metodología de análisis utilizada para identificar los mecanismos responsables de las interferencias electromagnéticas y sobretensiones observadas durante los ensayos de impulso en el Laboratorio de Alta Tensión de la UTFSM.

La metodología propuesta, fundamentada en el método científico, basa su análisis en dos hipótesis principales. En primer lugar, se plantea que el sistema de puesta a tierra podría presentar características o defectos que favorezcan elevaciones excesivas del potencial de tierra durante los ensayos de impulso, contribuyendo al problema de interferencia observado. En segundo lugar, se considera la hipótesis de que las perturbaciones generadas durante estos ensayos se acoplan a los circuitos de alimentación de baja tensión, produciendo sobretensiones capaces de afectar equipos electrónicos sensibles.

Para evaluar estas hipótesis, la presente memoria desarrolla una serie de análisis experimentales y simulaciones computacionales que permiten validar o descartar cada una de ellas. De esta manera, se busca identificar los mecanismos de acoplamiento predominantes responsables de las interferencias observadas y establecer criterios técnicos para su mitigación.

En consecuencia, las medidas de mitigación propuestas se orientan a reducir las sobretensiones transitorias, limitar el acoplamiento de perturbaciones provenientes de los ensayos de impulso y asegurar niveles adecuados de inmunidad electromagnética en los equipos conectados, buscando disminuir el riesgo de degradación prematura o daño permanente en dispositivos electrónicos sensibles.

Capítulo 4

Caracterización del sistema de puesta a tierra

El sistema de puesta a tierra cumple un rol fundamental en cualquier instalación eléctrica, ya que constituye el principal medio para la disipación de corrientes de falla y, particularmente en el caso analizado, de corrientes impulsivas generadas durante los ensayos de impulso de tensión.

En este contexto, uno de los objetivos planteados en esta memoria consiste en verificar el estado actual del sistema de puesta a tierra del laboratorio de alta tensión de la UTFSM. Lo anterior, con la finalidad de descartar posibles deterioros en el sistema, así como también identificar eventuales defectos o deficiencias que puedan contribuir a la problemática de interferencia electromagnética estudiada.

De esta manera, se presenta a continuación una caracterización detallada del sistema de puesta a tierra del laboratorio, considerando su comportamiento tanto en baja como en alta frecuencia. Para facilitar la comprensión de su configuración física, el plano del sistema se presenta en el Apéndice A.

4.1. Evaluación en baja frecuencia

4.1.1. Medición de resistividad

Con el objetivo de caracterizar el sistema de puesta a tierra actual a partir de parámetros representativos del terreno, se realiza la medición de resistividad eléctrica del suelo.

Inicialmente, se contempló realizar esta medición en sectores cercanos al laboratorio y, por consiguiente, próximos a la malla de puesta a tierra en estudio. Sin embargo, al efectuar las mediciones se observó que los valores obtenidos presentaban una dispersión considerable respecto de valores esperados para la resistividad del suelo del campus universitario. Lo que podría atribuirse a la influencia de elementos conductivos cercanos, tales como la propia malla de puesta a tierra, ductos, cañerías y estructuras metálicas, los cuales pueden alterar la distribución de corriente y potencial durante el proceso de medición [4].

De esta manera, la medición de resistividad se lleva a cabo durante el mes de Agosto, un día parcialmente soleado y posterior a días de lluvia costera en dependencias de la cancha universitaria. Con un contenido de humedad relativa en el aire cercano al 60 % y una temperatura ambiente en promedio de 20 $^{\circ}C$. Además, el terreno también presentaba un alto contenido de humedad, llegando a condiciones cercanas a barro en la superficie.

Debido a que la resistividad varía lateralmente y con respecto a la profundidad, en función de la estratificación del suelo [4], la medición de resistividad aparente se realiza mediante el método de Wenner, utilizando el telurómetro de la marca Megabras, modelo EM-4058 [8] y la disposición de electrodos presentada en la Figura 4.1. Considerando esta variabilidad espacial del terreno, se efectúan dos mediciones: una en dirección horizontal y otra en dirección vertical, con el propósito de obtener un valor representativo a partir del promedio entre ambas.

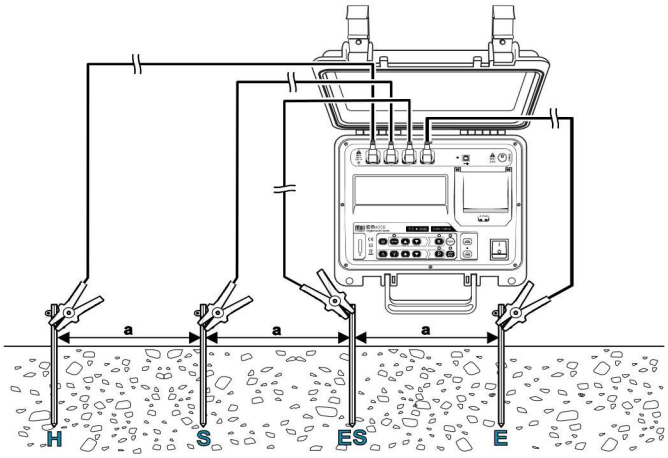


Figura 4.1: Configuración experimental utilizada para la medición de resistividad del suelo mediante el método de Wenner, utilizando el telurómetro Megabras EM-4058. Los terminales H y E corresponden a inyección de corriente, mientras que S y ES corresponden a medición de potencial. Imagen adaptada del manual del equipo EM-4058 [8].

A partir de las mediciones realizadas, los valores de resistividad aparente del suelo obtenidos en el recinto de la UTFSM se resumen en la Tabla 4.1.

Distancia a (m)	**Medición 1 ($\Omega \cdot$ m)**	**Medición 2 ($\Omega \cdot$ m)**	**Promedio ($\Omega \cdot$ m)**
1	51.6	50.3	51.0
2	48.5	40.2	44.4
3	47.7	44.7	46.2
4	48.0	43.2	45.6
5	50.0	45.0	47.5
6	51.7	45.7	48.7
7	53.7	48.8	51.3
8	55.4	51.3	53.4

Tabla 4.1: Resultados de resistividad del suelo obtenidos mediante mediciones realizadas con arreglo Wenner en la cancha deportiva de la UTFSM.

Los datos obtenidos son representados gráficamente en la Figura 4.2, donde se observa con mayor claridad la variación de la resistividad en función de la profundidad analizada.

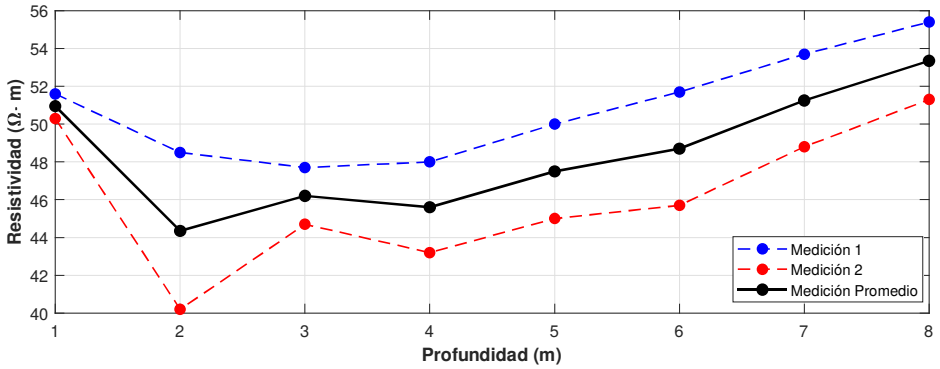


Figura 4.2: Representación gráfica de las mediciones de resistividad aparente del suelo y su valor promedio en la cancha deportiva de la UTFSM.

Los modelos de resistividad de suelo comúnmente utilizados corresponden al modelo de suelo uniforme y al modelo de suelo de dos capas [4]. Debido a que las mediciones realizadas presentan una variación moderada y que, para efectos de este estudio, se requiere principalmente un valor representativo de la resistividad del terreno, se opta por utilizar un modelo de suelo uniforme. En este contexto, se emplea la media aritmética de los valores de resistividad aparente medidos, obteniéndose una resistividad aproximada de 49 Ωm, tal como se presenta en la Eq. (4.1).

$$\rho_a = \bar{\rho} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\rho_i = 48{,}5\ \Omega m \approx 49\ \Omega m \tag{4.1}$$

Donde ρ_i corresponde a los valores de resistividad aparente obtenidos para distintos espaciamientos mediante el método de Wenner, mientras que N representa el número total de mediciones realizadas.

Como se puede observar, el valor de resistividad obtenido es relativamente bajo en comparación con otros tipos de suelo de mayor resistividad. Además, si bien la medición no fue realizada directamente en el terreno donde se emplaza el laboratorio de alta tensión, el resultado obtenido constituye un referente representativo de las características eléctricas del suelo presente en el campus universitario.

4.1.2. Medición de resistencia de puesta a tierra

Tal como se presentó en el Capítulo 2, la resistencia de puesta a tierra constituye el principal parámetro eléctrico para caracterizar un sistema de puesta a tierra, al menos en el rango de baja frecuencia. En este contexto, se detalla a continuación la medición de resistencia realizada a la malla del laboratorio de alta tensión.

La medición fue realizada en dependencias del patio de contaminación del laboratorio durante el mes de diciembre, bajo condiciones ambientales de humedad relativa del aire cercana al 72 % y una temperatura ambiente promedio de 17 $°C$.

Para ello, se implementó el método de caída de potencial según la configuración presentada en la Figura 4.3, la que involucra el uso del telurómetro marca Megabras, modelo EM-4058 [8]. En particular, la distancia D1, correspondiente a la ubicación del electrodo

de corriente, se estableció en 142.8 m, mientras que la distancia D2, asociada al electrodo de potencial, consideró un amplio rango de separación, con la finalidad de registrar la variación de la resistencia del sistema bajo estudio.

Además, se definió como punto de prueba el punto de conexión al sistema de puesta a tierra disponible en la reja de protección de la estación de contaminación, cuya ubicación se presenta en el plano adjunto del Apéndice A.

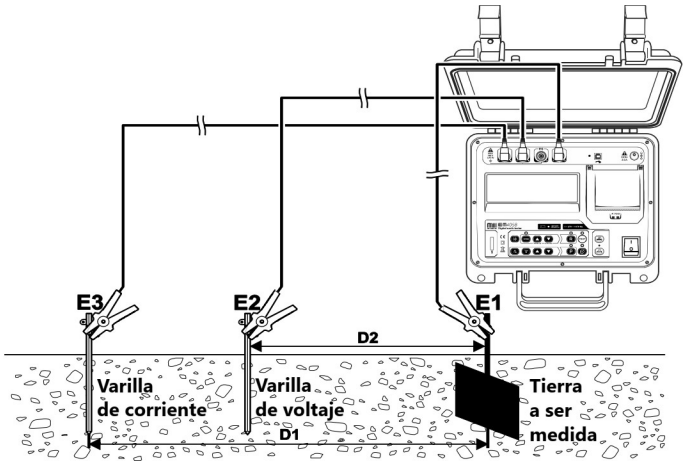


Figura 4.3: Configuración experimental utilizada para la medición de resistencia de puesta a tierra mediante el método de caída de potencial, utilizando el telurómetro Megabras, EM-4058. Imagen adaptada del manual del equipo EM-4058 [8].

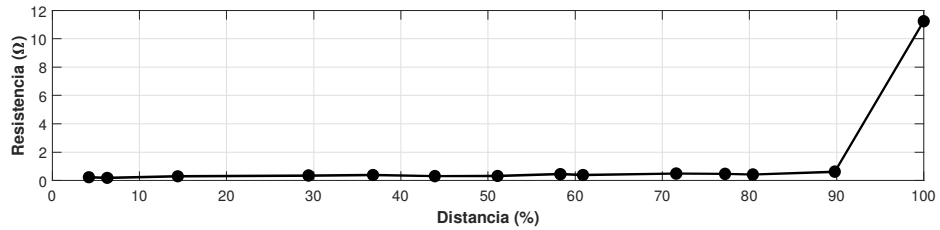
De esta manera, la Tabla 4.2 resume las mediciones de resistencia obtenidas para distintas posiciones del electrodo de potencial.

D2 (m)	**D2 (%)**	**Resistencia (Ω)**
6.0	4.2	0.23
9.0	6.3	0.19
20.5	14.4	0.30
42.0	29.4	0.35
52.5	36.8	0.39
62.7	43.9	0.31
73.0	51.1	0.32

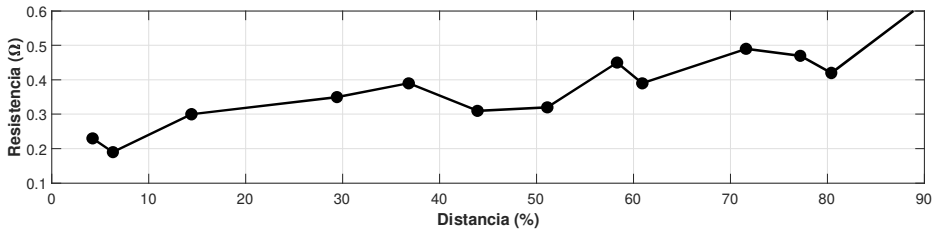
D2 (m)	**D2 (%)**	**Resistencia (Ω)**
83.2	58.3	0.45
86.9	60.9	0.39
102.2	71.6	0.49
110.2	77.2	0.47
114.8	80.4	0.42
128.3	89.8	0.62
142.8	100	11.24

Tabla 4.2: Valores obtenidos para la medición de resistencia del sistema de puesta a tierra del laboratorio de alta tensión de la UTFSM.

Los datos son representados gráficamente en la Figura 4.4. En particular, la Figura 4.4(a) presenta la medición completa realizada, mientras que la Figura 4.4(b) muestra un detalle de la zona comprendida entre el 0 % y el 90 % de la distancia total evaluada. Esta última corresponde al sector de mayor interés para la determinación de la resistencia del sistema de puesta a tierra, debido a que presenta un comportamiento más estable en los valores medidos y, además, corresponde a la zona recomendada por la IEEE Std 80 [4].



(a)



(b)

Figura 4.4: Resistencia del sistema de puesta a tierra del laboratorio de alta tensión de la UTFSM en función de la distancia. (a) Resistencia total del sistema. (b) Detalle de la resistencia para la zona estable de la medición.

Así entonces, mediante una interpolación lineal realizada en la zona cercana al 62 % de la distancia total recomendada por la literatura [4], la cual, para las mediciones efectuadas, corresponde al intervalo comprendido entre el 60.9 % y el 71.6 % respecto al punto de prueba, se obtiene el valor de resistencia de puesta a tierra a frecuencia industrial presentado en la Eq. (4.2), cuyo valor es cercano a 0,38 Ω.

$$R_{SPT} \approx R|_{D=62\,\%} \approx 0{,}38\ \Omega \tag{4.2}$$

El resultado obtenido evidencia que el sistema de puesta a tierra presenta un buen comportamiento en el rango de baja frecuencia. En efecto, la resistencia medida se encuentra considerablemente por debajo de los valores típicamente utilizados como criterio de buen desempeño en sistemas de puesta a tierra de instalaciones eléctricas y subestaciones, generalmente inferiores a 5 Ω [33].

4.1.3. Prueba de continuidad en el sistema de puesta a tierra

Como última etapa del proceso de caracterización del sistema de puesta a tierra a baja frecuencia, se realiza la medición de continuidad. La que tiene por finalidad establecer el estado de conexión interno del sistema y debe efectuarse mediante el método de cuatro conductores. En este contexto, la Figura 4.5 presenta el esquema experimental básico implementado para el proceso de medición.

En particular, el montaje considera una etapa de inversión de polaridad, la cual, para este caso, fue realizada manualmente mediante el intercambio de las conexiones de los conductores. Lo que permitió obtener dos mediciones por cámara con polaridades opuestas.

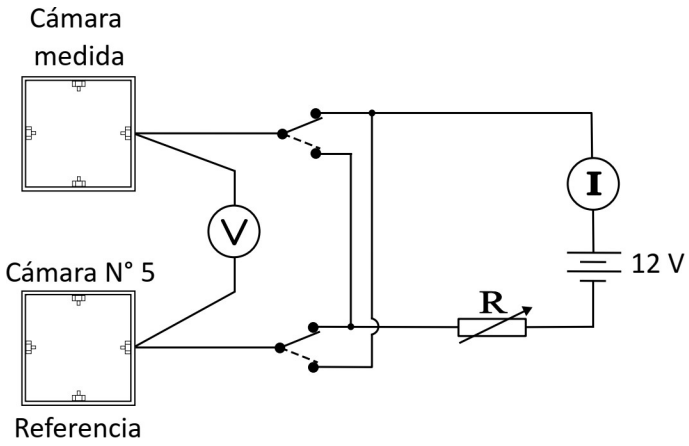


Figura 4.5: Configuración experimental utilizada para la medición de continuidad del sistema de puesta a tierra mediante el método de cuatro conductores con cambio de polaridad. Elaboración propia.

Para llevar a cabo el proceso de medición, se implementó una batería de 12 V conectada en serie con una resistencia ajustable, configurada de manera de establecer una corriente de ensayo de 5 A en todas las mediciones realizadas. Además, se definió como punto de referencia la cámara N° 5 del sistema de puesta a tierra, por lo que todas las mediciones de continuidad fueron efectuadas respecto a dicha cámara. La Tabla 4.3 presenta un resumen de las mediciones obtenidas para ambas configuraciones de polaridad. En la que para cada cámara evaluada, se consideró como valor final de resistencia la máxima resistencia registrada entre ambas polaridades.

Cámaras	**Polaridad 1 (+)**		**Polaridad 2 (-)**		**R (mΩ)**
	I (A)	**V (mV)**	**I (A)**	**V (mV)**	
CR5 - CR1	5	0.5	5	0.6	0.12
CR5 - CR2	5	1.0	5	1.0	0.20
CR5 - CR3	5	0.9	5	0.9	0.18
CR5 - CR4	5	1.9	5	2.0	0.40
CR5 - CR6	5	3.5	5	3.6	0.72
CR5 - CR7	5	0.9	5	0.9	0.18
CR5 - CR8	5	0.8	5	0.8	0.16
CR5 - CR9	5	1.6	5	1.7	0.34
CR5 - CR10	5	2.1	5	2.1	0.42
CR5 - CR11	5	2.0	5	2.1	0.42
CR5 - CR12	5	1.8	5	1.9	0.38
CR5 - CR13	5	2.1	5	2.3	0.46
CR5 - CR14	5	4.3	5	4.4	0.88
CR5 - CR15	5	5.8	5	6.4	1.28
CR5 - CR16	5	7.1	5	7.2	1.44
CR5 - CR17	5	6.5	5	7.0	1.40

Tabla 4.3: Resumen de las mediciones de continuidad efectuadas en las cámaras del sistema de puesta a tierra del laboratorio de alta tensión de la UTFSM mediante el método de cuatro conductores con inversión de polaridad.

Diversos modos de falla pueden presentarse en conductores y conexiones de sistemas de puesta a tierra, entre los cuales destacan conexiones de alta resistencia, degradación de uniones, discontinuidades eléctricas y fenómenos de corrosión u oxidación asociados al deterioro de conductores y conexiones [26]. En este contexto, durante el proceso de medición experimental se constató que las cámaras comprendidas entre la 14 y la 17, ubicadas en el patio de contaminación del laboratorio y emplazadas en una zona expuesta a la intemperie, presentan susceptibilidad al ingreso de agua de lluvia y a otros fenómenos asociados a la humedad costera, aun cuando disponen de tapas de protección. Debido a ello, según se muestra en la Figura 1.6, estas cámaras presentan un elevado nivel de deterioro producto de la presencia de corrosión avanzada.



Figura 4.6: Estado actual de cámaras del sistema de puesta a tierra ubicadas en el patio de contaminación del laboratorio de alta tensión, evidenciando exposición a la intemperie, ingreso de agua y corrosión avanzada en elementos metálicos.

Sin embargo, aun considerando el nivel de deterioro observado, los resultados presentados en la Tabla 4.3, en contraste con el rango típico de resistencia entre puntos de una puesta a tierra mencionado en el Capítulo 2, permiten concluir que el estado actual de las conexiones internas del sistema de puesta a tierra es adecuado. Esto se debe a que las resistencias registradas se encuentran considerablemente por debajo de 1 Ω.

Así, con la finalidad de incorporar un análisis visual a la caracterización por continuidad del sistema de puesta a tierra, se desarrollaron dos esquemas. El primero, presentado en la Figura 4.7, muestra la resistencia efectiva registrada en la prueba de continuidad para todas las cámaras en función de la distancia efectiva respecto a la cámara de referencia. En términos prácticos, y asumiendo características similares en los conductores y conexiones del sistema, es esperable que la resistencia efectiva presente una dependencia general con la longitud del trayecto eléctrico entre cámaras.

A partir de la gráfica obtenida, es posible identificar algunas mediciones que presentan desviaciones respecto al comportamiento esperado, posiblemente asociadas a fenómenos de oxidación, corrosión o mal contacto en terminales y conexiones. En particular, destacan las cámaras expuestas a la intemperie comprendidas entre la 15 y la 17, además de las cámaras 8, 4 y 13 ubicadas al interior del laboratorio. No obstante, los resultados permiten evidenciar un comportamiento global consistente y aceptable para el sistema de puesta a tierra en estudio.

Finalmente, la Figura 4.8 presenta el segundo esquema desarrollado, el cual ilustra la variación de la resistencia efectiva en las distintas cámaras según su ubicación dentro de la malla de puesta a tierra del laboratorio. A través de la distribución de colores es posible apreciar un comportamiento consistente con lo observado anteriormente, donde

las cámaras cercanas al punto de referencia presentan resistencias menores, mientras que aquellas ubicadas a mayor distancia tienden a registrar valores más elevados.

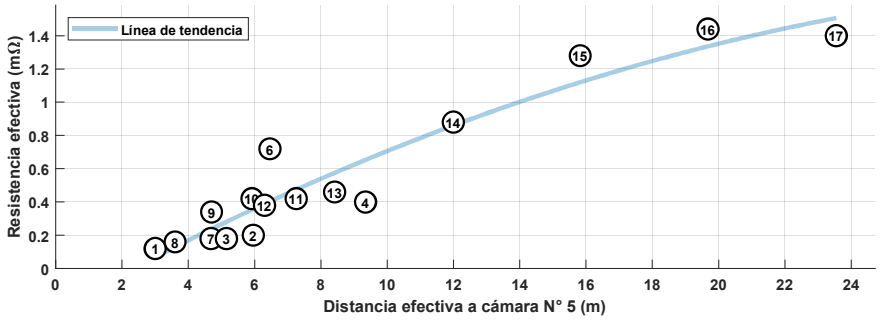


Figura 4.7: Resistencia efectiva de la prueba de continuidad en cámaras del laboratorio en función de la distancia efectiva a la cámara de referencia, incluyendo línea de tendencia.

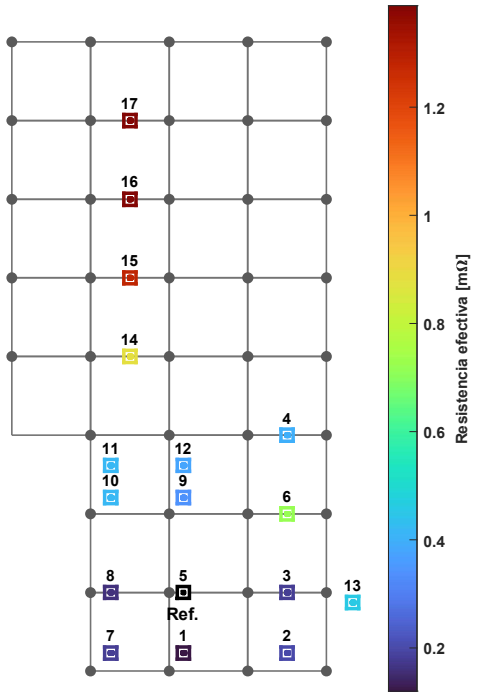


Figura 4.8: Esquema de continuidad eléctrica en cámaras del laboratorio. Basado en mediciones de resistencia respecto a la cámara de referencia N° 5.

En términos generales, las mediciones de continuidad realizadas permiten concluir que el sistema de puesta a tierra del laboratorio mantiene un comportamiento eléctrico consistente entre sus distintas cámaras, presentando valores de resistencia compatibles con un adecuado estado de continuidad interna. Si bien se identificaron sectores con mayores niveles de deterioro y corrosión, especialmente en cámaras expuestas a condiciones ambientales adversas, los resultados obtenidos no evidencian discontinuidades significativas ni resistencias anómalas que comprometan el funcionamiento general del sistema.

4.2. Evaluación en alta frecuencia

4.2.1. Medición de impedancia del sistema de puesta a tierra

En los sistemas de potencia, la corriente de falla ha constituido tradicionalmente el principal criterio de diseño de los sistemas de puesta a tierra, lo que ha llevado a considerar la resistencia como el parámetro predominante. Este enfoque resulta adecuado para el análisis de fenómenos en régimen permanente a frecuencia industrial (50 Hz); sin embargo, es insuficiente para abordar fenómenos de alta frecuencia. En este contexto, resulta más apropiado caracterizar el sistema de puesta a tierra en términos de su impedancia.

Con el fin de analizar la respuesta en frecuencia del sistema de puesta a tierra del laboratorio de alta tensión, se realizó experimentalmente la medición de impedancia según el esquema recomendado en el Capítulo 2, el cual fue ajustado en función de los equipos disponibles en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la universidad, tal como se presenta en la Figura 4.9.

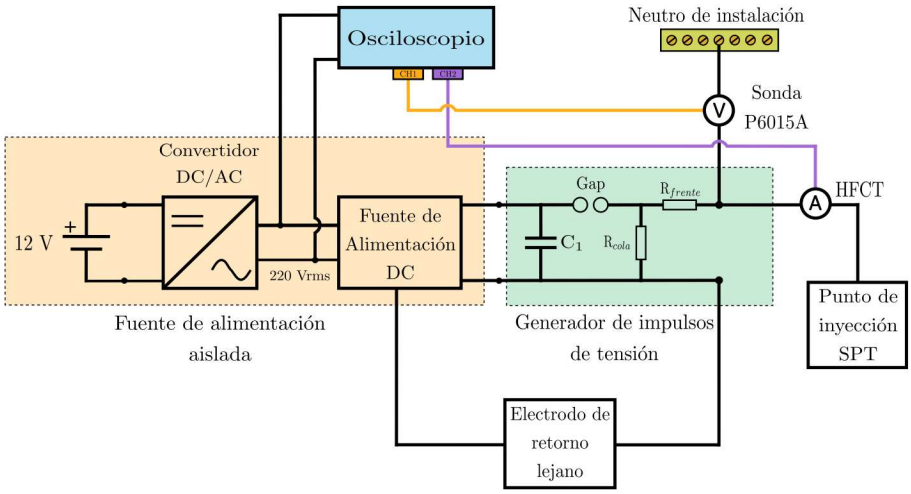


Figura 4.9: Esquema de conexión empleado para la medición de impedancia del sistema de puesta a tierra. Elaboración propia.

El esquema de conexión consiste, en primera instancia, en una fuente de alimentación aislada galvánicamente del sistema de puesta a tierra en estudio, implementada mediante una batería de 12 V y un convertidor DC/AC. En conjunto, estos elementos permiten alimentar el osciloscopio de medición y la fuente de alimentación DC, generando una configuración de medición aislada. Posteriormente, a la salida de esta última se conecta el generador de impulsos de tensión, conformado por un condensador de carga de $1\mu F$, un descargador de tensión (spark gap), una resistencia de frente de 120 Ω y una resistencia de cola de 24,4 $k\Omega$.
El proceso experimental contempla la medición de la corriente y la tensión en el punto de inyección del sistema de puesta a tierra (SPT). La corriente se mide mediante un transformador de corriente de alta frecuencia Pearson, modelo 150 [13], cuyas principales características se resumen en la Tabla 4.4. Por su parte, la tensión se mide mediante una sonda de alta tensión Tektronix, modelo P6015A [14], referenciada al neutro de la instalación, el cual corresponde al punto de referencia equipotencial del sistema de baja tensión. Las principales especificaciones técnicas de esta sonda se resumen en la Tabla 4.5.

Sensibilidad	0.5 V/A
Corriente peak máxima	1000 A
Corriente RMS máxima	15 A
Tiempo de subida	20 ns
Frecuencias de corte	40 Hz a 20 MHz

Tabla 4.4: Especificaciones técnicas del trasformador de corriente de banca ancha tipo Pearson, modelo 150 [13].

Atenuación	1000X
Voltaje máximo, DC o RMS	20kV
Ancho de banda	75 MHz
Tiempo de subida	4.0 ns
Carga	100 $M\Omega$ – 3.0 pF

Tabla 4.5: Especificaciones técnicas de la sonda de alta tensión Tektronix P6015A [14].

Respecto al electrodo de retorno del generador, la literatura recomienda distancias lejanas al sistema de puesta a tierra en estudio, de al menos 30 m [5]. Es por ello, que se ha optado por colocar el electrodo a una distancia aproximada de 70 m, tal como se muestra en la Figura 4.10.

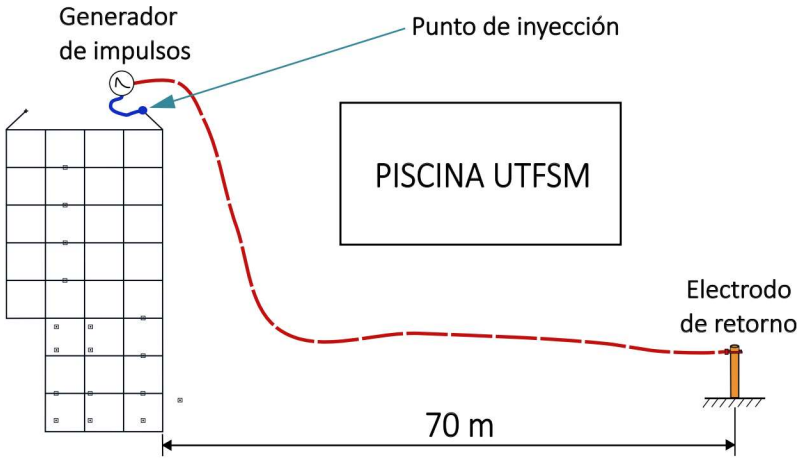


Figura 4.10: Esquema de conexión del electrodo de retorno del generador de impulsos de tensión. Elaboración propia.

Este retorno se ha implementado a través de un conductor eléctrico unipolar de cobre de 2.5 mm^2 de sección y una barra de puesta a tierra de 50 cm de largo y 12.65 mm de diámetro.
En la Figura 4.11 se puede observar el electrodo de retorno enterrado a 70 m de distancia del sistema de puesta a tierra, en un sector cercano a la piscina de la universidad. Mientras que la Figura 4.12 muestra el detalle de la medición de corriente a través del transformador de alta frecuencia en el punto de inyección. El que corresponde a la toma de tierra disponible en el patio de contaminación del laboratorio de alta tensión.



Figura 4.11: Electrodo de retorno del generador de impulsos de tensión.

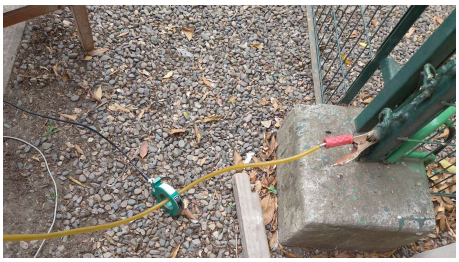


Figura 4.12: Medición de corriente inyectada al sistema de puesta a tierra mediante transformador de alta frecuencia Pearson.

Tal como se mencionó anteriormente, el generador de impulsos fue alimentado mediante una fuente DC, específicamente la fuente de alta tensión KEITHLEY 247, la cual permite una tensión máxima continua de 3 kV y una corriente máxima de 6 mA. Estos parámetros resultan relevantes ya que, al contrastarlos con la capacitancia del condensador de carga utilizado en el generador, es posible estimar la energía máxima disponible para el ensayo, presentada en la siguiente ecuación:

$$E_{gen} = \frac{1}{2}CV^2 = 4{,}5\ J \tag{4.3}$$

De esta manera, la prueba queda limitada a una energía máxima de 4,5 J, valor relativamente bajo en comparación con generadores de impulso tradicionales de mayor capacidad. Sin embargo, el proceso de medición fue realizado bajo estas condiciones debido a restricciones de seguridad asociadas al entorno de ensayo. En particular, la utilización de un generador de mayor energía implicaría un riesgo adicional para las personas que transiten por la universidad durante la ejecución de las mediciones.

En este contexto, la Figura 4.13 presenta las formas de onda de la tensión de impulso medida entre el punto de inyección y el neutro de la instalación, así como la corriente inyectada al sistema de puesta a tierra. La tensión alcanzó un valor máximo cercano a 223 V, mientras que la corriente un máximo aproximado de 1,95 A.

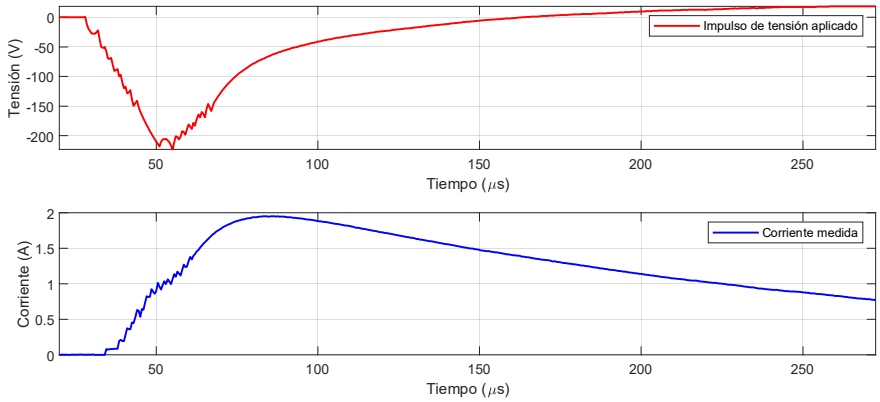


Figura 4.13: Tensión de impulso aplicada al sistema de puesta a tierra y corriente medida para retorno lejano de 70 m.

Considerando los datos experimentales obtenidos, la impedancia del sistema de puesta a tierra se determinó en el dominio de la frecuencia a partir de la relación espectral entre la tensión y la corriente medida, utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Para ello, las señales de tensión y corriente fueron previamente suavizadas para atenuar las fluctuaciones asociadas al ruido de medición, tras lo cual se aplicó la FFT de forma independiente a cada una de ellas, generando sus respectivos espectros complejos [25]. El vector de frecuencias fue construido a partir del intervalo temporal entre muestras consecutivas y de la cantidad total de datos registrados. Finalmente, la impedancia en frecuencia fue calculada mediante la relación entre ambos espectros [5]:

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \tag{4.4}$$

La Figura 4.14 presenta la magnitud de la impedancia obtenida, la cual alcanza un valor máximo cercano a los 1000 Ω. Para el resto del rango de frecuencias analizado, la respuesta presenta un comportamiento prácticamente estacionario, con valores inferiores a 200 Ω y una respuesta oscilatoria amortiguada.

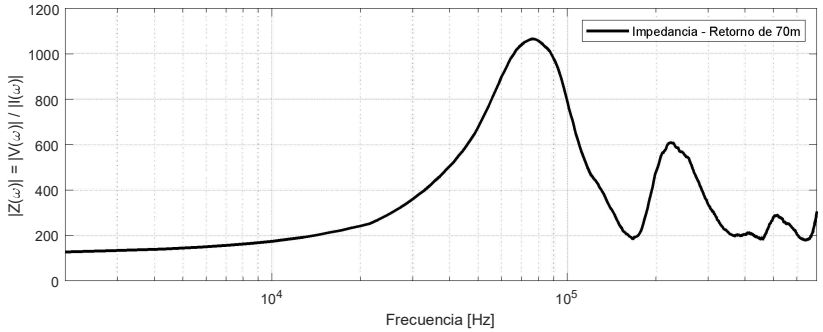


Figura 4.14: Respuesta en frecuencia del sistema de puesta a tierra del laboratorio de alta tensión para retorno lejano de 70 m.

En términos generales, la magnitud de la impedancia medida debiera mantenerse en valores relativamente bajos [5], condición que no se observa claramente en los resultados obtenidos en este estudio. Sin embargo, ello no constituye una evidencia concluyente de un desempeño deficiente del sistema frente a fenómenos de alta frecuencia, ya que la impedancia registrada no representa exclusivamente la respuesta propia del sistema de puesta a tierra, sino que incorpora además la influencia del sistema de medición empleado, introduciendo un error asociado al procedimiento experimental.

En este contexto, la literatura especializada destaca que las mediciones de impedancia deben planificarse considerando las características propias del sitio de ensayo, el equipamiento disponible y el tipo de perturbaciones que se pretende aplicar, puesto que estos factores condicionan tanto la metodología empleada como la calidad y representatividad de los resultados obtenidos [25]. Asimismo, la determinación de la impedancia transitoria de un sistema de puesta a tierra requiere, idealmente, que los conductores destinados al retorno de corriente posean una longitud suficientemente grande para aproximar una referencia remota; sin embargo, esta condición exige el empleo de generadores de impulsos con suficiente capacidad energética, de manera que la energía disponible permita minimizar la influencia de la inductancia de dichos conductores sobre la forma de onda de

la corriente inyectada [34]. Adicionalmente, se ha reportado que el uso de tiras o placas conductoras de cobre o aluminio, en reemplazo de conductores trenzados convencionales, contribuye a reducir la inductancia del circuito de prueba y a disminuir el área del lazo de puesta a tierra involucrado en la medición, favoreciendo así la obtención de resultados más representativos del comportamiento real del sistema [5].

En el presente caso, y tal como se mencionó anteriormente, por razones de seguridad se optó por emplear un generador de impulsos de baja energía, cuya capacidad energética resultó insuficiente para contrarrestar adecuadamente la elevada inductancia asociada al conductor monopolar utilizado para implementar el retorno lejano. En consecuencia, la impedancia registrada se vio influenciada no sólo por la respuesta propia del sistema de puesta a tierra, sino también por los efectos introducidos por el montaje experimental. No obstante, dado que el objetivo principal del presente estudio es obtener una aproximación de la respuesta del sistema frente a corrientes impulsivas, la medición realizada se considera válida. En efecto, la forma de onda obtenida presenta una respuesta amortiguada y sin oscilaciones severas, característica que resulta coherente con un comportamiento adecuado del sistema frente a perturbaciones de alta frecuencia. Por consiguiente, aun cuando el valor absoluto de la impedancia deba interpretarse con cautela debido a las limitaciones del ensayo, puede concluirse que la respuesta observada del sistema de puesta a tierra es consistente tanto con el comportamiento esperado como con las tendencias reportadas en estudios similares disponibles en la literatura especializada [25].

4.2.2. Medición y análisis de tensiones transitorias

La respuesta de los sistemas de puesta a tierra frente a corrientes impulsivas suele caracterizarse mediante la elevación transitoria del potencial de tierra, conocida como TGPR (*Transient Ground Potential Rise*). Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre a frecuencia industrial, la distribución espacial de la TGPR bajo perturbaciones transitorias es altamente no uniforme. Como consecuencia, pueden generarse diferencias significativas de potencial entre distintos puntos de la malla de puesta a tierra, fenómeno denominado TGPD (*Transient Ground Potential Difference*) [34]. Esto adquiere especial relevancia debido a que la TGPD puede acoplarse a los equipos conectados a la propia red de puesta a tierra, provocando interferencias electromagnéticas, mal funcionamiento e incluso daños en dispositivos sensibles [34]. Lo anterior guarda una relación directa con el problema de interferencia estudiado en la presente memoria.

Por esta razón, como parte de la caracterización en alta frecuencia del sistema de puesta a tierra, y en concordancia con los conceptos presentados en el Capítulo 2, se realizan mediciones de tensiones transitorias con el propósito de evaluar el comportamiento de los distintos puntos accesibles del sistema, correspondientes a las cámaras de inspección de la malla. Cuyo objetivo es identificar aquellos puntos que presentan menores elevaciones de potencial frente a corrientes impulsivas, así como aquellos que podrían representar un mayor riesgo debido a la aparición de tensiones transitorias más elevadas.

Para ello, se adaptó un montaje experimental basado en el esquema de medición presentado en el Capítulo 2, el cual fue extraído de la literatura especializada. El montaje implementado se muestra en la Figura 4.15 y permite medir las diferencias de potencial transitorias inducidas en distintos puntos del sistema de puesta a tierra como consecuencia de la circulación de la corriente impulsiva inyectada [5].

El sistema de ensayo se compone principalmente del generador de impulsos Haefely de 400 kV y 600 J, junto con una fuente de alimentación flotante constituida por un convertidor DC/AC y una batería de 12 V destinada a alimentar el osciloscopio de medición. La utilización de una alimentación flotante tiene por finalidad evitar trayectorias de retorno no deseadas a través del sistema de puesta a tierra y de la masa propia del instrumento.

La corriente de inyección se registra mediante un transformador de corriente de alta frecuencia Pearson modelo 150 [13]. Por su parte, las tensiones transitorias se miden utilizando una punta de prueba con relación de atenuación x10 y un ancho de banda de 20 MHz. La conexión de medición se realiza mediante un cable coaxial de gran longitud equipado con conectores tipo gancho en ambos extremos, conectando el terminal positivo a la cámara bajo análisis y el terminal negativo a la cámara de referencia. Para todos los ensayos efectuados, la cámara $N°$ 5 es utilizada como referencia[6].

Adicionalmente, debido a la alta susceptibilidad de este tipo de mediciones a las interferencias electromagnéticas generadas por el propio impulso, se optó por trasladar físicamente el potencial de referencia hasta las proximidades del punto de medición mediante una cinta de cobre de 7.5 cm de ancho y más de 20 m de longitud. Esta disposición permitió reducir el área de lazo asociada al sistema de medición y mejorar la inmunidad frente al ruido electromagnético presente durante los ensayos.

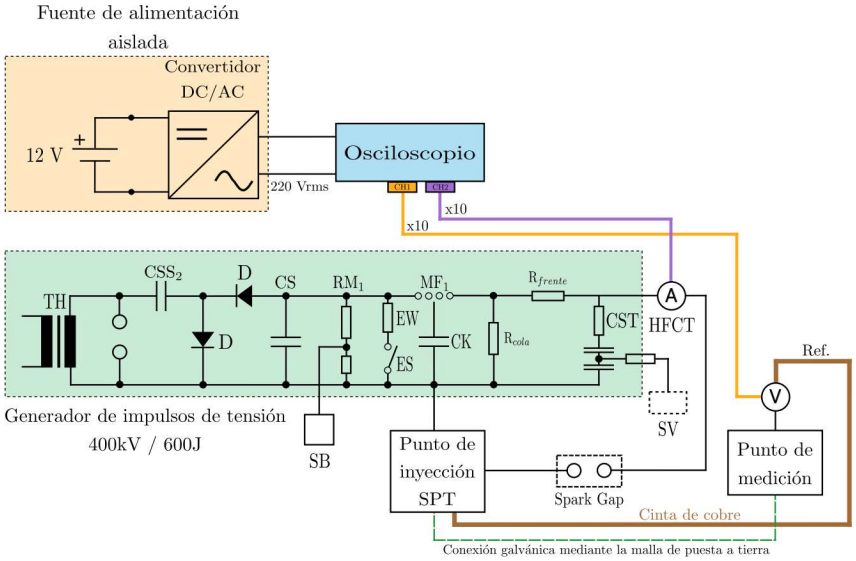


Figura 4.15: Esquema de conexión para la medición de potenciales transitorios en el sistema de puesta a tierra para ensayos con ruptura dieléctrica. Elaboración propia.

Por otro lado, con el fin de contrastar las elevaciones de potencial generadas bajo diferentes condiciones de corriente impulsiva, las mediciones se efectúan tanto con ruptura dieléctrica como sin ruptura dieléctrica. La Figura 4.16(a) presenta el spark gap de esferas de 10 cm de diámetro utilizado en los ensayos con ruptura dieléctrica, mientras que la Figura 4.16(b) muestra el aislador de suspensión empleado en los ensayos sin ruptura.

[6]La configuración experimental planteada es consistente con lo expuesto en el Capítulo 2 respecto de la orientación de las conductores de inyección y retorno de corriente, puesto que ambos se dirigen hacia el mismo punto de referencia.

Es importante señalar que el aislador mostrado no se utiliza como elemento de ruptura durante los ensayos, debido a las elevadas tensiones requeridas para producir su contorneo, condición que incrementa los riesgos asociados a la ejecución de las pruebas. En consecuencia, se emplea un spark gap de esferas como elemento de ruptura controlada, ya que permite fijar la tensión de disparo mediante el ajuste de la separación entre los electrodos.



(a) **(b)**

Figura 4.16: Elementos utilizados en la configuración experimental para la medición de tensiones transitorias: (a) spark gap empleado para ensayos con ruptura dieléctrica y (b) aislador empleado para ensayos sin ruptura dieléctrica.

Así entonces, se realizan ensayos en todas las cámaras accesibles del sistema de puesta a tierra. La Figura 4.17 muestra la forma de onda del impulso de tensión aplicado durante los ensayos con ruptura dieléctrica, con un valor máximo cercano a 15 kV, así como la corriente de inyección registrada, cuyo valor máximo es aproximadamente 80 A. Se observa que la ruptura producida en el spark gap distorsiona la cola del impulso de tensión, dando origen a una oscilación amortiguada, posiblemente asociada a la interacción entre el arco eléctrico generado y los elementos reactivos presentes en el circuito de ensayo.

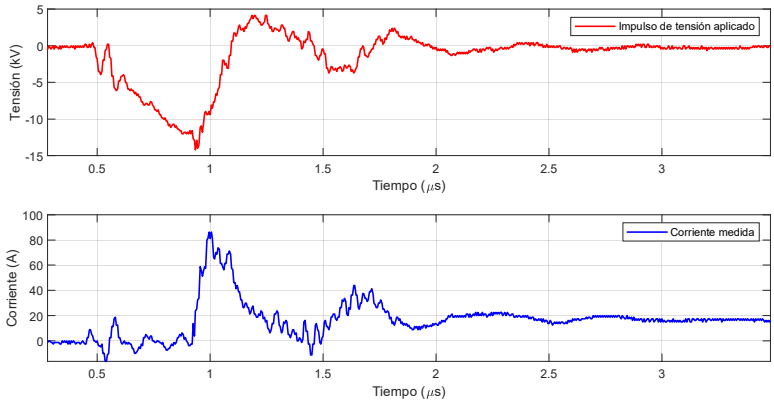


Figura 4.17: Impulso de tensión aplicado y corriente medida para ensayo con ruptura dieléctrica.

Por otro lado, la Figura 4.18 presenta las formas de onda de la tensión diferencial obtenidas para la cámara $N°$ 1 bajo condiciones de ensayo con y sin ruptura dieléctrica. En el caso con ruptura dieléctrica, la oscilación alcanza un valor máximo cercano a 40 V, mientras que para el ensayo sin ruptura dieléctrica la tensión diferencial presenta un valor máximo del orden de 5 V.

Se observa que, bajo condiciones sin ruptura dieléctrica, la señal presenta un mayor grado de deformación respecto al caso con ruptura, acompañado de una disminución significativa de su magnitud. Este comportamiento puede atribuirse a las diferencias en el mecanismo de conducción de corriente, donde predominan los efectos capacitivos en el ensayo sin ruptura, mientras que en presencia de ruptura dieléctrica la corriente circula a través de un camino conductor generado por el proceso disruptivo.

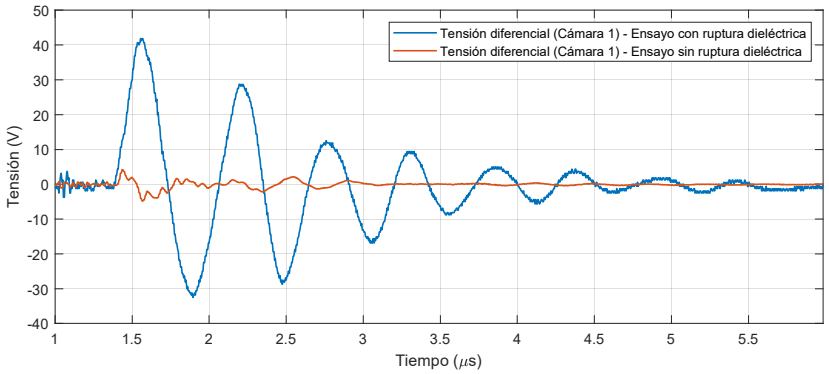


Figura 4.18: Forma de onda de la tensión diferencial transitoria registrada en la cámara N° 1 del sistema de puesta a tierra durante ensayo con y sin ruptura dieléctrica.

Con el fin de analizar las tensiones obtenidas en ambos tipos de ensayos, se elaboraron las gráficas presentadas en la Figura 4.19 y la Figura 4.20. En ellas se representa la tensión diferencial máxima registrada durante los ensayos con y sin ruptura dieléctrica en función de la distancia efectiva respecto de la cámara de referencia N° 5. De esta manera, las gráficas permiten evaluar la variación espacial de la tensión diferencial dentro de la instalación, mostrando cómo su magnitud cambia a medida que aumenta la distancia respecto de la cámara de referencia.

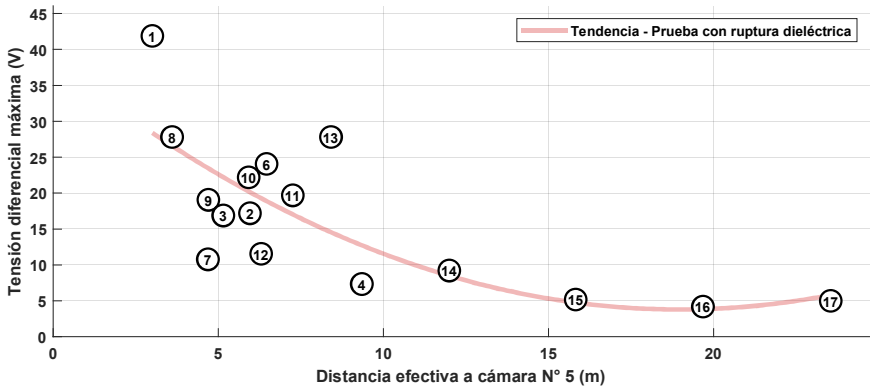


Figura 4.19: Tensión diferencial transitoria máxima registrada en las cámaras del sistema de puesta a tierra durante ensayos con ruptura dieléctrica, en función de la distancia efectiva respecto de la cámara de referencia N° 5.

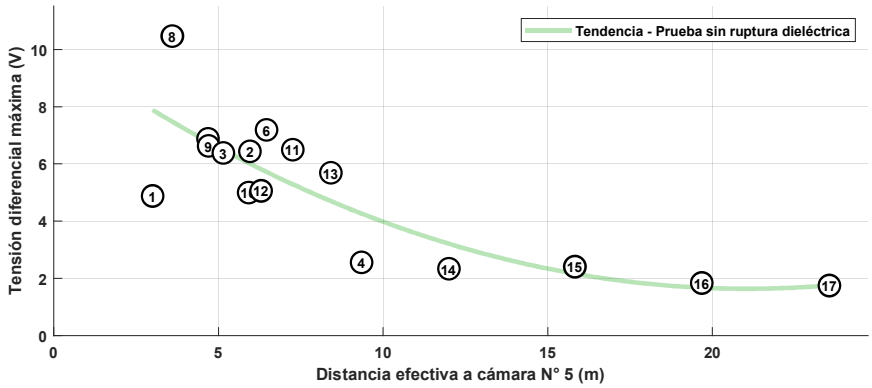


Figura 4.20: Tensión diferencial transitoria máxima registrada en las cámaras del sistema de puesta a tierra durante ensayos sin ruptura dieléctrica, en función de la distancia efectiva respecto de la cámara de referencia $N°$ 5.

Se observa que las tensiones diferenciales registradas durante los ensayos con ruptura dieléctrica se encuentran en un rango aproximado de 5 a 45 V, mientras que para los ensayos sin ruptura dieléctrica los valores se sitúan entre 2 y 12 V. Estos resultados permiten inferir, que las corrientes disruptivas generan una elevación de potencial más significativa en el sistema de puesta a tierra, constituyendo el escenario más crítico desde el punto de vista de las tensiones inducidas y las diferencias de potencial asociadas.

Adicionalmente, en ambos tipos de ensayo se aprecia una disminución de la tensión diferencial a medida que aumenta la distancia respecto de la cámara de referencia. Este comportamiento sugiere una reducción progresiva del acoplamiento entre el punto de inyección y las cámaras evaluadas, siendo más pronunciado en aquellas ubicadas en las proximidades de la cámara de referencia. No obstante, esta tendencia debe analizarse con cautela, ya que, como se indicó en el estudio de continuidad, varias de las cámaras más alejadas presentan problemas significativos de corrosión. Esta condición podría afectar la calidad del contacto eléctrico durante las mediciones y, en consecuencia, influir en los valores de tensión diferencial registrados.

Por otra parte, al analizar los resultados de manera individual para cada cámara, no se identifica una correspondencia clara entre los niveles de tensión obtenidos en ambos tipos de ensayo. En efecto, algunas cámaras presentan tensiones diferenciales elevadas durante los ensayos con ruptura dieléctrica, mientras que para los ensayos sin ruptura registran valores relativamente bajos en comparación con el resto de las cámaras evaluadas. Este comportamiento sugiere que los mecanismos predominantes en cada condición de ensayo podrían verse afectados de manera diferente por las características particulares de cada cámara respecto a su ubicación.

Finalmente, los resultados permiten identificar las cámaras ubicadas en las proximidades del punto de inyección como las más críticas desde el punto de vista de la tensión diferencial transitoria. En particular, las cámaras $N°$ 1 y $N°$ 8 registran los niveles más elevados, especialmente durante los ensayos con ruptura dieléctrica. En conjunto, estos resultados sugieren que las zonas cercanas al punto de inyección son las más susceptibles a experimentar elevaciones de potencial significativas, constituyendo los sectores más críticos dentro de la instalación evaluada.

Tal como se expuso en el Capítulo 2, las variaciones en la corriente de inyección registradas entre las distintas mediciones hacen necesario normalizar los resultados obtenidos, con el fin de establecer una comparación consistente entre los diferentes ensayos realizados. Para ello, se emplean los parámetros previamente definidos.

En primer lugar, se analizan los resultados en términos de la impedancia de impulso Z_1, definida como:

$$Z_1 = \frac{V_p}{I_p} \tag{4.5}$$

A partir de este parámetro, se elabora la gráfica presentada en la Figura 4.21, la cual muestra los valores de impedancia de impulso obtenidos para todas las cámaras accesibles del sistema de puesta a tierra, tanto para los ensayos con ruptura dieléctrica como para aquellos realizados sin ruptura dieléctrica.

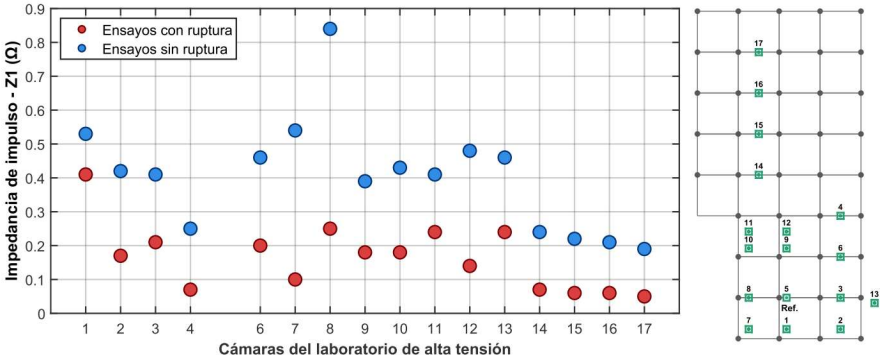


Figura 4.21: Comparación experimental de la impedancia de impulso Z_1, obtenida en cámaras del laboratorio para ensayos con y sin ruptura dieléctrica.

La gráfica permite observar que, para ambos tipos de ensayo, los valores de impedancia de impulso Z_1 se mantienen por debajo de la unidad en todas las cámaras evaluadas. Asimismo, al comparar ambos escenarios, se aprecia que los ensayos sin ruptura dieléctrica presentan valores de impedancia superiores a los obtenidos durante el otro ensayo.
Este resultado es relevante, ya que el parámetro Z_1 relaciona los valores máximos de tensión y corriente registrados durante cada ensayo. En consecuencia, los bajos valores obtenidos sugieren una respuesta efectiva del sistema de puesta a tierra frente a corrientes impulsivas. Lo anterior resulta consistente con lo señalado en la literatura [5], donde se establece que la elevación transitoria del potencial de tierra depende en gran medida de las propiedades inductivas del sistema. Por tanto, los reducidos valores de impedancia observados constituyen un indicio favorable respecto al comportamiento del sistema, sugiriendo que las elevaciones máximas de potencial tenderían a mantenerse acotadas dentro de los rangos de corriente evaluados.

Este análisis, puede ser consecutivamente contrastado al considerar ahora el parámetro Z_3 y su respectiva gráfica presentada en la Figura 4.22:

$$Z_3 = \frac{V_p}{i(t_{V_p})} \tag{4.6}$$

Este parámetro resulta útil para evaluar el comportamiento inductivo del sistema, ya que valores elevados suelen asociarse a una mayor influencia de los efectos inductivos

[27]. Como puede observarse, para los ensayos con ruptura dieléctrica el parámetro Z_3 se mantiene generalmente por debajo de 5 Ω, mientras que en los ensayos sin ruptura dieléctrica presenta una mayor dispersión, alcanzando incluso valores cercanos a 35 Ω en la cámara $N°$ 3.

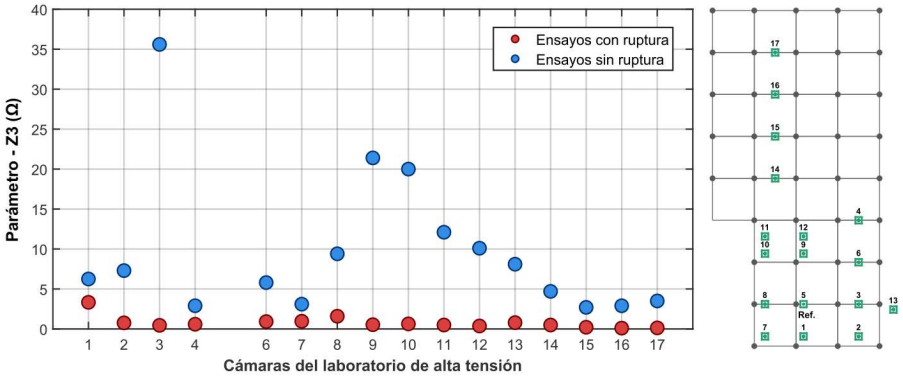


Figura 4.22: Comparación experimental asociada al parámetro Z_3, obtenida en cámaras del laboratorio para ensayos con y sin ruptura dieléctrica.

Estos resultados sugieren que, al menos bajo condiciones de ruptura dieléctrica, el sistema de puesta a tierra no presenta un comportamiento marcadamente inductivo. Sin embargo, los valores elevados observados en algunas cámaras podrían estar asociados al deterioro de las juntas y conexiones internas de la malla de puesta a tierra, producto de los procesos de corrosión identificados previamente [5]. Esta condición puede incrementar la impedancia efectiva de ciertos trayectos de corriente y, por consiguiente, afectar los parámetros obtenidos experimentalmente.

Por otra parte, las diferencias observadas entre los ensayos con y sin ruptura dieléctrica podrían estar relacionadas con las características espectrales de las corrientes de impulso involucradas. En particular, las variaciones en el contenido de frecuencias de las formas de onda pueden modificar la respuesta inductiva de los electrodos de puesta a tierra y de las conexiones internas de la malla, dando lugar a diferencias apreciables en la impedancia medida [5].

En base a los resultados obtenidos, se rectifica experimentalmente que el sistema de puesta a tierra no presenta un comportamiento equipotencial uniforme bajo condiciones transitorias. La distribución espacial de las tensiones diferenciales evidencia la existencia de zonas con mayor susceptibilidad a la elevación de potencial, particularmente en las proximidades del punto de inyección.

Asimismo, la dispersión observada entre cámaras, junto con las variaciones entre ensayos, sugiere la presencia de heterogeneidades en la red de puesta a tierra, asociadas a posibles diferencias en la calidad de las conexiones eléctricas y a la condición física de algunos tramos de la malla.

En consecuencia, la malla presenta un comportamiento global funcional, pero una respuesta no homogénea frente a corrientes impulsivas, lo que evidencia la existencia de variaciones locales relevantes dentro del sistema. Si bien este comportamiento no constituye, por sí mismo, un indicio de un funcionamiento deficiente del sistema de puesta a tierra, sí sugiere que parte de la perturbación analizada puede estar asociada a los elevados niveles de tensión transitoria que desarrolla la malla durante los ensayos de impulso.

Capítulo 5

Modelamiento transitorio

Las mediciones experimentales realizadas permiten dilucidar de buena manera el estado actual del sistema de puesta a tierra del laboratorio en estudio, pero carecen de sustento al no ser contrastadas con los parámetros óptimos esperados para una malla de puesta tierra con las características de diseño conocidas. Es por ello, que el presente capítulo da a conocer un análisis comparativo entre los datos experimentales obtenidos y los parámetros esperados de manera teórica a través de simulaciones computacionales en régimen transitorio y estacionario.

5.1. Evaluación del sistema de puesta a tierra por medio de simulaciones computacionales

5.1.1. Morfología de simulación

En consideración del diseño de la malla de puesta a tierra del laboratorio de alta tensión de la UTFSM (adjunta en el plano del Apéndice A) y el modelo de parámetros concentrados propuesto en el Capítulo 2 para conductores horizontales, se genera en ATPDraw un modelo RLC de la malla en estudio (ver esquema en Apéndice B). En el cual, se pueden observar los 42 nodos del sistema de puesta tierra, enumerados en orden ascendente e interconectados por medio de las impedancias propias de cada segmento de conductor.

Los valores de los parámetro concentrados (resistencia, inductancia, capacitancia) han sido calculados en base a las ecuaciones que el modelo para conductor horizontal presenta en el Capítulo 2. Por ello, la Tabla 5.1 da a conocer las principales variables físicas que han sido requeridas por las ecuaciones mencionadas para el cálculo de los parámetros.

La magnitud física de las variables presentadas ha sido extraída directamente de la literatura disponible. En específico, magnitudes electromagnéticas y de conductores de cobre son extraídas del texto "Teoría Electromagnética" [35]. Mientras que la permitividad relativa para tierra húmeda se ha aproximado según recomendación técnica del texto "Características eléctricas de la superficie de la tierra" [36] para una condición de baja frecuencia. Además, tanto la profundidad de la malla como la sección de conductor han sido aproximadas al valor estándar que suele emplearse en diseño, debido a que es un parámetro no conocido con exactitud en la actualidad.

En base a lo anterior, la Tabla 5.2 presenta un resumen de los valores obtenidos para los parámetros concentrados del modelo, calculados mediante el reemplazo de las variables en las ecuaciones correspondientes.

Parámetro	Magnitud
Profundidad de malla (h)	0,5 m
Longitud del segmento de conductor (ℓ)	3,9 m
Diámetro conductor de malla (2/0 AWG)	0,009266 m
Resistividad del suelo (ρ)	49 Ωm
Resistividad del cobre (ρ_{cu})	$1{,}7241 \cdot 10^{-8}$ Ωm
Conductividad del cobre (σ_{cu})	$5{,}80 \cdot 10^{7}$ S/m
Permeabilidad del vacío (μ_0)	$4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m
Permitividad del vacío (ε_0)	$8{,}85 \cdot 10^{-12}$ F/m
Permitividad relativa tierra húmeda (ε_r)	30 $(-)$

Tabla 5.1: Principales variables físicas requeridas para la obtención de los parámetros concentrados del modelo para conductor horizontal.

Coeficiente	Magnitud
R_{cond}	0,0040 Ω
L_{cond}	$2{,}9183 \cdot 10^{-3}$ mH
C_{cond}	$8{,}6945 \cdot 10^{-4}$ μF
G_{cond}	0,0668 S
R_t	14,9629 Ω
α_c	No aplica

Tabla 5.2: Resumen de parámetros concentrados requeridos por el modelo para conductor horizontal.

Es importante señalar que el modelo de conductor horizontal presentado incorpora un coeficiente de impulso que, tal como se indica en la Tabla 5.2, no ha sido considerado.

El coeficiente de impulso permite representar la variación de la resistencia de puesta a tierra bajo condiciones transitorias y depende de factores como la geometría del sistema, la resistividad del suelo y la magnitud de la corriente impulsiva [19]. Considerando que el sistema analizado presenta dimensiones moderadas, una baja resistividad del suelo y que las corrientes impulsivas empleadas en este trabajo son relativamente reducidas (al representar los impulsos generados por un generador de tensión y no descargas directas de rayo), es razonable asumir que dicho coeficiente se mantiene cercano a la unidad. En consecuencia, su efecto puede despreciarse sin afectar de manera significativa la representación del comportamiento global del sistema de puesta a tierra bajo las condiciones de ensayo consideradas.

5.1.2. Análisis de resultados

5.1.2.a. Evaluación de la resistencia del sistema de puesta a tierra

La resistencia de puesta a tierra se define como la relación entre el potencial del sistema y la corriente que fluye hacia el suelo a través de este, la cual depende de las características del terreno y del tamaño y forma del sistema de puesta a tierra [19].

Puesto que el modelo de parámetros concentrados planteado para este análisis involucra las características del suelo y la geometría de la malla del laboratorio de alta tensión, se

plantea determinar la resistencia de puesta a tierra teórica mediante la inyección de una corriente continua de 1 A en uno de los nodos del modelo (Nodo 42), midiendo la tensión resultante respecto a tierra (ver Figura 5.1). Este procedimiento se basa directamente en la definición de resistencia visto, como la razón entre el potencial y la corriente, permitiendo obtener la resistencia equivalente del sistema.

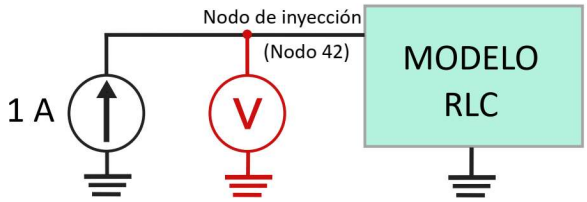


Figura 5.1: Medición de la resistencia del sistema de puesta a tierra por medio de simulación en ATPDraw para estado estacionario en modelo de parámetros concentrados (RLC). Elaboración propia.

Lo que permite llegar al siguiente valor simulado de resistencia:

$$R_{SPT-Simulado} = \frac{V_{fuente}}{I_{fuente}} = \frac{0{,}3606\ (V)}{1\ (A)} \approx 0{,}36\ (\Omega) \tag{5.1}$$

Al contrastar este resultado con el valor de resistencia del sistema de puesta a tierra obtenido de manera experimental (0.38 Ω), se observa una buena concordancia entre ambos, con una diferencia aproximada del 5.6 %. Este resultado es relevante, ya que, el valor experimental incluye también la contribución de otros elementos de conexión asociados al sistema de puesta a tierra. Aun así, el modelo RLC propuesto permite evidenciar que la resistencia del sistema principal sigue siendo el componente dominante, lo que valida la consistencia del modelo al menos en el dominio de baja frecuencia.

Por lo tanto, este resultado permite concluir que, pese a la antigüedad del sistema de puesta a tierra, este aún presenta un valor de resistencia consistente con su geometría y acorde con lo recomendado por la normativa [4].

5.1.2.b. Respuesta en frecuencia del sistema de puesta a tierra

La caracterización experimental en alta frecuencia del sistema de puesta a tierra incluyó la determinación de su impedancia. Con el objetivo de reproducir este comportamiento mediante el modelo RLC propuesto, se analiza su respuesta en frecuencia.

Para ello, se implementa en ATPDraw el esquema de simulación presentado en la Figura 5.2. Este esquema contempla tres ensayos independientes (A, B y C), en los cuales se inyecta una corriente unitaria mediante una fuente sinusoidal de 50 Hz en cada uno de los puntos seleccionados del sistema de puesta a tierra, midiendo la tensión resultante en el mismo nodo. Esta configuración permite que, al realizar un barrido en frecuencia en ATPDraw, el programa mantenga la inyección unitaria y entregue directamente la tensión como respuesta del sistema en el rango de frecuencias analizado, lo que equivale a la impedancia en el punto de inyección.

El análisis considera un rango de frecuencia entre 10 Hz y 10 GHz, con el objetivo de evaluar el comportamiento del sistema frente a posibles perturbaciones de alta frecuencia.

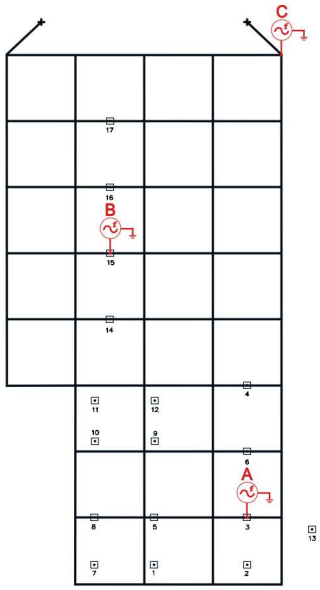


Figura 5.2: Puntos de inyección en el modelo de parámetros concentrados (RLC). Elaboración propia.

La Figura 5.3 presenta la respuesta en frecuencia de la magnitud de la impedancia del sistema de puesta a tierra, mientras que la Figura 5.4 muestra la evolución del ángulo de dicha impedancia. Se observa que, para los tres puntos de inyección, la impedancia máxima es prácticamente coincidente, alcanzando un valor cercano a 20 Ω alrededor de los 5 MHz. Asimismo, los puntos A y B presentan respuestas prácticamente idénticas, mientras que el punto C muestra un leve adelanto en la frecuencia de resonancia. Esta diferencia puede atribuirse a la distinta ubicación del punto de inyección dentro de la geometría de la malla, lo que modifica ligeramente la impedancia equivalente observada por la fuente.

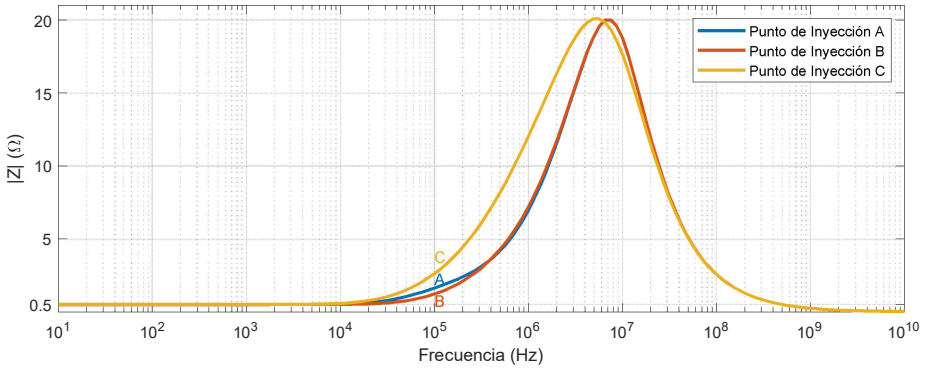


Figura 5.3: Respuesta en frecuencia de la magnitud de la impedancia del sistema de puesta a tierra obtenida mediante simulación en ATPDraw.

Las tres curvas presentan un comportamiento resonante, caracterizado por un incremento de la impedancia hasta un valor máximo, seguido de una disminución a frecuencias superiores. Este fenómeno se explica por la interacción entre los efectos inductivos y capacitivos del sistema: la inductancia domina a bajas frecuencias, mientras que la capacitancia adquiere mayor relevancia a altas frecuencias. Lo anterior se evidencia al contrastar estos

resultados con la evolución del ángulo de la impedancia mostrada en la Figura 5.4, donde se observa que hasta aproximadamente 5 MHz el sistema presenta un comportamiento predominantemente inductivo. En cambio, para frecuencias superiores, una vez alcanzada la condición de resonancia, la respuesta pasa a ser predominantemente capacitiva.

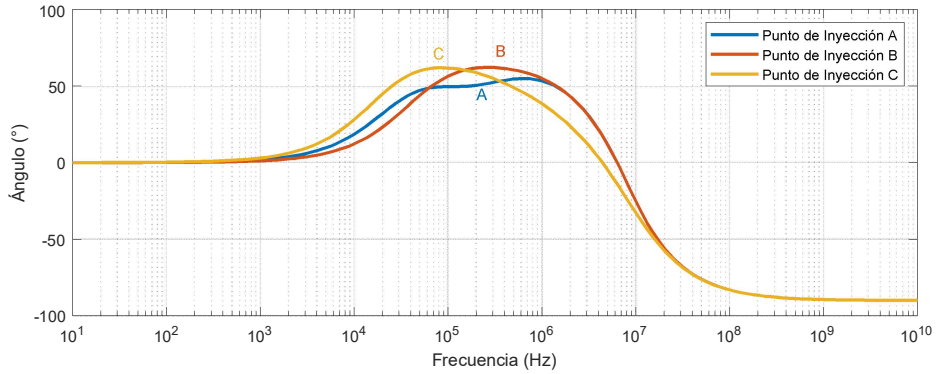


Figura 5.4: Respuesta en frecuencia del ángulo de la impedancia del sistema de puesta a tierra obtenida mediante simulación en ATPDraw.

Por otro lado, tal como se indicó en el Capítulo 4, las limitaciones asociadas a la configuración experimental empleada impidieron obtener una caracterización adecuada de la magnitud de la impedancia del sistema de puesta a tierra, por lo que no es posible realizar una comparación cuantitativa directa entre los resultados experimentales y los obtenidos mediante la respuesta en frecuencia. No obstante, las mediciones realizadas permitieron verificar el buen estado general del sistema, particularmente desde el punto de vista de la continuidad y calidad de sus conexiones internas, lo que permite complementar el análisis mediante los resultados proporcionados por el modelo propuesto.

En este sentido, resulta relevante señalar que gran parte de los ensayos impulsivos realizados en el laboratorio de alta tensión utilizan el impulso normalizado 1,2/50 μs. De acuerdo con la literatura, la mayor parte del contenido espectral asociado a este tipo de impulso se concentra por debajo de 2 MHz [5]. Al contrastar este antecedente con la respuesta en frecuencia obtenida, se observa que, dentro de dicho rango, la magnitud de la impedancia del sistema permanece por debajo de aproximadamente 15 Ω. Esto sugiere que, frente a impulsos de este tipo, el sistema de puesta a tierra operaría principalmente fuera de la región de resonancia, donde la impedancia presenta valores considerablemente menores. En consecuencia, es esperable que el sistema exhiba un comportamiento transitorio favorable durante la realización de este tipo de ensayos.

5.1.2.c. Potenciales transitorios en el sistema de puesta a tierra

Considerando el estudio de potenciales transitorios presentado en el Capítulo 4, se propone utilizar el modelo RLC desarrollado para reproducir una configuración de ensayo equivalente a la empleada experimentalmente.

Las Figura D.1 y Figura D.2 del Apéndice D presentan los esquemas de conexión utilizados para las pruebas con y sin ruptura dieléctrica, respectivamente. En primer lugar, es importante destacar la fuente empleada para representar el generador de impulsos utilizado durante la caracterización experimental. Esta se implementa mediante un *Model*

programado a partir de la función de Heidler, presentada previamente en el Capítulo 2, cuyo código se incluye en el Apéndice C. Dicho Model genera la forma de onda del impulso y se conecta a una fuente flotante del tipo $CTRL\_VOLT$, encargada de convertir la señal calculada en una fuente de tensión equivalente.

Esta configuración resulta particularmente relevante debido a que, en el montaje experimental, tanto el terminal de inyección como el de retorno del generador de impulsos se conectan a una misma referencia física. En el modelo propuesto, dicha referencia corresponde al Nodo 6 del circuito RLC, seleccionado por ser el más próximo a la cámara $N°$ 5, utilizada como punto de referencia durante los ensayos.

A primera vista, podría suponerse que el modelo computacional debería reproducir exactamente esta conexión, ubicando los terminales de inyección y retorno en un mismo nodo. Sin embargo, la conexión física real no es ideal, ya que los conductores utilizados durante los ensayos poseen una impedancia asociada que introduce una diferencia de potencial medible entre distintos puntos del sistema. Por esta razón, si ambos terminales se conectaran exactamente al mismo nodo en la simulación, las tensiones diferenciales obtenidas serían nulas, impidiendo representar adecuadamente el comportamiento observado experimentalmente.

Con el fin de incorporar este efecto en el modelo, se decidió particionar la impedancia del segmento (Z_{seg}) más cercano al punto de inyección mediante una distribución de 40/60 %, tal como se muestra en la Figura D.1 y Figura D.2. Esta aproximación permite representar de manera más realista la impedancia asociada a las conexiones físicas del ensayo y obtener niveles de tensión diferencial comparables a los registrados experimentalmente.

Además, debe notarse que ambos modelos incorporan una impedancia de inyección (Z_{in}). Esta impedancia representa el efecto combinado de la impedancia interna del generador de impulsos y de los conductores asociados a la configuración experimental, los cuales limitan la corriente efectivamente inyectada al sistema. Este aspecto resulta relevante, ya que la magnitud de la corriente inyectada es uno de los principales factores que determinan la elevación de potencial en la malla de puesta a tierra. Por esta razón, se ha incorporado una impedancia equivalente, modelada principalmente mediante su componente resistiva, cuyo valor fue ajustado mediante iteraciones sucesivas hasta obtener una corriente máxima cercana al promedio de las corrientes registradas experimentalmente para los ensayos con ruptura dieléctrica (aproximadamente 103 A). Si bien en un generador de impulsos de tensión la corriente depende de la impedancia total del circuito, esta aproximación se considera adecuada para los fines del presente análisis, ya que únicamente se busca reproducir el valor máximo de corriente observado y no la forma temporal exacta de la señal.

Por otro lado, en el modelo sin ruptura dieléctrica (ver Figura D.2) se empleó un modelo de aislador constituido por una resistencia (R_0) y una capacitancia (C_0), extraído de la literatura [37]. En particular, el valor de la resistencia se obtuvo directamente de la referencia consultada, correspondiendo a 19 $M\Omega$. En cambio, la capacitancia fue determinada mediante un proceso iterativo, con el objetivo de reproducir una corriente máxima similar a la observada experimentalmente para esta condición (aproximadamente 12.3 A). Como resultado, se obtuvo una capacitancia equivalente cercana a 1400 pF.

Considerando la configuración mencionada, se obtienen las tensiones diferenciales presentadas en la Figura 5.5 y en la Figura 5.6 para pruebas con y sin ruptura respectivamente.

Al contrastar las tensiones diferenciales simuladas con las obtenidas experimentalmente, se observa en primera instancia que, en la mayoría de los casos, los valores simulados tienden a ser ligeramente superiores a los medidos, salvo algunas excepciones puntuales[7]. Este comportamiento es consistente con la elevación de potencial esperada para la corriente inyectada y la geometría de diseño del sistema de puesta a tierra.

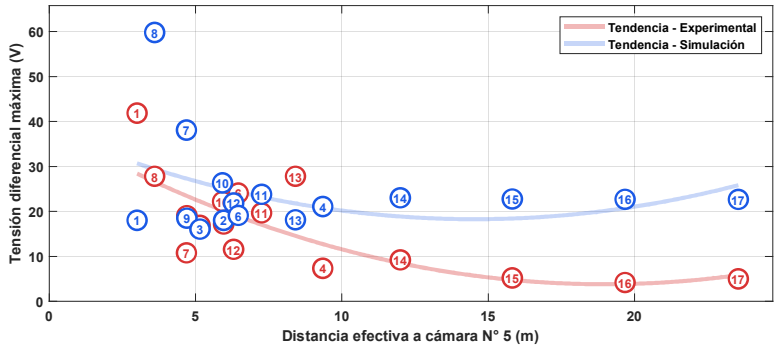


Figura 5.5: Tensión diferencial máxima simulada para pruebas con ruptura dieléctrica, en función de la distancia efectiva respecto a la cámara de referencia.

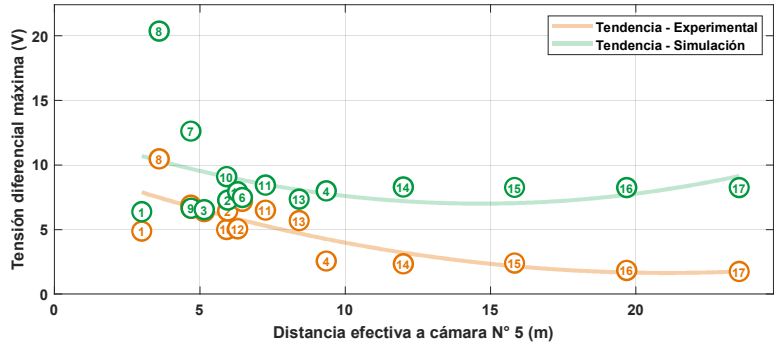


Figura 5.6: Tensión diferencial máxima simulada para pruebas sin ruptura dieléctrica, en función de la distancia efectiva respecto a la cámara de referencia.

Asimismo, a pesar de la variabilidad observada entre distintas cámaras, las tendencias generales resultan similares en ambos casos. La principal discrepancia se presenta en las últimas cuatro cámaras, correspondientes a aquellas más alejadas del punto de inyección, las cuales, como se ha mencionado previamente, presentan un nivel de corrosión severo. Esta condición podría explicar la disminución significativa de las tensiones medidas en dichas ubicaciones, debido a una degradación del contacto eléctrico durante la medición.

Por otra parte, la Figura 5.7 y la Figura 5.8 presentan un resumen gráfico de la impedancia de impulso Z_1 para ambos ensayos.

[7]Es esperable que exista cierta discrepancia entre los resultados simulados y experimentales, especialmente en algunas cámaras específicas. Esto se debe a que, en el modelo de simulación, la ubicación de las cámaras ha sido aproximada al segmento intermedio o al nodo más cercano dentro de la malla equivalente. Esta simplificación se realiza debido a que, en la práctica, no se conoce con exactitud la conexión geométrica y eléctrica de cada cámara respecto a la malla de puesta a tierra.

De forma análoga, la Figura 5.9 y la Figura 5.10 presentan un resumen gráfico del parámetro Z_3.

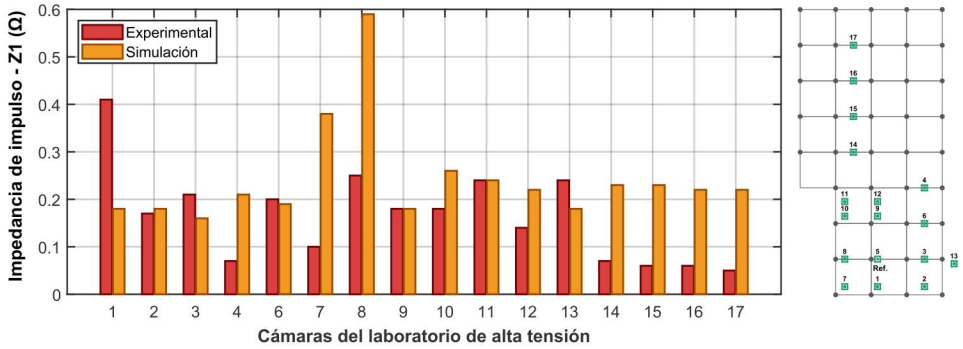


Figura 5.7: Comparación de la impedancia de impulso Z1 obtenida experimentalmente y mediante simulación para ensayos con ruptura dieléctrica.

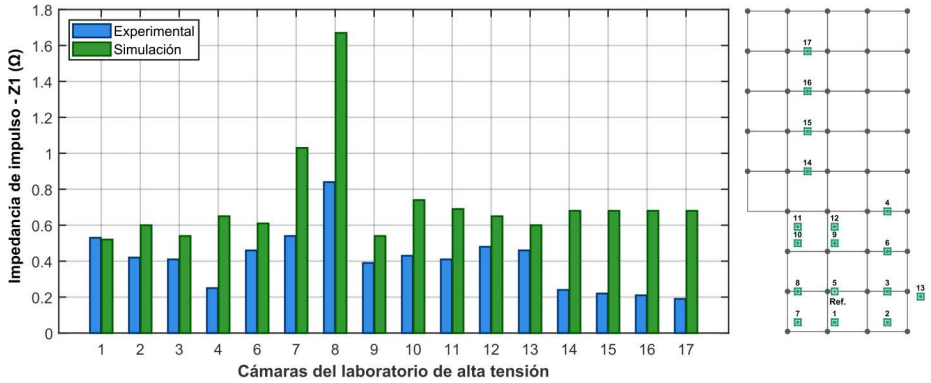


Figura 5.8: Comparación de la impedancia de impulso Z1 obtenida experimentalmente y mediante simulación para ensayos sin ruptura dieléctrica.

Estos parámetros surgen como una forma de normalizar los valores de tensión registrados [5] [27], debido a las variaciones en la corriente de inyección. En el contexto de la simulación, este procedimiento pierde parte de su interpretación física, ya que la corriente inyectada se mantiene constante. No obstante, dichos parámetros se han determinado para facilitar la comparación aquí presentada.

Así, los resultados muestran que para la impedancia de impulso Z_1, la simulación tiende a sobrestimar los valores en gran parte de las cámaras, especialmente en aquellas cercanas al punto de inyección y retorno de corriente. Sin embargo, el orden de magnitud se mantiene cercano al experimental, lo que permite validar, como se indicó en el Capítulo 4, que la impedancia transitoria entre una cámara de referencia y otra del laboratorio no debería superar aproximadamente 1 Ω, alcanzando en casos críticos valores del orden de 2 Ω, tal como se observa en la Figura 5.8.

Finalmente, respecto al parámetro Z_3 (Figura 5.9 y Figura 5.10), se observa buena concordancia en el caso con ruptura dieléctrica, mientras que existe una discrepancia significativa en la condición sin ruptura, probablemente debido a la simplificación del modelo del aislador mediante una representación que no captura completamente su comportamien-

to real, ocasionando diferencias notables respecto a lo obtenido de manera experimental.

Aun así, dado que este parámetro está asociado al grado de comportamiento inductivo del sistema [5], los resultados confirman que, en el caso con ruptura dieléctrica (escenario más crítico en términos de elevación de potencial) el sistema mantiene niveles de impedancia relativamente bajos, sin comprometer de manera significativa su desempeño.

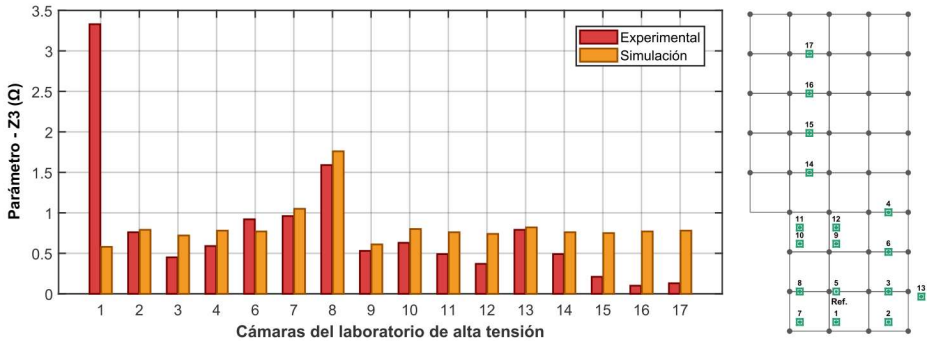


Figura 5.9: Comparación del parámetro Z3 obtenido experimentalmente y mediante simulación para ensayos con ruptura dieléctrica.

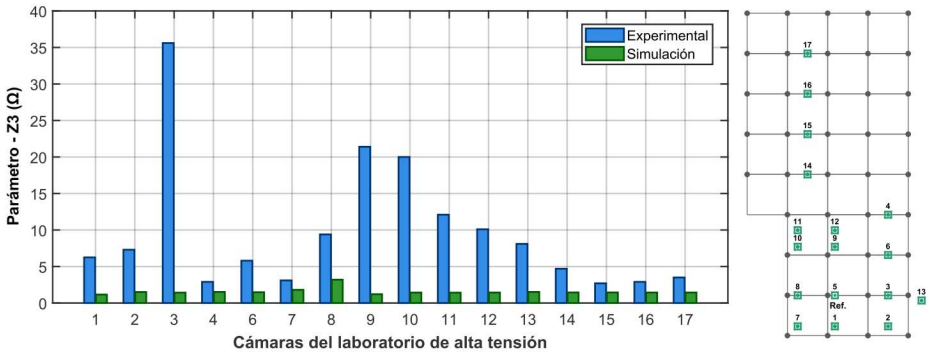


Figura 5.10: Comparación del parámetro Z3 obtenido experimentalmente y mediante simulación para ensayos sin ruptura dieléctrica.

De esta manera, los análisis presentados permiten concluir que el sistema de puesta a tierra en estudio exhibe un comportamiento adecuado y coherente con las características de su geometría. En consecuencia, es posible descartar, en gran medida, la hipótesis de que el sistema presente defectos o características anómalas que favorezcan elevaciones excesivas del potencial de tierra durante los ensayos de impulso. No obstante, ello no excluye la posibilidad de que el sistema contribuya al fenómeno de interferencia observado como consecuencia de su respuesta natural frente a la excitación impulsiva aplicada. En este sentido, los resultados muestran que los puntos de la malla próximos al punto de inyección tienden a registrar los mayores potenciales durante la circulación de la corriente impulsiva.

Capítulo 6

Sobretensiones transitorias en la red de baja tensión

La principal manifestación de interferencia electromagnética analizada en esta memoria corresponde a las sobretensiones transitorias que se generan en la red de baja tensión del laboratorio de alta tensión. En consecuencia, esta sección presenta tanto la caracterización experimental de dichas sobretensiones como el desarrollo de una simulación transitoria asociada, con el propósito de corroborar su existencia e identificar los posibles mecanismos de acoplamiento involucrados en su generación.

6.1. Evaluación experimental de la sobretensión transitoria

Con el objetivo de caracterizar la magnitud y forma de onda de las sobretensiones transitorias generadas en la red de baja tensión del laboratorio durante la realización de ensayos de impulso de alta tensión, se propone la configuración presentada en la Figura 6.1.

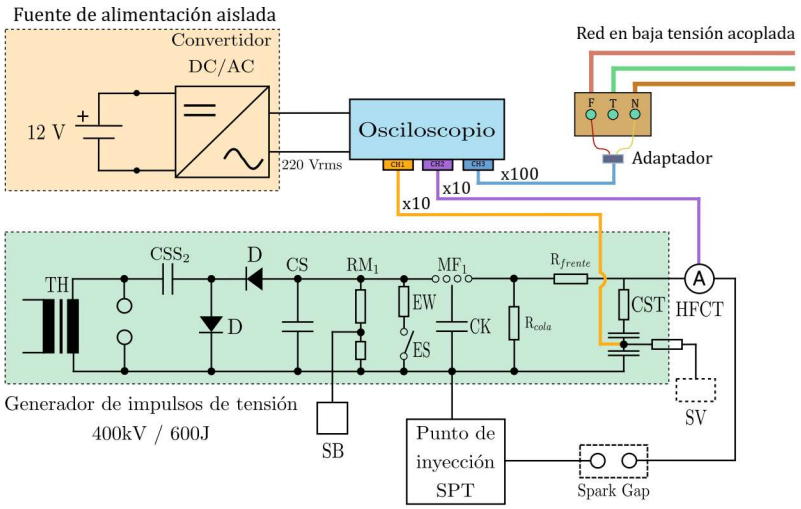


Figura 6.1: Configuración experimental empleada para la medición de sobretensiones transitorias en tomacorrientes de la red de baja tensión del laboratorio.

Esta configuración se compone principalmente de un generador de impulsos de alta tensión HAEFELY de 400 kV y 600 J, conectado a un spark gap que permite realizar ensayos con ruptura dieléctrica a una tensión previamente controlada. Adicionalmente, se emplea una fuente de alimentación aislada constituida por una batería de 12 V y un

convertidor DC/AC para energizar el osciloscopio de medición. Tal como se indicó anteriormente, esta disposición permite evitar la circulación de posibles corrientes de retorno que podrían dañar el equipo de medida.

La corriente inyectada se registra mediante un transformador de corriente de alta frecuencia Pearson, modelo 150 [13]. Por su parte, la tensión se mide entre fase y neutro en los tomacorrientes asociados a los tableros bajo estudio, utilizando una punta de tensión con factor de atenuación x100 y un ancho de banda de 20 MHz, conectada mediante un adaptador enchufe - BNC.

Para registrar las sobretensiones transitorias presentes en la red de baja tensión, el osciloscopio se configura utilizando como señal de disparo (trigger) el canal 1, correspondiente a la medición de la tensión de salida del generador de impulsos a través de su respectivo divisor capacitivo.

La Figura 6.2 presenta un esquema general de la zona de ensayos del laboratorio utilizada para realizar estas mediciones. En particular, las sobretensiones transitorias se registran en dos tableros: TDF-2 y TDF-7, siendo este último el tablero general del laboratorio.

Es importante destacar que ambos tableros se encuentran interconectados mediante canalizaciones subterráneas construidas con tuberías PVC Conduit de 3". Este aspecto resulta relevante, ya que mediciones realizadas previamente indican que dichas canalizaciones se encuentran a una profundidad aproximada de 20 cm respecto al nivel del suelo. Considerando la profundidad a la que se encuentra instalado el sistema de puesta a tierra, puede estimarse que la separación entre ambas estructuras es del orden de 30 cm. Esta proximidad constituye un indicio importante respecto de los posibles mecanismos de acoplamiento electromagnético presentes durante la realización de los ensayos, particularmente aquellos asociados a fenómenos de inducción y acoplamiento capacitivo.

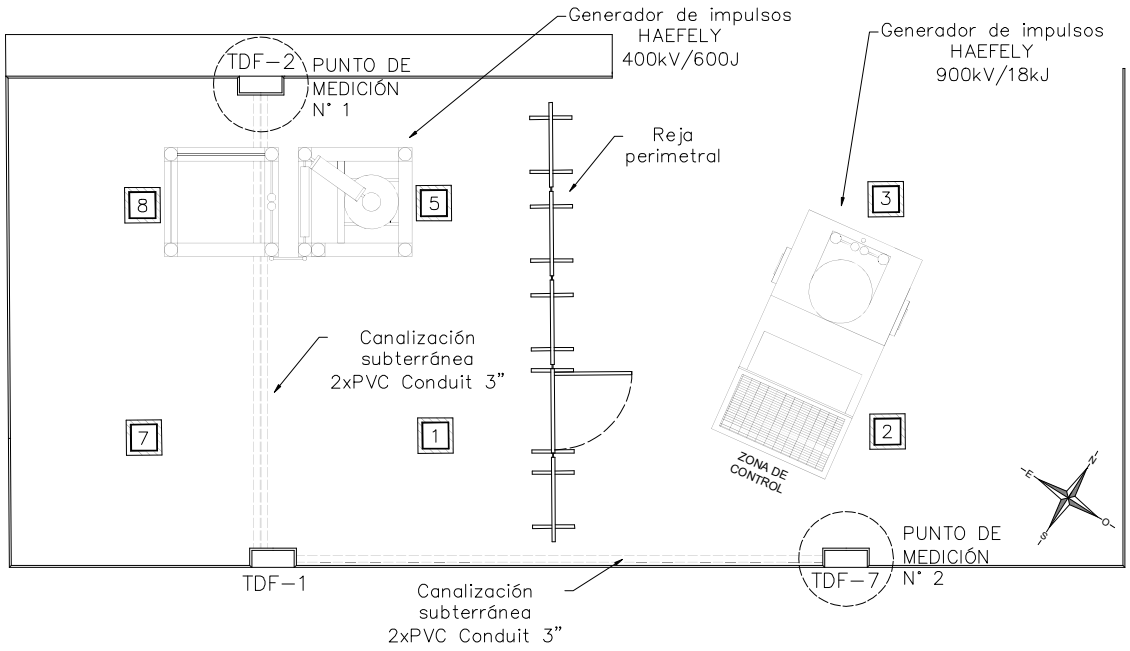


Figura 6.2: Zona de ensayos del laboratorio utilizada para la medición de sobretensiones en la red de baja tensión. Elaboración propia.

Los ensayos con ruptura dieléctrica realizados a distintos niveles de tensión dieron lugar a resultados como los presentados en la Tabla 6.1, donde se muestran cuatro registros de sobretensión correspondientes a cada uno de los tableros analizados.

Asimismo, la Figura 6.3 presenta la forma de onda del impulso de tensión aplicado durante los ensayos, junto con la corriente registrada. Este impulso presenta un tiempo de frente cercano a 1,55 μs y una cola del orden de 60 μs; sin embargo, esta última se encuentra distorsionada debido a la interrupción asociada a la ruptura dieléctrica en el spark gap empleado.

Medición	**Tensión máxima de impulso**	**Corriente máxima de impulso**	**Duración del evento**	**Máxima sobretensión**	**% V_n**
TDF - 2					
1	13562 V	113 A	60 μs (*)	394 V	127 %
2	39922 V	219 A		930 V	299 %
3	59609 V	325 A		1289 V	414 %
4	62891 V	319 A		1329 V	427 %
TDF - 7					
1	10062 V	84 A	60 μs (*)	586 V	188 %
2	11812 V	101 A		685 V	220 %
3	14438 V	99 A		766 V	246 %
4	19688 V	118 A		836 V	269 %
(*) La resolución temporal del registro analizado fue de 20 μs entre muestras consecutivas. En consecuencia, la duración estimada del transitorio ($\approx$ 60 μs) debe interpretarse como una aproximación de orden de magnitud, limitada por la discretización temporal del sistema de adquisición.					

Tabla 6.1: Resumen de las mediciones de tensión Fase–Neutro realizadas para la evaluación de sobretensiones transitorias en los tableros TDF-2 y TDF-7.

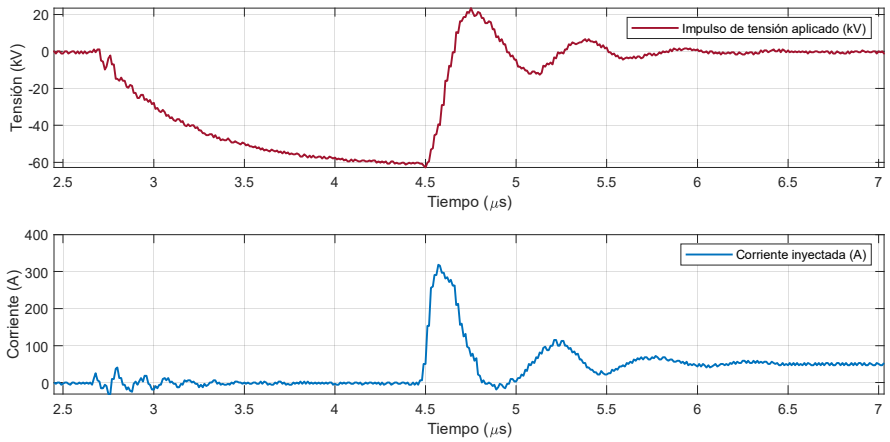


Figura 6.3: Impulso de tensión aplicado y corriente de inyección para prueba de sobretensión en tablero cercano al generador de impulsos (TDF-2).

Respecto de las mediciones presentadas, es importante considerar que la magnitud de la sobretensión ha sido determinada a partir del valor máximo de la forma de onda

registrada respecto del eje horizontal en cero. En otras palabras, la sobretensión se reporta eliminando cualquier desplazamiento (offset) asociado a la señal medida. Por otra parte, para la estimación de la duración relativa del transitorio en términos de ciclos de red, se privilegió el registro obtenido en el punto de medición más alejado, dado que este conserva de forma más explícita la referencia temporal respecto de la componente fundamental de 50 Hz, lo que permitió estimar una duración del transitorio cercana a 60 μs.

Es importante destacar que el aumento de la tensión de impulso aplicada también genera un incremento significativo de la sobretensión medida, alcanzando valores superiores al 427 % respecto del valor máximo de la tensión nominal a 50 Hz para el nivel de prueba más alto utilizado. Este resultado es particularmente relevante, considerando que, como se indicó en el Capítulo 3, el generador HAEFELY empleado puede alcanzar tensiones de hasta 400 kV, lo que sugiere que, bajo condiciones de operación a este nivel, podrían generarse sobretensiones transitorias aún mayores y potencialmente peligrosas tanto para las personas como para los equipos sensibles.

De este modo, la Figura 6.4 presenta la magnitud y la forma de onda asociada a la sobretensión más elevada registrada en el tomacorriente del tablero TDF-2, el cual corresponde al punto de medición más cercano al generador utilizado en las pruebas. La figura se muestra tanto en escala referida a la componente de 50 Hz como en una escala ampliada del fenómeno transitorio. En este caso, la sobretensión registrada corresponde a un transitorio oscilatorio amortiguado, caracterizado por un impulso inicial de elevada amplitud seguido de una respuesta oscilatoria decreciente en el tiempo. Este comportamiento sugiere la presencia de fenómenos resonantes asociados a la interacción entre los elementos inductivos y capacitivos presentes en la instalación eléctrica.

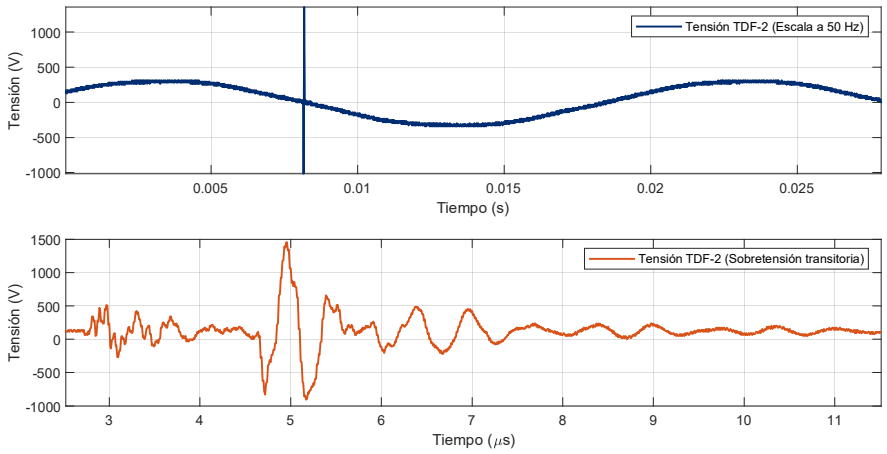


Figura 6.4: Sobretensión transitoria registrada en tablero TDF-2 durante medición de tensión Fase–Neutro en tomacorriente lateral asociado al tablero.

En consecuencia, los resultados experimentales permiten verificar la presencia de sobretensiones transitorias en los tomacorrientes de la instalación de baja tensión del laboratorio durante la ejecución de ensayos de impulso. Aunque no es posible establecer de manera definitiva el mecanismo responsable de su generación, los antecedentes obtenidos sugieren que estas sobretensiones podrían originarse a partir de diversos fenómenos de acoplamiento presentes entre el sistema de ensayo y la instalación eléctrica, favoreciendo la transferencia de perturbaciones transitorias hacia los circuitos de baja tensión.

6.2. Análisis de sobretensión transitoria por medio de simulaciones computacionales

Dado que ya se dispone de una caracterización preliminar del tipo y la forma de las sobretensiones transitorias presentes en los tomacorrientes de la instalación de baja tensión durante la realización de ensayos de impulso, surge la necesidad de analizar los posibles mecanismos y tipos de acoplamiento responsables de su aparición. Con este propósito, a continuación se presenta un modelo transitorio desarrollado en ATPDraw, orientado a evaluar las distintas vías de propagación que podrían estar contribuyendo a la generación de esta perturbación.

6.2.1. Morfología de simulación

Como se indicó previamente, la zona de ensayos del laboratorio de alta tensión se encuentra conformada por diversos tableros eléctricos, cuya interconexión se realiza mediante diferentes sistemas de canalización. Particularmente, se emplea conduit de acero galvanizado (C.A.G.) en parte de la instalación, mientras que las canalizaciones subterráneas se ejecutan mediante PVC Conduit de 3". Con el fin de ilustrar esta disposición, la Figura 6.5 muestra una representación tridimensional aproximada de la instalación, enfocada en el área donde se ubica el generador de impulsos HAEFELY de 400 kV y 600 J.

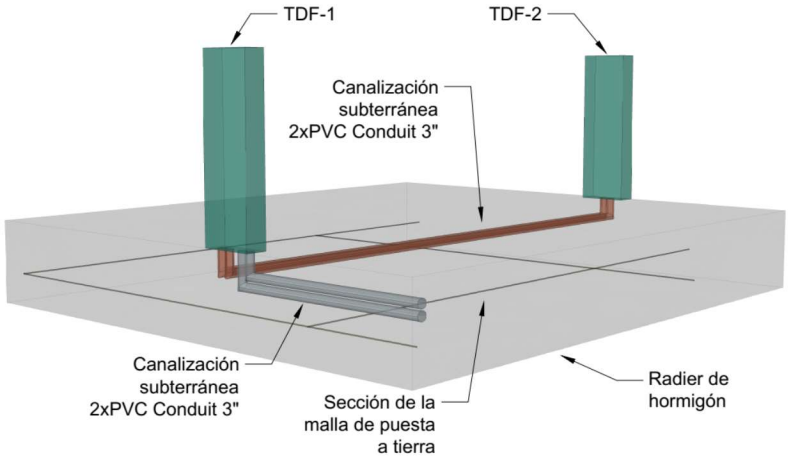


Figura 6.5: Representación tridimensional simplificada del sistema de puesta a tierra y canalizaciones del laboratorio, utilizada como base para el modelado de sobretensiones. Elaboración propia.

En términos generales, el esquema muestra que la separación entre el PVC Conduit y los conductores de la malla de puesta a tierra es reducida, alcanzando aproximadamente 30 cm en algunos sectores. Esta proximidad resulta relevante desde el punto de vista electromagnético, ya que los conductores alojados en el PVC Conduit no disponen del apantallamiento que proporcionaría un conduit de acero galvanizado (C.A.G.) correctamente aterrizado. En consecuencia, podrían quedar expuestos a fenómenos de acoplamiento inductivo y capacitivo originados por las elevaciones transitorias de potencial presentes en el sistema de puesta a tierra durante los ensayos de impulso. Debido a ello, este posible mecanismo de propagación constituye un aspecto clave a evaluar y define uno de los principales

puntos de partida para el modelamiento transitorio desarrollado en esta investigación.

En primera instancia, debe considerarse que el fenómeno bajo estudio corresponde a un problema tridimensional complejo que, para una representación rigurosa de todos los mecanismos de acoplamiento electromagnético involucrados, requeriría el empleo de técnicas de simulación basadas en elementos finitos. Sin embargo, debido a la extensión del problema y a la necesidad de incorporar el comportamiento dependiente de la frecuencia de múltiples elementos de la instalación, se opta por utilizar el modelo de parámetros concentrados RLC descrito en el Capítulo 5. Bajo este enfoque, la Figura 6.6 presenta una vista superior del tramo de canalización subterránea considerado en el estudio[8].

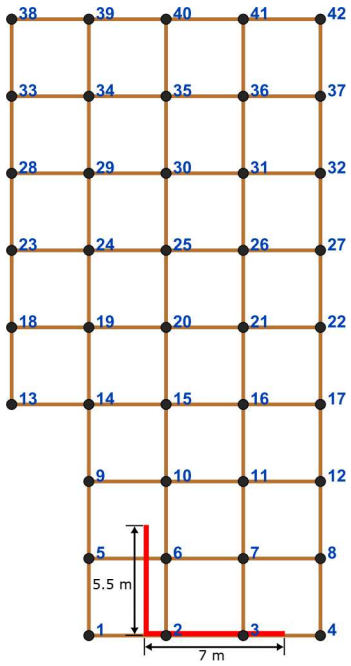


Figura 6.6: Vista superior de la canalización subterránea cercana a la zona de ensayos principal. Elaboración propia.

Como puede observarse, la canalización inicia su recorrido en el tablero general TDF-7, continúa hacia el tablero TDF-1 a través de un tramo de aproximadamente 7 m y finaliza en el tablero TDF-2, ubicado en las cercanías del generador de impulsos, mediante un tramo adicional de 5.5 m. No obstante, resulta importante destacar que, a lo largo de gran parte de este trayecto, la canalización se encuentra en estrecha proximidad con diversos segmentos de la malla de puesta a tierra.

Considerando esta configuración, y dado que la teoría clásica de campos electromagnéticos establece que el flujo magnético enlazado entre conductores es máximo cuando estos se disponen en forma paralela y mínimo cuando se cruzan perpendicularmente [35], se propone desarrollar un modelo basado en el análisis por tramos de los mecanismos de acoplamiento e inducción. Para ello, los dos segmentos de canalización representados en la Figura 6.6 se subdividen en cinco tramos, cada uno de los cuales se modela en función del

[8]**Nota:** El análisis se limita al tramo de canalización subterránea considerado en este estudio. No obstante, es importante señalar que en otras áreas del laboratorio existen canalizaciones similares que no han sido incorporadas al modelo, por lo que sus posibles efectos no se encuentran representados en los resultados obtenidos.

segmento de la malla de puesta a tierra paralelo más próximo, con el fin de representar de manera más realista el acoplamiento electromagnético existente entre ambas estructuras.

En consecuencia, se plantea el modelo aproximado de simulación transitoria mostrado en la Figura 6.7. En el cual, los cinco tramos previamente definidos son representados mediante modelos *LCC* ajustados de acuerdo con las características geométricas de cada segmento. A su vez, cada uno de estos modelos es excitado mediante una fuente de corriente dependiente[9], cuya forma de onda corresponde a la corriente medida en el segmento paralelo de la malla de puesta a tierra asociado. De esta manera, cada tramo de canalización modelado considera explícitamente la corriente real que circula por el conductor de la malla más próximo[10], permitiendo representar de forma más realista los fenómenos de acoplamiento electromagnético presentes en la instalación.

Sin embargo, para que esta representación sea físicamente consistente, no basta con considerar únicamente la amplitud y la forma de onda de las corrientes medidas. También resulta necesario incorporar su sentido de circulación, ya que este determina si los acoplamientos inductivos producidos por distintos segmentos contribuyen de manera aditiva o sustractiva a la tensión inducida total. Por esta razón, se realizó previamente un análisis de la dirección de las corrientes en cada tramo de la malla de puesta a tierra considerado en el modelo. En particular, se adoptó como referencia positiva aquella corriente cuyo sentido de circulación coincide con el recorrido de la canalización, desde el tablero general TDF-7 hacia el tablero TDF-2.

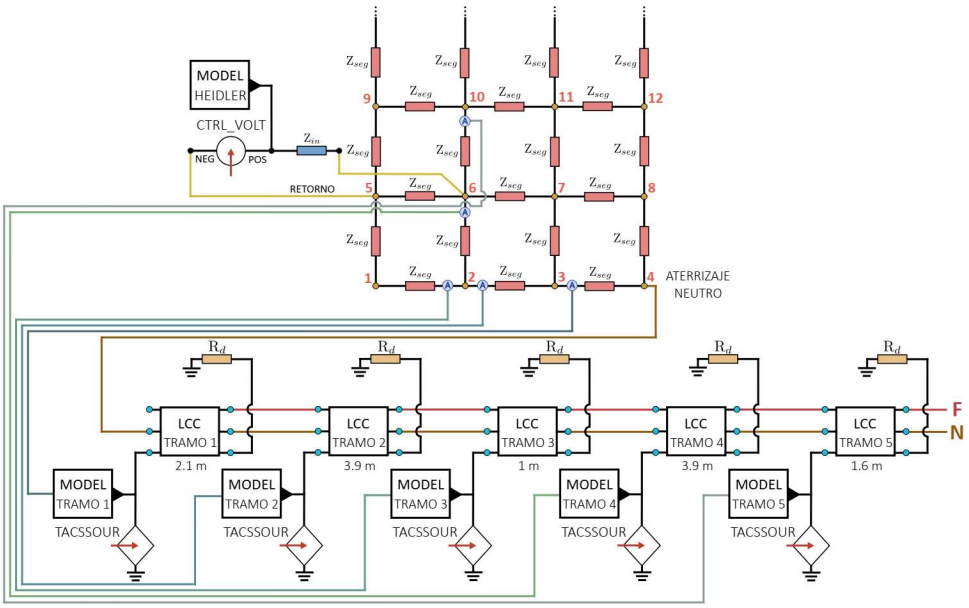


Figura 6.7: Esquema general de simulación por segmentos propuesto para análisis de sobretensión. . Elaboración propia.

Para la inyección del impulso de tensión, se utiliza nuevamente la fuente de Heidler implementada mediante *Model*, ya empleada en el Capítulo 5 y configurada para un im-

[9]Se debe notar que la fuente se conecta a tierra mediante la resistencia R_d de 1 $\mu\Omega$, la cual actúa como un cortocircuito prácticamente ideal sin generar problemas numéricos en la simulación.

[10]La medición de corriente se realiza indirectamente mediante la medición de la tensión en la resistencia asociada a las impedancias de los respectivos segmentos. Posteriormente, esta señal de tensión es procesada y convertida a corriente mediante un bloque implementado en *Model*.

pulso de 1.2/50 μs. Tal que su impedancia de inyección se ajusta a un valor de 210 Ω, con el fin de reproducir una corriente de inyección de amplitud equivalente a la obtenida experimentalmente (319 A), correspondiente al nivel máximo de tensión de impulso aplicado de 62.891 V, presentado en la Tabla 6.1 de la sección experimental.

En la etapa de medición, los modelos LCC consideran dos conductores paralelos separados entre sí por una distancia de 6 cm y ubicados a 30 cm del segmento de la malla de puesta a tierra asociado. Estos conductores representan un sistema monofásico convencional, en el cual se modela la fase en condición abierta y el neutro conectado a tierra en el nodo 4 del modelo RLC. Esta condición se justifica debido a la presencia del transformador de 75 kVA que alimenta el laboratorio de alta tensión, por lo que se asume que el neutro se encuentra efectivamente puesto a tierra en una zona cercana a dicho punto de alimentación.

Respecto a la orientación espacial de los conductores de fase y neutro en relación con el segmento inductor de la malla, en el primer tramo de 7 m estos se encuentran alineados con el eje horizontal de referencia (eje en cero). En cambio, en el tramo de 5.5 m, dichos conductores se desplazan aproximadamente 1 m hacia la izquierda del segmento inductor, de acuerdo con la disposición geométrica real de la instalación.

Finalmente, en relación con la configuración de los bloques LCC, es relevante mencionar que estos se definen mediante la implementación de cables unipolares (*Single Core Cable*) dispuestos en configuración de tierra *(ground)*, considerando una resistividad del terreno de 49 Ωm, tal como se presentó en el Capítulo 4. Para la representación electromagnética de los conductores se selecciona el modelo JMarti para tres cables y tres fases.

En cuanto a la parametrización de los conductores, el tramo asociado al segmento de malla se aproxima mediante un conductor de sección 2/0 AWG, mientras que los conductores de fase y neutro se representan mediante conductores de 13 AWG, valor cercano al conductor de 2.5 mm^2 comúnmente utilizado en redes de baja tensión.

6.2.2. Presentación de resultados

En consideración del modelo por segmentos propuesto y de una corriente de inyección impulsiva con un valor máximo cercano a 319 A, aplicada en el Nodo 6 del modelo RLC y con retorno en el Nodo 5, se realiza la simulación transitoria correspondiente, obteniéndose las tensiones presentadas en la Figura 6.8.

A partir de los resultados, se observa que, al evaluar por separado los conductores de fase y neutro respecto a una tierra remota, ambos presentan de manera independiente sobretensiones asociadas al fenómeno de acoplamiento electromagnético. En el caso del conductor de fase, la sobretensión se origina principalmente por acoplamiento inductivo y capacitivo con los segmentos de la malla de puesta a tierra. Por su parte, el conductor de neutro, modelado conectado a tierra en la malla del laboratorio para representar la condición de puesta a tierra de servicio del sistema de baja tensión, presenta también acoplamientos inductivos y capacitivos. No obstante, debido a esta condición de conexión a tierra, incorpora adicionalmente un acoplamiento conductivo hacia el sistema de puesta a tierra, lo que contribuye a un incremento de su potencial transitorio.

Al analizar la tensión Fase - Neutro, se observa que esta resulta de la combinación de las sobretensiones presentes en ambos conductores, constituyendo una tensión diferencial

que refleja el efecto acumulado de los distintos mecanismos de acoplamiento previamente descritos.

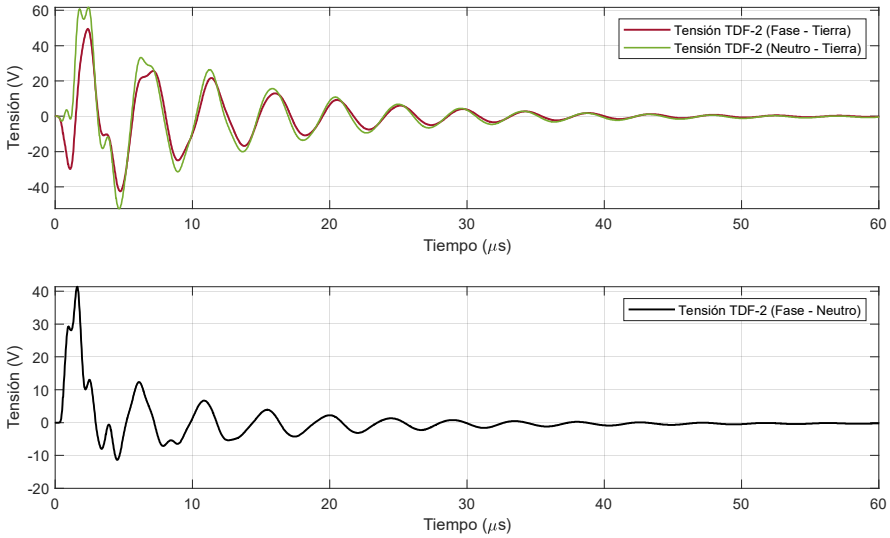


Figura 6.8: Respuesta de sobretensión transitoria obtenida mediante simulación del modelo segmentado en ATPDraw, con representación de las tensiones fasetierra, faseneutro y neutrotierra.

Por otro lado, la simulación también muestra que el tiempo máximo de duración de la sobretensión es cercano a 60 μs, lo que coincide con lo observado experimentalmente. Asimismo, si bien los niveles de sobretensión obtenidos no son directamente comparables con el máximo registrado en el tomacorriente lateral del tablero TDF-2, ya que resultan significativamente menores, se aprecia una similitud considerable en la forma de onda. Esto permite inferir que los mecanismos de acoplamiento representados en el modelo contribuyen efectivamente a la perturbación final medida en la instalación.

Lo anterior es relevante, considerando que el modelo propuesto constituye una representación simplificada del sistema real. En particular, no se incluyen todos los conductores de fase y neutro canalizados a través del PVC Conduit, ni se modela de forma explícita el medio físico del laboratorio, el cual es aproximado mediante una resistividad equivalente del terreno, lo que podría subestimar el acoplamiento capacitivo asociado a la elevada permitividad del hormigón. Asimismo, el modelo no incorpora la totalidad de las canalizaciones subterráneas presentes en la instalación, limitándose al sector específico analizado en este estudio.

Como última instancia de análisis, se evalúa de manera independiente la respuesta de los conductores de fase y neutro al considerar en ellos la presencia de una cubierta exterior (*Sheath*) que represente la posible incorporación de un conduit de acero galvanizado correctamente aterrizado en este tramo de canalización.

Para ello, en los modelos LCC se habilita en ambos conductores una cubierta (*Sheath*) de 2 mm de espesor, con una permeabilidad relativa del acero del orden de 200. A partir de esta configuración, se obtiene la respuesta transitoria presentada en la Figura 6.9.

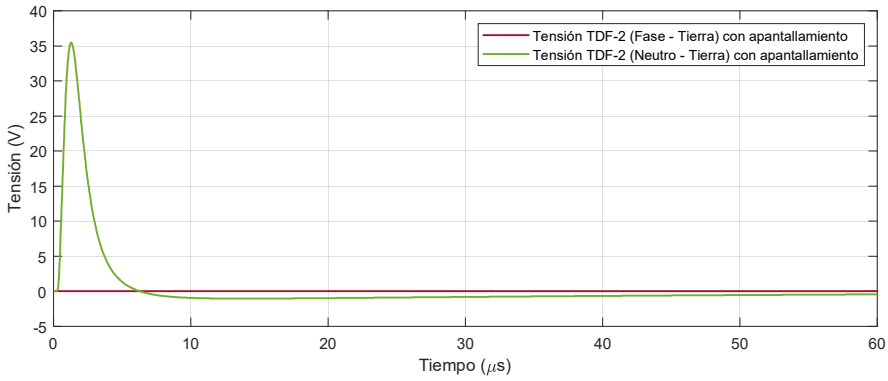


Figura 6.9: Respuesta de sobretensión transitoria obtenida mediante simulación en ATPDraw del modelo segmentado, considerando la incorporación de cubierta aterrizada en los conductores de fase y neutro.

En consecuencia, se puede notar que la incorporación de una cubierta metálica aterrizada permite reducir significativamente el acoplamiento inductivo tanto en el conductor de fase como en el de neutro. En contraste, el acoplamiento conductivo asociado al neutro no presenta variaciones relevantes, ya que este se origina directamente en su conexión a tierra, constituyendo una condición inherente del sistema.

En síntesis, los resultados experimentales y de simulación muestran una coherencia global respecto del fenómeno de sobretensiones transitorias observado en la instalación de baja tensión del laboratorio. En ambos casos se identifican sobretensiones de corta duración, del orden de decenas de microsegundos, con formas de onda oscilatorias amortiguadas.

No obstante, el modelo desarrollado corresponde a una representación simplificada del sistema real, ya que los mecanismos de acoplamiento son analizados de manera independiente, aun cuando en la instalación real estos actúan simultáneamente e interactúan entre sí durante la propagación de la perturbación. En consecuencia, los resultados obtenidos deben interpretarse como una aproximación orientada a identificar las principales vías de acoplamiento, más que como una representación completa del fenómeno físico.
Bajo esta consideración, la concordancia observada sugiere que los mecanismos incorporados en el modelo (acoplamiento inductivo y capacitivo, junto con el acoplamiento conductivo del neutro) representan las principales vías de propagación de la perturbación. Siendo el acoplamiento entre los conductores paralelos y la malla de puesta a tierra el mecanismo de mayor contribución. Sin embargo, no es posible descartar la existencia de mecanismos adicionales no modelados, tales como efectos de radiación electromagnética o interacciones distribuidas de mayor complejidad.

A partir de estos resultados, la incorporación del conduit de acero galvanizado correctamente aterrizado se perfila como una medida efectiva para reducir el acoplamiento electromagnético y, con ello, las sobretensiones transitorias inducidas en la instalación.
De esta manera, se concluye que las sobretensiones transitorias observadas no responden a un único mecanismo aislado, sino a la superposición de distintos acoplamientos electromagnéticos presentes en la instalación, junto con posibles fenómenos adicionales no representados en el modelo.

Capítulo 7

Propuestas de mitigación en laboratorio de la UTFSM

Cuando se trata la compatibilidad electromagnética en instalaciones sensibles, se suelen considerar tres áreas principales de estudio [9]: las fuentes emisoras que originan las perturbaciones, las vías de acoplamiento influenciadas por las prácticas de instalación en el recinto y el receptor. Lo que implica que para lograr una adecuada compatibilidad, se deben aplicar tres tipos de medidas según corresponda: la reducción de las emisiones en la fuente de perturbación, la disminución del acoplamiento y el aumento de la inmunidad en los receptores.

Debido a que las perturbaciones electromagnéticos se presentan en una amplia variedad de frecuencias, las reglas generales de mitigación expuestas en la literatura [6] señalan que para fenómenos de baja frecuencia (BF), los sistemas de protección adquieren un rol fundamental. En este caso, la mitigación se centra en la implementación de sistemas de protección, filtrado y en la adecuada gestión de la longitud de los cables. Mientras que para fenómenos de alta frecuencia (AF), la configuración física de la instalación cobra mayor relevancia. Por ello, la mitigación debe orientarse hacia la equipotencialidad de las masas, la correcta canalización de los cables, la selección adecuada de conductores, el apantallamiento y el control de la longitud de los conductores.

Para el caso en estudio, los generadores de impulso producen señales de tensión y corriente con contenido en un amplio espectro de frecuencias, por ello, las propuestas de mitigación deben abordarse desde un enfoque asociado a fenómenos de alta frecuencia.

En este contexto, resulta fundamental identificar los mecanismos de acoplamiento predominantes, ya que estos condicionan directamente la efectividad de las medidas de mitigación a implementar. A partir de ello, es posible definir estrategias específicas orientadas a reducir las perturbaciones y mejorar el desempeño electromagnético del sistema.

7.1. Identificación de mecanismos de acoplamiento

La principal perturbación observable y medible en el laboratorio de alta tensión corresponde a las sobretensiones registradas en los tomacorriente de la instalación.
Como se ha mencionado anteriormente, estas perturbaciones ocasionan un deterioro en la calidad de energía del recinto y tienen su origen a través de los ensayos de impulso que normalmente se realizan en el laboratorio. Los que debido a su respuesta transitoria, ocasionan altos valores de dv/dt y, en menor medida di/dt, favoreciendo la aparición de distintos mecanismos de acoplamiento electromagnético.

El Apéndice E presenta un esquema general de los mecanismos de acoplamiento observados en el laboratorio de alta tensión de la UTFSM, incorporando las principales vías de propagación de las perturbaciones desde la fuente hacia los equipos receptores. En este contexto, se identifican los siguientes mecanismos de acoplamiento:

- **Acoplamiento conductivo:** se produce a través de los conductores de la instalación, principalmente la red de baja tensión y el sistema de puesta a tierra. Dado que los impulsos se inyectan directamente en la malla de puesta a tierra, este mecanismo constituye una de las principales vías de propagación de sobretensiones transitorias hacia los equipos conectados.
- **Acoplamiento capacitivo:** se origina por la interacción de campos eléctricos entre conductores próximos a distinto potencial. Los elevados valores de $\mathrm{d}v/\mathrm{d}t$ favorecen la transferencia de perturbaciones mediante capacitancias parásitas, incluso sin conexión eléctrica directa.
- **Acoplamiento inductivo:** es consecuencia de los campos magnéticos variables generados por las corrientes impulsivas, los cuales inducen tensiones en lazos formados por conductores cercanos.
- **Acoplamiento radiado:** puede presentarse debido a la emisión de ondas electromagnéticas asociadas al contenido de alta frecuencia de los impulsos. No obstante, en el laboratorio predominan los fenómenos de campo cercano, por lo que los acoplamientos conductivo, capacitivo e inductivo constituyen las principales vías de propagación de las perturbaciones[11].

En consecuencia, las medidas de mitigación propuestas se fundamentan en la reducción de estos mecanismos de acoplamiento, tomando como referencia las recomendaciones de la literatura especializada y, en particular, los lineamientos establecidos en la norma IEC 61000-5-2 [9], relativos a prácticas de cableado y sistemas de puesta a tierra.

7.2. Medidas de mitigación sobre el sistema de puesta a tierra

Un sistema de puesta a tierra debe garantizar la seguridad de las personas y la protección de las instalaciones frente a fallas eléctricas. Además de proporcionar una referencia de voltaje común y contribuir a la mitigación de perturbaciones en instalaciones con equipos eléctricos sensibles, facilitando una trayectoria de retorno para las corrientes asociadas [9].

En la práctica, no es sostenible el considerar que un sistema de puesta a tierra presenta siempre una referencia de voltaje absoluta, ya que el solo hecho de que exista inducción entre los conductores que conforman el sistema de puesta a tierra, ocasiona que la diferencia de tensión entre dos puntos sea distinta a cero. En teoría, solo un plano sólido, grande y bien conductor podría considerarse como una referencia de voltaje perfecta [9]. Así entonces, las medidas de mitigación no deben orientarse a eliminar las diferencias de potencial, sino reducirlas y controlar de buena manera las trayectorias de corriente en el sistema.

[11] Estos mecanismos no actúan de forma aislada, sino simultáneamente, y su intensidad depende de factores como la geometría de la instalación, las distancias entre conductores, el contenido espectral de la perturbación, las impedancias involucradas y el entorno electromagnético.

Dado que el sistema de puesta a tierra del laboratorio de alta tensión presenta una buena respuesta tanto a baja como a alta frecuencia y considerando que su diseño actual no puede ser modificado, se proponen algunas medidas a corto plazo orientadas a mejorar la compatibilidad electromagnética del sistema.

7.2.1. Interconexión de masas y estructuras conductoras

La masa es el punto de interconexión equipotencial, que sirve de referencia para un circuito o sistema. Desde el punto de vista de instalaciones eléctricas, la masa tiene relación con cualquier parte conductora de un aparato, equipo o instalación accesible al contacto que en funcionamiento normal no tiene tensión, pero podría tenerla frente a alguna falla [6].

El proceso de interconexión de todas las partes metálicas expuestas en una instalación, conectadas al sistema de puesta a tierra, constituye una medida obligatoria para la seguridad de las personas. Si se implementa de manera adecuada, puede contribuir también al desempeño de la compatibilidad electromagnética (EMC) en la instalación. Esto se logra mediante la reducción de la impedancia en los puentes que interconectan los distintos equipos o sistemas, la cual depende principalmente de su longitud y geometría.

Así entonces, para el laboratorio en estudio se recomienda implementar una conexión equipotencial sistemática de todas las estructuras metálicas y elementos conductores presentes en la instalación. Esta medida debe considerar el uso de enlaces de interconexión entre equipos, sistemas y tableros eléctricos, empleando preferentemente cintas metálicas, como las mostradas en la Figura 7.1, o trenzas metálicas, debido a que presentan una menor impedancia a altas frecuencias. Para maximizar su efectividad, se recomienda mantener una relación largo/ancho inferior a cinco [9].

La aplicación de esta medida resulta especialmente relevante considerando que varios de los tableros eléctricos del laboratorio utilizan actualmente conductores cilíndricos para la puesta a tierra interna de las masas metálicas, particularmente en las compuertas. En consecuencia, para los tableros ubicados en las proximidades de los generadores de impulso, como TDF-2 y TDF-7, se recomienda incorporar cintas o trenzas de unión con una separación máxima de 0.3 m [9]. Con ello, se favorece la equipotencialidad de las estructuras metálicas y se reduce la susceptibilidad frente a acoplamientos radiados y capacitivos provenientes de las zonas de alta tensión del laboratorio.

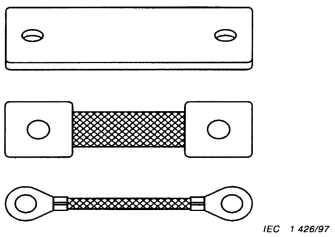
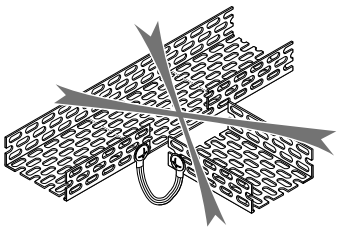


Figura 7.1: Tiras típicas y recomendadas de interconexión. Imagen extraída de norma IEC 61000-5-2 [9].

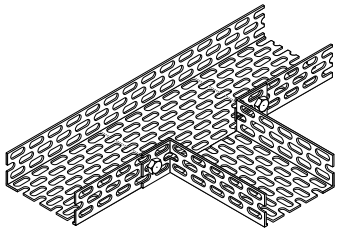
Dado que la impedancia de las interconexiones también depende de los equipos conectados y de su implementación, es fundamental asegurar que estos se conecten al punto más cercano de la red de puesta a tierra. Los puntos de conexión deben mantenerse libres

de pintura u otros materiales que dificulten un contacto eléctrico adecuado, procurando que el área limpia sea siempre mayor que el área efectiva de contacto [9].

Como medida complementaria, se recomienda realizar una revisión completa de las canalizaciones conductoras existentes, con el fin de asegurar que las bandejas y conduit de acero galvanizado presenten conexiones de baja impedancia entre sí y con los tableros eléctricos. Para ello, debe evitarse la interconexión mediante conductores adicionales, ya que estos pueden incrementar la impedancia del sistema. En este sentido, la Figura 7.2(a) muestra una configuración no recomendada desde el punto de vista de la compatibilidad electromagnética, debido a que genera una alta impedancia entre las bandejas conductoras. En contraste, la Figura 7.2(b) presenta una configuración recomendada, en la que la impedancia se reduce gracias a la existencia de múltiples puntos de conexión.



(a) Interconexión de alta impedancia entre bandejas conductoras.



(b) Interconexión de baja impedancia con múltiples puntos de conexión entre bandejas conductoras.

Figura 7.2: Comparación entre configuraciones de interconexión de bandejas conductoras y su impacto en la impedancia del sistema. Imágenes extraídas de la literatura referenciada [6].

En el caso particular de los conduits metálicos, se debe asegurar la continuidad eléctrica entre tramos mediante el uso de uniones mecánicas apropiadas, tales como coplas o acoples roscados. En aquellos puntos donde la continuidad pueda verse comprometida, se recomienda reforzarla mediante elementos adicionales de fijación o mediante puentes de unión, con el fin de garantizar una conexión de baja impedancia.

Si bien estas medidas no implican modificaciones directas al sistema de puesta a tierra, buscan mejorar su desempeño mediante la optimización de las interconexiones y la equipotencialidad de las masas conductoras asociadas, favoreciendo la reducción de diferencias de potencial y el control de corrientes parásitas en la instalación.

7.3. Medidas de mitigación del acoplamiento electromagnético

7.3.1. Implementación de superficies equipotenciales conductoras

El acoplamiento capacitivo en un generador de impulsos se origina principalmente debido a la presencia de múltiples elementos conductores sometidos a elevados niveles de tensión durante los ensayos. Desde el punto de vista de la teoría de campos electromagnéticos, cuando tanto el terminal de alta tensión como el elemento conectado a tierra presentan áreas efectivas reducidas, la distribución del campo eléctrico puede aproximarse a una configuración conductor – conductor. Donde las líneas de campo tienden a concentrarse en las

proximidades de ambos conductores, generando elevadas intensidades de campo eléctrico en sus extremos y favoreciendo el acoplamiento capacitivo hacia estructuras cercanas [38].

Investigaciones reportadas en la literatura [38] muestran que la incorporación de superficies equipotenciales conectadas a tierra y de mayor área efectiva permite modificar esta distribución de campo, aproximando la configuración a un sistema conductor – plano. Como consecuencia, disminuye la concentración local de campo eléctrico y se reduce la impedancia característica (Z) asociada a la configuración formada entre el terminal de alta tensión (HV) y tierra, de acuerdo con:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{7.1}$$

donde L corresponde a la inductancia asociada a la superficie equipotencial y C a la capacitancia parásita existente entre el terminal de alta tensión y dicha superficie.

Esta reducción se explica porque el aumento del área efectiva de la superficie equipotencial incrementa la capacitancia parásita C, mientras que simultáneamente disminuye la inductancia L, dado que conductores de mayor área efectiva presentan menores valores de inductancia [5]. Como consecuencia, ambos efectos contribuyen a reducir la impedancia característica Z y a disminuir la intensidad del campo eléctrico presente en otras zonas de la instalación, reduciendo así el acoplamiento capacitivo hacia estructuras cercanas.

En función de lo anterior, la Figura 7.3 presenta una configuración experimental implementada en el generador de impulsos HAEFELY de 400 kV y 600 J. Para ello, se han incorporado placas de aluminio de 3 mm de espesor, conectadas al sistema de puesta a tierra y ubicadas bajo el generador de impulsos, con un área total aproximada de 2.5 m^2.

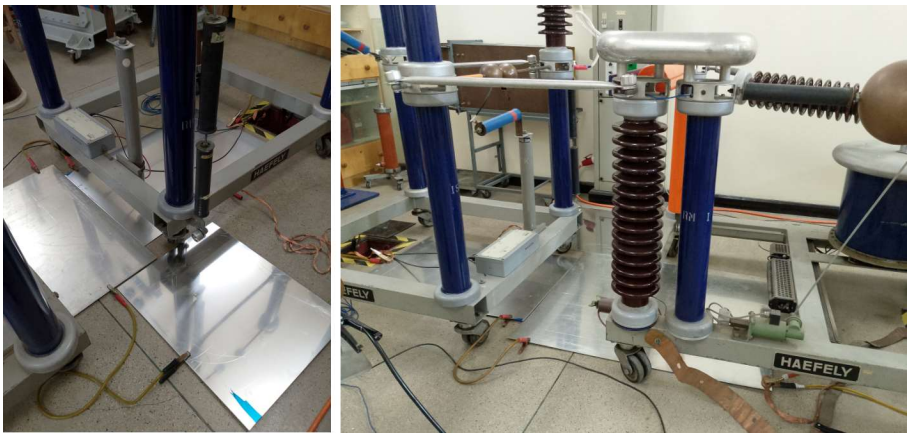


Figura 7.3: Placas de aluminio implementadas en el generador de impulsos HAEFELY 400 kV/600 J.

El procedimiento experimental consistió en conectar el chasis o estructura metálica del generador a las placas de aluminio, manteniendo a su vez estas últimas conectadas al sistema de puesta a tierra. Esta conexión resulta fundamental, ya que permite que la capacitancia parásita asociada inicialmente a la estructura del generador aumente al incorporar las placas como parte de una misma superficie equipotencial. En caso de conectar la estructura y las placas a tierra de manera independiente, las impedancias presentes entre ambos elementos impedirían alcanzar el efecto equipotencial buscado.

Bajo esta configuración, se aplicó un impulso de tensión con un valor máximo cercano a los 62 kV, cuya forma de onda se presenta en la Figura 7.4, junto con la corriente de inyección registrada. Como puede observarse, la incorporación de las placas produce un leve aumento de la corriente inyectada, comportamiento consistente con la reducción de la impedancia característica Z previamente descrita.

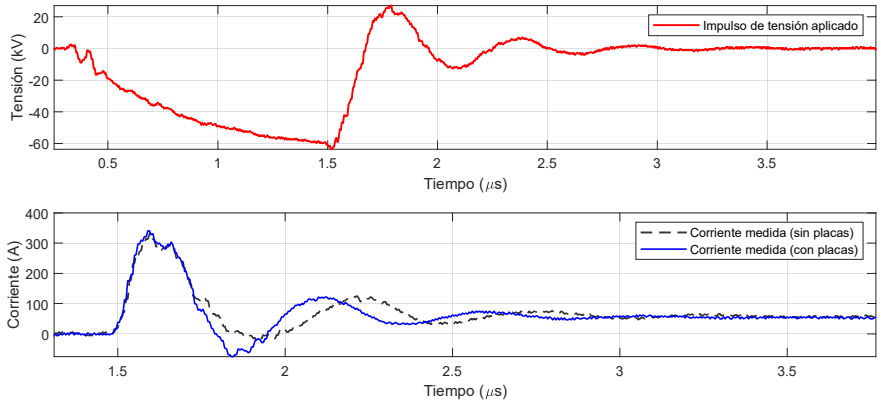


Figura 7.4: Impulso de tensión aplicado y corriente medida durante ensayo experimental con placas de aluminio.

De esta manera, siguiendo el procedimiento descrito en el Capítulo 6, se realizó nuevamente la medición de la sobretensión transitoria en el tablero TDF-2, ubicado en las proximidades del generador de impulsos. El resultado obtenido se presenta en la Figura 7.5, donde se observa una disminución significativa de la sobretensión registrada, pasando de un valor máximo de 1853 V a 767 V. Esto corresponde a una reducción superior al 50 %, lo que evidencia la efectividad de la medida implementada.

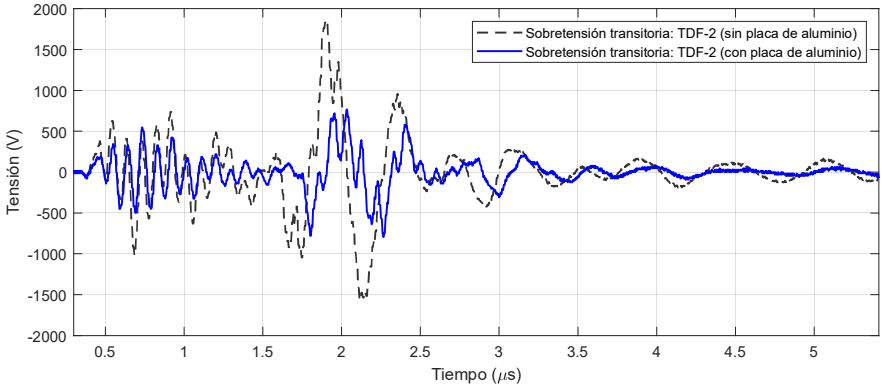


Figura 7.5: Comparación de sobretensiones transitorias medidas en el tablero TDF-2 con y sin implementación de placas de aluminio.

Así entonces, dado que se ha validado experimentalmente que la incorporación de superficies equipotenciales contribuye a la reducción de la sobretensión registrada en el laboratorio de alta tensión, se proponen dos configuraciones de sistemas con placas de aluminio para los generadores presentes en la zona de ensayos. En este contexto, la Figura 7.6 presenta el diseño correspondiente al generador HAEFELY de 400 kV, el cual abarca un

área de 5.32 m^2, mientras que la Figura 7.7 muestra la configuración asociada al generador HAEFELY de 900 kV, la que debido a limitaciones de espacio dispone de un área implementada menor, de 2.08 m^2. En ambos casos, se trata de propuestas base que podrían ser ampliadas en caso de requerirse una mayor cobertura de la superficie equipotencial.

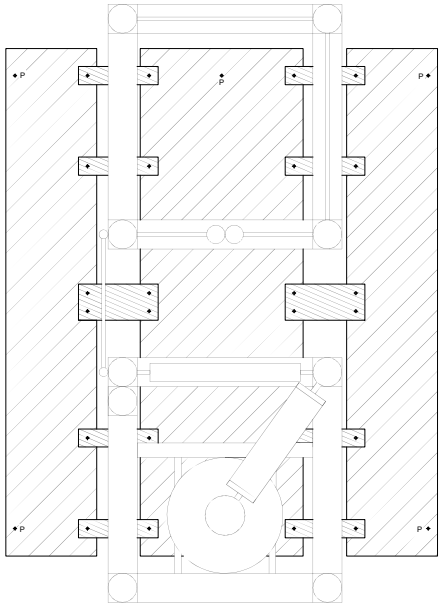


Figura 7.6: Sistema de placas de aluminio propuesto para generador de impulsos de tensión Haefely 400 kV / 600 J, vista superior. Elaboración propia.

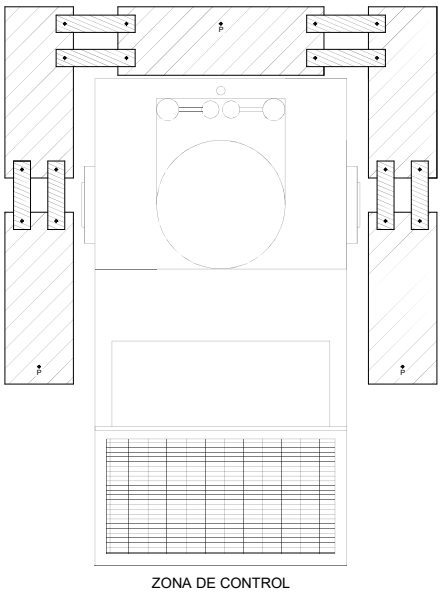


Figura 7.7: Sistema de placas de aluminio propuesto para generador de impulsos de tensión Haefely 900 kV / 18 kJ, vista superior. Elaboración propia.

Los planos de diseño e implementación de ambos sistemas se presentan en la Figura F.1 y la Figura F.2, incluidas en el Apéndice F.

7.3.2. Sustitución de canalización subterránea por canalización superficial

Como se ha mencionado, la conexión de algunos tableros eléctricos se realiza mediante canalización subterránea en PVC Conduit de 3 pulgadas, como se ilustra en la Figura 7.8.

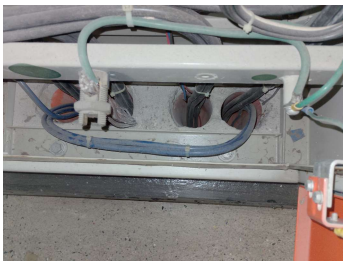


Figura 7.8: Canalización subterránea en PVC Conduit empleada en tableros del laboratorio de alta tensión.

En el Capítulo 6 se verificó, mediante simulaciones transitorias, que la configuración actual de las canalizaciones favorece el acoplamiento inductivo y capacitivo entre el sistema de puesta a tierra y los conductores de Fase y Neutro. Como consecuencia, los elevados niveles de tensión transitoria presentes en el sistema de puesta a tierra inducen perturbaciones en dichos conductores.

El Reglamento de Instalaciones de Consumo $N°$ 4 [39] no establece un material específico para las canalizaciones subterráneas, sino que define requisitos de desempeño relacionados con la protección mecánica, la resistencia frente a las condiciones ambientales y la compatibilidad con la instalación. En este contexto, la solución actualmente implementada presenta limitaciones frente a las condiciones de operación del laboratorio de alta tensión. Es por ello, que se propone la sustitución de la canalización subterránea existente por una canalización superficial en conduit de acero galvanizado (C.A.G.) de 3 pulgadas.

La Figura 7.9 presenta un esquema simplificado de la reconfiguración propuesta. En la que se observa que la canalización subterránea existente se conserva, dado que su modificación no resulta viable. En su lugar, los conductores son canalizados superficialmente mediante conduit de acero galvanizado, el cual se encuentra conectado al sistema de puesta a tierra, proporcionando un camino equipotencial que contribuye a reducir el acoplamiento electromagnético sobre los conductores.

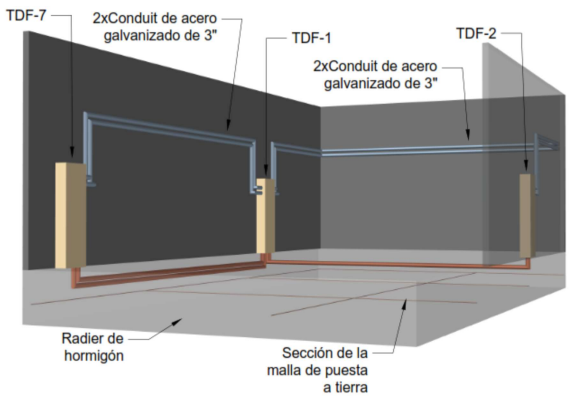


Figura 7.9: Esquema simplificado de la reconfiguración propuesta para las canalizaciones eléctricas del laboratorio de alta tensión. Elaboración propia.

Es importante señalar, que el esquema presentado corresponde a una representación conceptual de la propuesta. Su implementación requiere un estudio de ingeniería de mayor detalle, en el que se definan aspectos constructivos tales como el trazado definitivo de las canalizaciones, los puntos de ingreso a los tableros y la forma de conexión del conduit de acero galvanizado al sistema de puesta a tierra. Asimismo, será necesario evaluar la factibilidad de mantener los conductores existentes o sustituirlos por otros de características más adecuadas para las condiciones de operación previstas, considerando criterios eléctricos, mecánicos y de compatibilidad electromagnética [28].

7.4. Implementación de dispositivos de protección

Además de las medidas de mitigación previamente propuestas, orientadas a mejorar el desempeño del sistema de puesta a tierra, la conexión equipotencial y la reducción de los acoples electromagnéticos, existen otras alternativas complementarias, tales como el filtrado y la instalación de dispositivos de protección contra sobretensiones. A continuación, se describen estas medidas y su posible aplicación en el laboratorio de alta tensión.

7.4.1. Implementación de filtros pasivos

La función principal de un filtro es permitir el paso de las señales de interés y atenuar o suprimir las componentes no deseadas presentes en las señales transmitidas. En términos generales, los filtros pueden clasificarse en filtros pasivos y compensadores activos. A su vez, ambos pueden diseñarse para mitigar perturbaciones en modo común o en modo diferencial, dependiendo del tipo de interferencia que se desee reducir [6].

La Figura 7.10 muestra el principio básico de funcionamiento de un filtro pasivo. En este tipo de filtros, la inductancia en serie presenta una elevada impedancia frente a las perturbaciones de alta frecuencia, limitando su propagación, mientras que la capacitancia en paralelo proporciona un camino de baja impedancia para derivarlas, reduciendo así su transmisión hacia el circuito protegido [6].

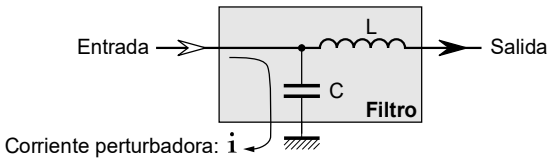


Figura 7.10: Funcionamiento básico del filtro pasivo. Imagen extraída de la literatura referenciada [6].

Dentro del amplio conjunto de filtros pasivos, destacan las ferritas debido a su capacidad para disipar la energía asociada a las perturbaciones electromagnéticas [6]. Esto se debe a que son materiales magnéticos cuya permeabilidad relativa, μ_r, puede variar en un amplio rango, entre 10 y 10000 [9]. A bajas frecuencias, una ferrita se comporta principalmente como un elemento inductivo. Sin embargo, a medida que aumenta la frecuencia, las corrientes inducidas y otros mecanismos internos incrementan sus pérdidas magnéticas, otorgándole un comportamiento disipativo. Desde el punto de vista de la compatibilidad electromagnética (EMC), estas pérdidas resultan beneficiosas, ya que contribuyen a

amortiguar resonancias y atenuar perturbaciones de alta frecuencia [9].

En términos generales, las ferritas actúan mediante dos mecanismos principales: el incremento de la inductancia en modo común y la absorción de las perturbaciones de alta frecuencia mediante pérdidas magnéticas disipadas en forma de calor. Como consecuencia, generan una elevada impedancia en modo común, cuya eficacia depende de su relación con la impedancia del circuito que se desea proteger [6].

Considerando que la problemática abordada en este estudio está asociada a sobretensiones con un amplio contenido espectral, cuya propagación es consistente con un mecanismo predominante de modo común, la implementación de filtros de ferrita constituye una medida de mitigación adecuada para la protección de equipos y cargas sensibles frente a perturbaciones de alta frecuencia.

Con el propósito de seleccionar un filtro de ferrita apropiado, la Figura 7.11 presenta el espectro de amplitud en frecuencia de la máxima sobretensión registrada en el tablero TDF-2, obtenido mediante la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) a la señal analizada en el Capítulo 6. Se observa que el contenido espectral de la sobretensión se extiende aproximadamente desde los 100 kHz hasta los 10 MHz, concentrándose las componentes de mayor amplitud entre 1 MHz y 2 MHz.

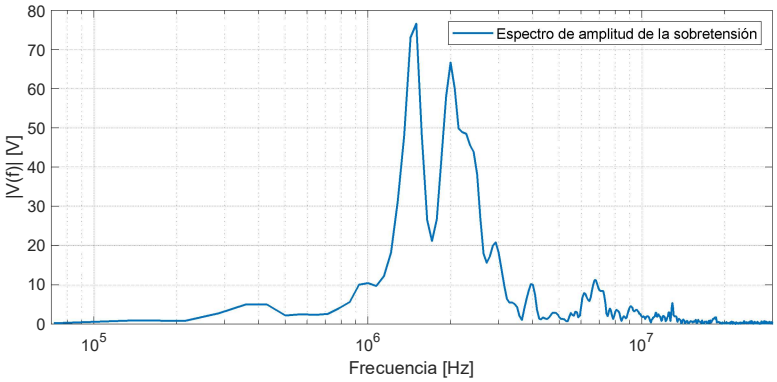


Figura 7.11: Espectro de amplitud en frecuencia de la máxima sobretensión registrada en el tablero TDF-2.

Las ferritas se fabrican en base a diferentes composiciones magnéticas, siendo las más utilizadas las de manganeso-zinc (MnZn), níquel-zinc (NiZn) y los materiales nanocristalinos (NC). Cada uno de estos materiales presenta un comportamiento electromagnético distinto, determinado principalmente por su permeabilidad magnética y sus pérdidas, lo que se traduce en un rango de frecuencias de operación característico [10].

En este contexto, la Figura 7.12 presenta la relación entre la composición del material y el rango de frecuencias en el que cada tipo de ferrita ofrece un desempeño más efectivo. Como puede observarse, los materiales MnZn resultan adecuados para frecuencias comprendidas entre algunas decenas de kHz y unos pocos MHz, mientras que las ferritas NiZn desplazan su máxima eficacia hacia frecuencias más elevadas. Por su parte, los materiales nanocristalinos presentan un mejor desempeño en bajas frecuencias, siendo ampliamente utilizados para la mitigación de perturbaciones en ese intervalo [10].

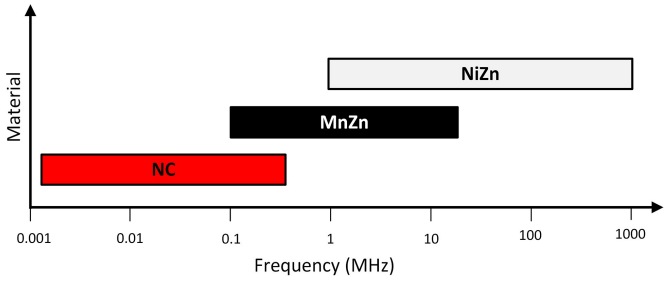
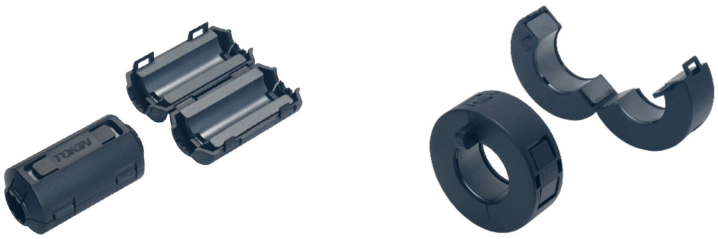


Figura 7.12: Composición del material frente al rango de frecuencias cubierto. Esquema extraído de la literatura referenciada [10].

Considerando que el espectro de la sobretensión registrada se extiende aproximadamente desde 100 kHz hasta 10 MHz, se recomienda la utilización de ferritas de composición manganeso–zinc (MnZn), cuyo rango de operación es compatible con dicho contenido espectral. Su implementación permite atenuar principalmente las perturbaciones conducidas en modo común, reduciendo la propagación de componentes de alta frecuencia hacia los equipos y cargas sensibles. Para ello, pueden emplearse tanto ferritas de abrazadera, como la mostrada en la Figura 7.13(a), como ferritas toroidales, ilustradas en la Figura 7.13(b).



(a) Ferrita de abrazadera. (b) Ferrita toroidal.

Figura 7.13: Principales geometrías de ferritas empleadas en aplicaciones de compatibilidad electromagnética. Imagen extraída de literatura referenciada [11].

Finalmente, es importante mencionar que la impedancia de una ferrita depende de diversos factores, entre ellos la composición del material, la frecuencia y el número de vueltas que realiza el conductor a través de su núcleo [9]. En particular, el aumento del número de vueltas incrementa la impedancia efectiva de la ferrita, constituyendo una alternativa para mejorar la atenuación de las perturbaciones cuando sea necesario. En este sentido, también resulta importante seleccionar adecuadamente el diámetro interno de la ferrita, de manera que permita disponer del espacio suficiente para incorporar un mayor número de vueltas del conductor, si las condiciones de la instalación así lo requieren.

7.4.2. Transformador de aislamiento

Otra medida utilizada para mejorar la compatibilidad electromagnética consiste en la incorporación de transformadores de aislamiento. Estos dispositivos proporcionan aislamiento galvánico entre la fuente y la carga, reduciendo la propagación de perturbaciones conducidas. En aplicaciones con presencia de componentes de alta frecuencia, se recomien-

da el empleo de transformadores con doble pantalla electrostática, ya que permiten una mayor atenuación de las corrientes de modo común [6].

Con el fin de evaluar la efectividad de esta medida de mitigación frente a las perturbaciones observadas en el laboratorio de alta tensión, se ensaya el transformador de aislamiento mostrado en la Figura 7.14, correspondiente a un transformador monofásico de 2 kVA con relación de transformación 1:1.



Figura 7.14: Transformador de aislamiento de 2 kVA utilizado para prueba experimental.

Para este ensayo, el primario del transformador fue alimentado desde el mismo enchufe del tablero TDF-2 en el que previamente se registraron las sobretensiones presentadas en el Capítulo 6 durante la realización de los ensayos de impulso. Posteriormente, se comparó la sobretensión presente en el devanado primario con la tensión obtenida en el secundario, cuyos resultados se presentan en la Figura 7.15. Cabe mencionar que, durante todo el ensayo, el transformador se mantuvo correctamente conectado al sistema de puesta a tierra.

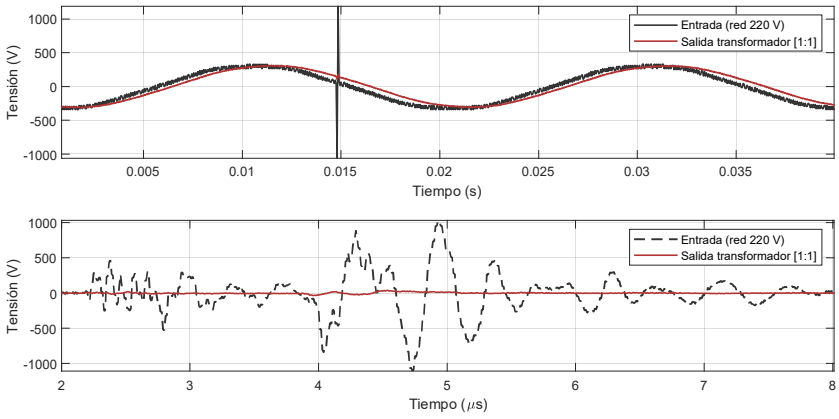


Figura 7.15: Comparación entre la tensión registrada en los devanados primario y secundario del transformador de aislamiento durante ensayo de impulso.

Los resultados muestran que, para una sobretensión de aproximadamente 1000 V de valor máximo presente en el devanado primario, el transformador de aislamiento reduce la perturbación hasta una sobretensión cercana a los 40 V en el devanado secundario, lo que representa una atenuación superior al 90 %.

Es importante señalar que, durante el ensayo, el transformador fue instalado a escasa distancia del generador de impulsos. En consecuencia, los resultados permiten inferir que el transformador de aislamiento atenúa eficazmente las perturbaciones conducidas propagadas a través del circuito monofásico de baja tensión. Sin embargo, no elimina completamente las perturbaciones remanentes, las cuales podrían estar asociadas a acoplamientos capacitivos originados por la proximidad al generador de impulsos. A pesar de ello, la reducción obtenida demuestra una elevada efectividad de esta medida de mitigación.

Considerando los resultados obtenidos, se propone la incorporación de transformadores de aislamiento en el laboratorio de alta tensión. Para ello, la Figura 7.16 presenta un esquema de implementación en el que se incorpora un transformador de aislamiento de aproximadamente 2 kVA, alimentado desde la red del laboratorio, destinado exclusivamente a un tablero para cargas sensibles. Bajo este criterio, el transformador permitiría alimentar hasta cuatro cargas de 400 W cada una, manteniendo una carga inferior al 80 % de su potencia nominal y proporcionando un margen adecuado para su operación.

Adicionalmente, cuando las condiciones de la instalación lo requieran, también puede considerarse la incorporación de transformadores de aislamiento de menor potencia destinados a la protección de equipos específicos, constituyendo una solución complementaria para aquellas cargas que demanden un mayor nivel de inmunidad frente a perturbaciones electromagnéticas.

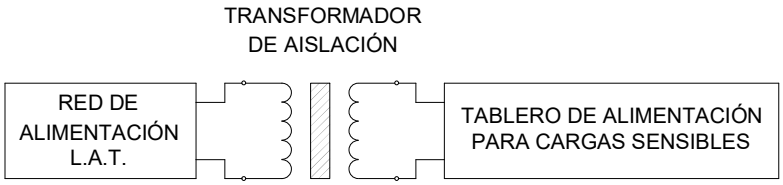


Figura 7.16: Configuración simplificada propuesta para alimentación de cargas sensibles en laboratorio de alta tensión. Elaboración propia.

7.5. Recomendaciones adicionales

A partir de los resultados presentados en esta memoria, se establece como recomendación adicional la adopción de buenas prácticas operativas orientadas a disminuir las perturbaciones electromagnéticas durante la ejecución de ensayos de impulso de alta tensión en el laboratorio.

En este sentido, se recomienda ubicar el punto de retorno del generador lo más próximo posible al punto de inyección del impulso, ya que esta configuración reduce la diferencia de potencial entre nodos de la malla y, en consecuencia, la elevación de potencial del sistema de puesta a tierra. Asimismo, se establece como restricción operativa la no utilización simultánea de ambos generadores, debido a que dicha condición incrementa el nivel de perturbaciones en el sistema, potenciando los acoplamientos electromagnéticos existentes.

Capítulo 8

Conclusiones

La presente memoria permitió evaluar la interferencia electromagnética generada por ensayos de impulso en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Técnica Federico Santa María mediante una metodología que integró mediciones experimentales y simulaciones computacionales. Este enfoque permitió caracterizar el comportamiento electromagnético de la instalación, identificando los principales mecanismos involucrados en la propagación de las perturbaciones y proponiendo medidas de mitigación sustentadas tanto en resultados experimentales como en antecedentes de la literatura.

En relación con la caracterización del sistema de puesta a tierra, las inspecciones realizadas evidenciaron la existencia de sectores con corrosión severa. No obstante, las mediciones de continuidad eléctrica mostraron valores de resistencia bajos entre los distintos puntos de la malla, sin evidenciar un deterioro significativo de sus conexiones internas. Asimismo, las mediciones de resistencia e impedancia de puesta a tierra, junto con la evaluación de los potenciales transitorios, mostraron un comportamiento consistente con el esperado de acuerdo con la geometría del sistema. En consecuencia, no se identificaron condiciones en el sistema de puesta a tierra que permitieran asociar las perturbaciones electromagnéticas observadas a un defecto propio de la instalación. Por el contrario, los resultados obtenidos indican que las perturbaciones corresponden a un fenómeno inherente a la configuración del laboratorio para la realización de ensayos de impulso, donde la disposición de la red de baja tensión y su proximidad al sistema de puesta a tierra favorecen el acoplamiento electromagnético entre ambos sistemas, contribuyendo a la propagación de las sobretensiones.

La implementación de un modelo transitorio de parámetros concentrados en ATPDraw permitió reproducir cualitativamente el comportamiento observado experimentalmente. La concordancia obtenida entre las mediciones y las simulaciones evidenció que el modelo constituye una herramienta útil para analizar la respuesta impulsiva del sistema de puesta a tierra, complementar la interpretación de los resultados experimentales y evaluar escenarios difíciles de reproducir mediante ensayos.

Respecto de la caracterización de las perturbaciones electromagnéticas, se determinó que ensayos de impulso cercanos a 62 kV generan sobretensiones fase-neutro del orden de 1,3 kV en la red de baja tensión del laboratorio. Estas presentan una respuesta oscilatoria amortiguada con una duración aproximada de 60 μs y un contenido espectral comprendido entre 100 kHz y 10 MHz. Adicionalmente, se estableció que las sobretensiones no constituyen un fenómeno localizado, sino que se propagan a través de la red de baja tensión, alcanzando distintos tomacorrientes de la instalación y registrando sus mayores magnitudes en los tableros eléctricos. Lo anterior evidencia que la interferencia electromagnética representa un fenómeno de alcance global dentro del laboratorio y un riesgo potencial para

equipos electrónicos sensibles debido a las elevaciones transitorias de tensión que superan ampliamente la tensión nominal de servicio.

El principal aporte del modelo desarrollado para el estudio de sobretensiones no radica en la reproducción exacta de ellas, sino en proporcionar una herramienta de análisis que permitió estudiar la contribución de distintos mecanismos de acoplamiento al fenómeno de interferencia electromagnética. Bajo esta consideración, la concordancia cualitativa obtenida entre simulaciones y mediciones sugiere que los acoplamientos conductivo, inductivo y capacitivo incorporados en el modelo corresponden a mecanismos relevantes en la propagación de las perturbaciones observadas, aun cuando la magnitud de las sobretensiones simuladas difiere de la registrada experimentalmente.

La investigación permitió además evaluar distintas estrategias de mitigación orientadas a disminuir la interferencia electromagnética. Entre ellas, la implementación de superficies equipotenciales mediante placas de aluminio redujo las sobretensiones en más de un 50 %, demostrando la efectividad de reducir las diferencias locales de potencial. Por otra parte, la incorporación de un transformador de aislamiento permitió alcanzar reducciones superiores al 90 %, constituyéndose en la medida de mayor efectividad para limitar la propagación de perturbaciones conducidas hacia la red de baja tensión y proteger equipos electrónicos sensibles. Estos resultados proporcionan criterios objetivos para priorizar futuras intervenciones destinadas a mejorar la compatibilidad electromagnética del laboratorio.

Finalmente, la metodología desarrollada constituye uno de los principales aportes de esta memoria. La integración de mediciones experimentales, modelación computacional e implementación de medidas de mitigación permitió establecer un procedimiento sistemático para el diagnóstico y análisis de problemas de interferencia electromagnética asociados a ensayos de impulso. Si bien el estudio se desarrolló en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Técnica Federico Santa María, los criterios de análisis y las soluciones propuestas pueden extenderse al estudio de otros laboratorios de alta tensión e instalaciones sometidas a fenómenos impulsivos, contribuyendo al diseño de instalaciones con mayores niveles de compatibilidad electromagnética y seguridad operacional.

Capítulo 9

Trabajo futuro

Los resultados obtenidos en esta memoria permiten establecer diversas líneas de trabajo que contribuirían a profundizar y complementar el estudio desarrollado.

En primer lugar, resulta de interés implementar y validar experimentalmente aquellas medidas de mitigación propuestas que no pudieron ser evaluadas durante el desarrollo de esta investigación. Esto permitiría cuantificar su efectividad individual y determinar la combinación más adecuada para reducir la interferencia electromagnética en el laboratorio.

Por otra parte, el modelo computacional empleado para el análisis de las sobretensiones podría perfeccionarse mediante una representación más detallada de la instalación eléctrica, incorporando un mayor número de conductores, la totalidad de las canalizaciones subterráneas presentes en el laboratorio y otros mecanismos de acoplamiento electromagnético que permitan aproximar con mayor precisión el comportamiento observado experimentalmente.

Asimismo, la metodología de medición de impedancia del sistema de puesta a tierra podría mejorarse mediante el empleo de un generador de impulsos de mayor energía, así como mediante el uso de un conductor de retorno con menor influencia inductiva, por ejemplo, una cinta de cobre, con el fin de reducir la incertidumbre asociada al montaje experimental.

Finalmente, sería de interés aplicar la metodología desarrollada en esta memoria a otras instalaciones de alta tensión, con el propósito de contrastar los resultados obtenidos, evaluar la reproducibilidad del procedimiento propuesto e identificar similitudes y diferencias en los mecanismos de propagación de las perturbaciones electromagnéticas.

Apéndice A

Sistema de puesta a tierra

El laboratorio de alta tensión del Campus Casa Central de la Universidad Técnica Federico Santa María dispone de un sistema de puesta a tierra único, diseñado específicamente para la protección de los equipos y personas que utilizan este edificio con fines educativos.

El sistema está conformado por una extensa malla de puesta a tierra, constituida por un reticulado de conductores dispuestos en cuadrículas de 3,9 m x 3,9 m, lo que asegura la equipotencialidad y la adecuada disipación de corrientes de falla y transitorias hacia el suelo.

En sus orígenes, se contaba con un plano que detallaba las principales características de diseño. Sin embargo, debido a la antigüedad de la construcción, actualmente sólo se dispone de algunas fotografías del plano original, en las que únicamente se logra apreciar las dimensiones principales de este sistema. En consecuencia, no se cuenta con información relevante tal como: el calibre de los conductores empleados, profundidad de enterrado de la malla, conexión en detalle de las cámaras de registro, además de la especificación de las conexiones de tierra de protección y servicio.

Por lo anterior, para efectos de este trabajo investigativo, se ha elaborado una reescritura del plano original, en el cual no se considera la parte arquitectónica del edificio. Dicho plano se presenta en la Figura A.1.
Se trata de un esquema simplificado que reproduce las dimensiones principales de la malla e incluye las conexiones de puesta a tierra más relevantes.

Cabe destacar, que el plano original sólo mostraba cuatro conexiones de toma a tierra ubicadas en la zona del patio de contaminación y numeradas en el plano desde la cámara de registro 14 a la 17. Dado que dicho plano se encuentra desactualizado respecto de las condiciones actuales del laboratorio, se ha incorporado la ubicación de trece cámaras de registro internas, cuyo detalle ha sido aproximado mediante inspección visual y mediciones realizadas en laboratorio.

Esta versión constituye una actualización del plano original, elaborada con el propósito de servir como referencia y guía para el trabajo aquí presentado. Además, proporciona una base documental que facilita la comprensión del estado actual del sistema de puesta a tierra y que, al mismo tiempo, orienta futuras acciones de mejora que el laboratorio de alta tensión podría requerir en función de sus necesidades operativas y de seguridad.

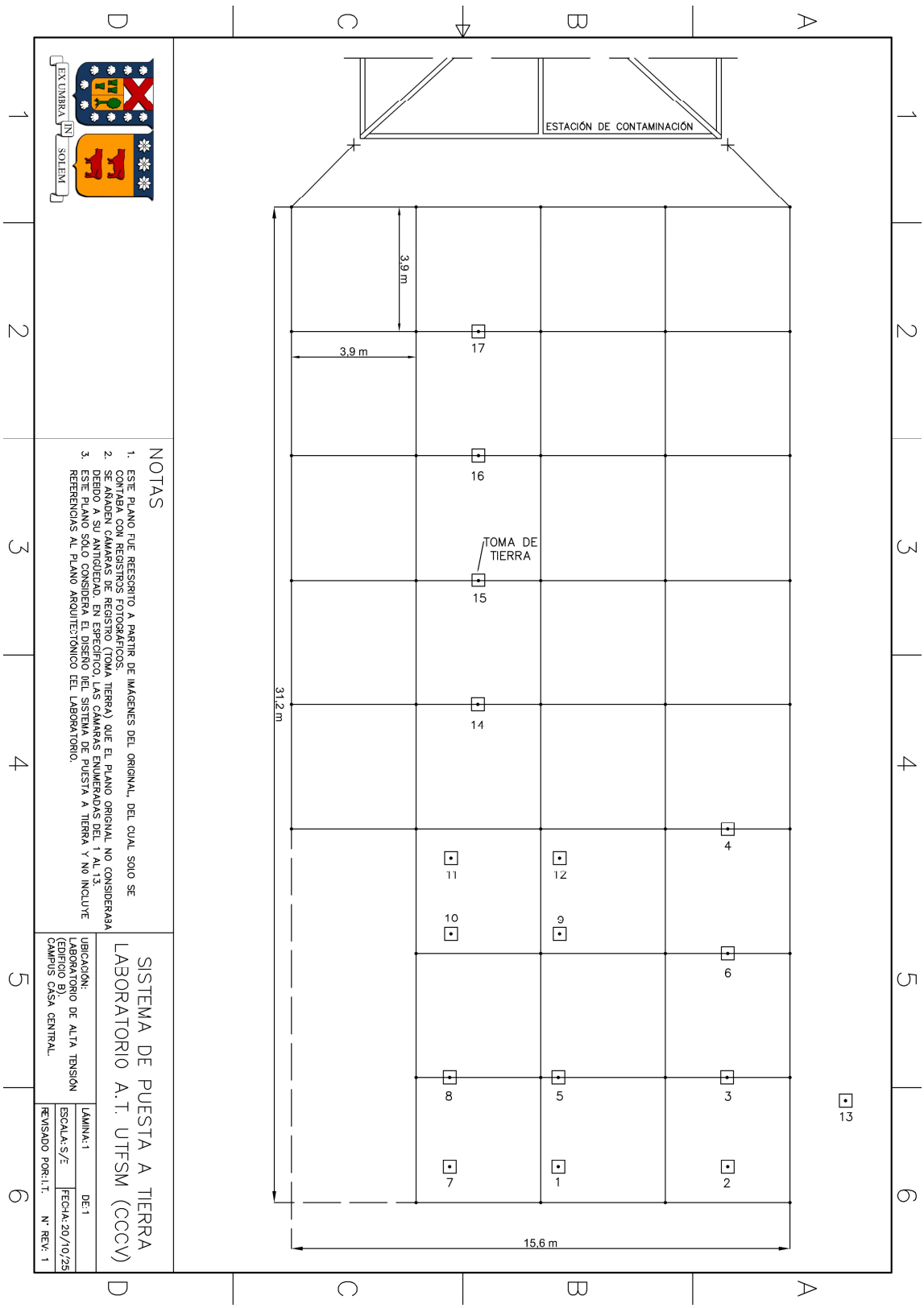
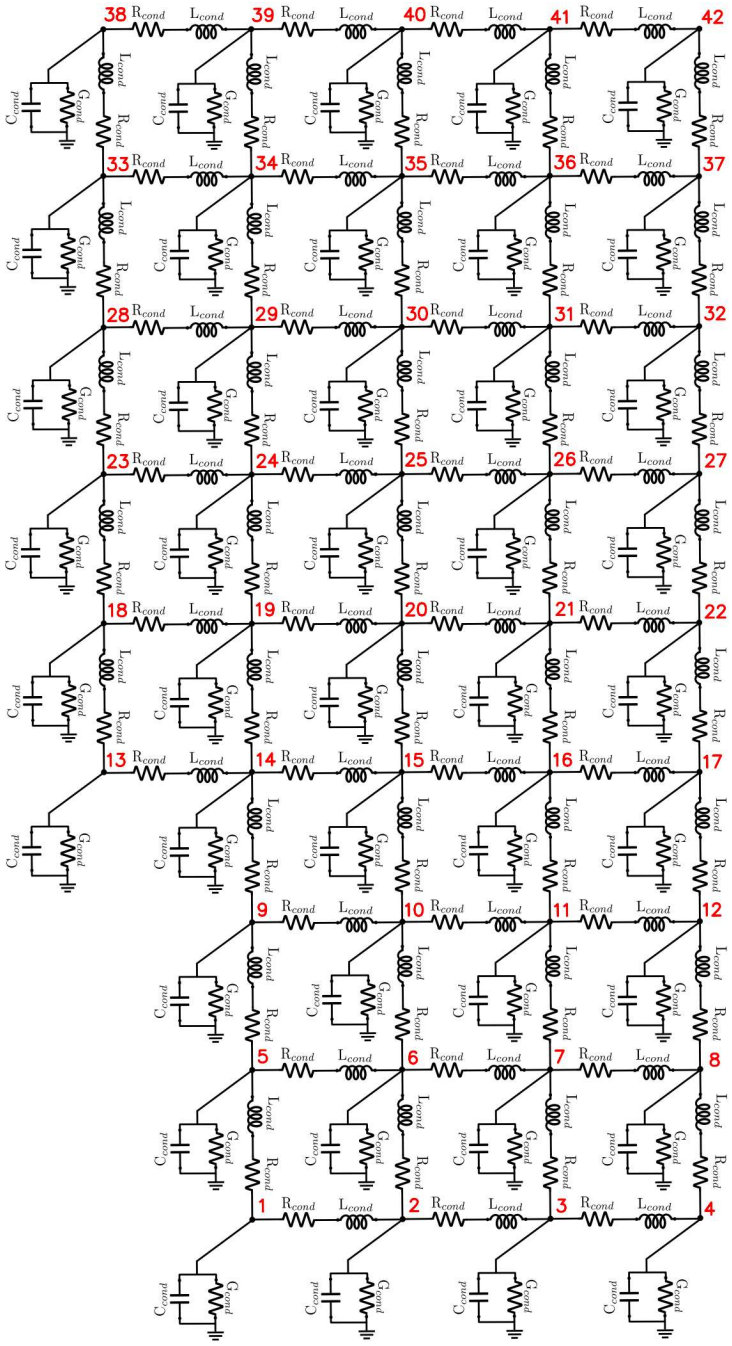


Figura A.1: Sistema de puesta a tierra del laboratorio de alta tensión de la UTFSM, Campus Casa Central, Valparaíso. Elaboración propia.

Apéndice B

Modelo de parámetros concentrados



Apéndice C

Implementación en ATPDraw de fuente de impulso de tensión con puntos de inyección y retorno independientes

El análisis experimental de potenciales transitorios presentado en el Capítulo 4 considera que el punto de inyección y el punto de retorno del generador de impulsos utilizado se encuentran separados por una distancia mínima. Esta disposición tiene como objetivo reducir las tensiones diferenciales a valores seguros para su medición.

Por otra parte, en el software ATPDraw las fuentes de impulso tipo Heidler, por lo general, no permiten modificar de manera directa el punto de retorno de la fuente, por lo que éste queda referenciado al punto de potencial cero remoto. En consecuencia, con el propósito de reproducir teóricamente las condiciones empleadas durante la etapa experimental, en el Capítulo 5 se implementó una fuente flotante mediante el lenguaje MODELS. El código base utilizado se adjunta a continuación. El modelamiento temporal del impulso se fundamenta en la formulación de Heidler descrita en el Capítulo 2.

```
MODEL HEIDLER_12_50
OUTPUT VOUT
VAR
  VOUT
  VM
  TAU1
  TAU2
  N
  ETA
INIT
  VM   := 14218.8
  TAU1 := 1.2E-6
  TAU2 := 50.0E-6
  N    := 2.0
  ETA  := EXP(-(TAU1/TAU2)*((N*TAU2/TAU1)**(1.0/N)))
  VOUT := 0
ENDINIT
EXEC
  VOUT := (VM/ETA)*((T/TAU1)**N)/(1.0 + (T/TAU1)**N)*EXP(-T/TAU2)
ENDEXEC
ENDMODEL
```

Apéndice D

Esquemas de conexión para ensayos con y sin ruptura dieléctrica en ATPDraw

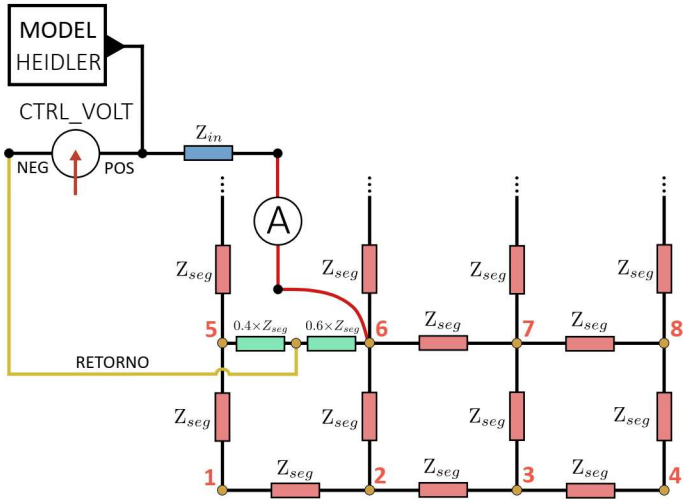


Figura D.1: Esquema de simulación en ATPDraw para prueba con ruptura dieléctrica. Elaboración propia.

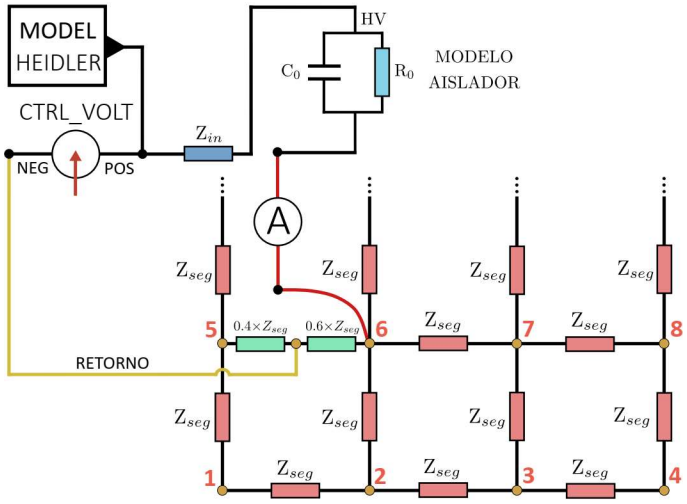
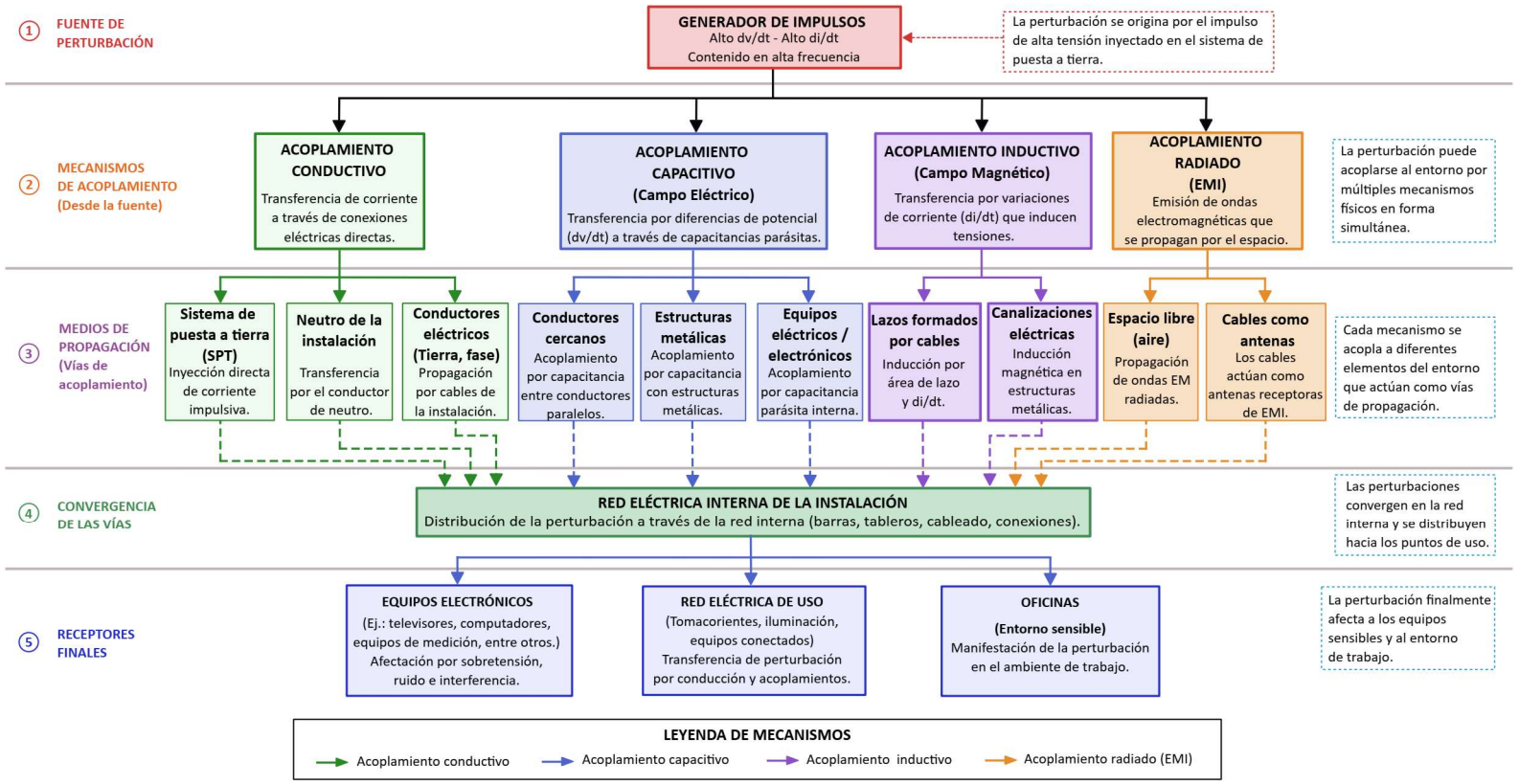


Figura D.2: Esquema de simulación en ATPDraw para prueba sin ruptura dieléctrica. Elaboración propia.

Apéndice E

Mecanismos de acoplamiento



Apéndice F

Planos constructivos del sistema de placas de aluminio propuesto

Se presentan a continuación los planos correspondientes al diseño de los sistemas de mitigación propuestos en el Capítulo 7, los cuales se basan en la incorporación de superficies equipotenciales mediante placas de aluminio en la zona de ensayos del laboratorio de alta tensión.

El objetivo de estos diseños es establecer una configuración constructiva que permita reducir los mecanismos de acoplamiento capacitivo e inductivo identificados previamente, mediante el aumento del área efectiva de las superficies conectadas a tierra y la mejora de la equipotencialidad en torno a los generadores de impulso.

En particular, la Figura F.1 corresponde al diseño propuesto para el generador HAEFELY de 400 kV y 600 J, el cual contempla una superficie equipotencial de aproximadamente 5.32 m^2. Por su parte, la Figura F.2 presenta el diseño propuesto para el generador HAEFELY de 900 kV, con una superficie efectiva reducida de 2.08 m^2 debido a restricciones geométricas de la zona de instalación.

Ambos diseños consideran la conexión eléctrica directa entre el chasis del generador y las placas de aluminio, de modo de conformar una única superficie equipotencial conectada al sistema de puesta a tierra del laboratorio. Esta disposición busca minimizar diferencias de potencial locales y reducir las impedancias asociadas a trayectorias de corriente impulsiva.

Adicionalmente, el sistema contempla el uso de trenzas flexibles de cobre estañado en las interconexiones eléctricas, con el fin de asegurar baja impedancia a altas frecuencias y mitigar problemas asociados a la compatibilidad entre materiales, particularmente la corrosión galvánica entre aluminio y cobre. No obstante, su instalación debe ejecutarse cuidadosamente, garantizando continuidad eléctrica y conexiones de baja impedancia en todas las interfaces.

Se recomienda que cualquier futura modificación o ampliación del sistema mantenga el criterio de continuidad equipotencial y baja impedancia, conforme a los principios establecidos en la norma IEC 61000-5-2 [9].

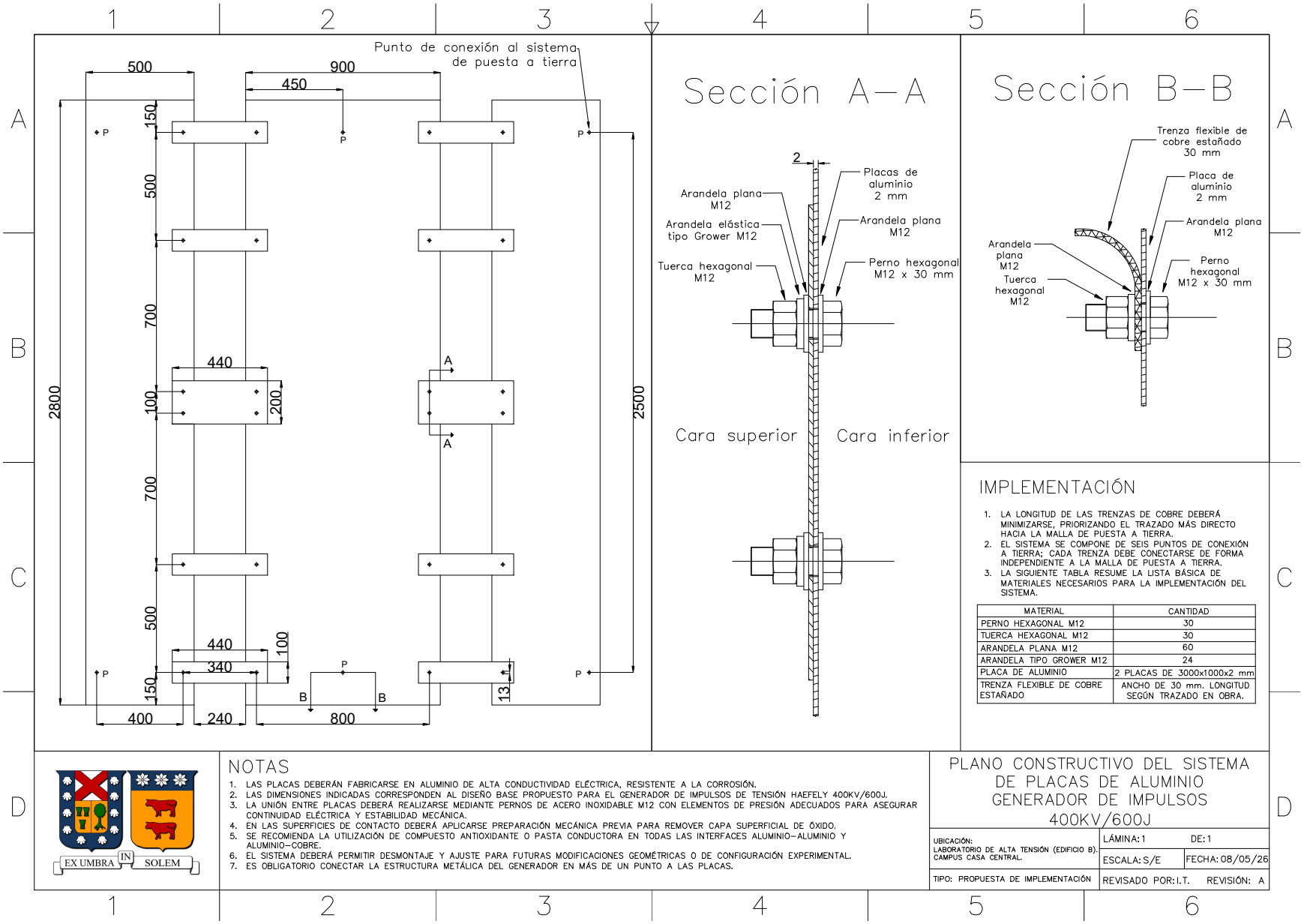


Figura F.1: Diseño general del sistema de placas de aluminio para el generador de impulsos de tensión Haefely 400 kV / 600 J.

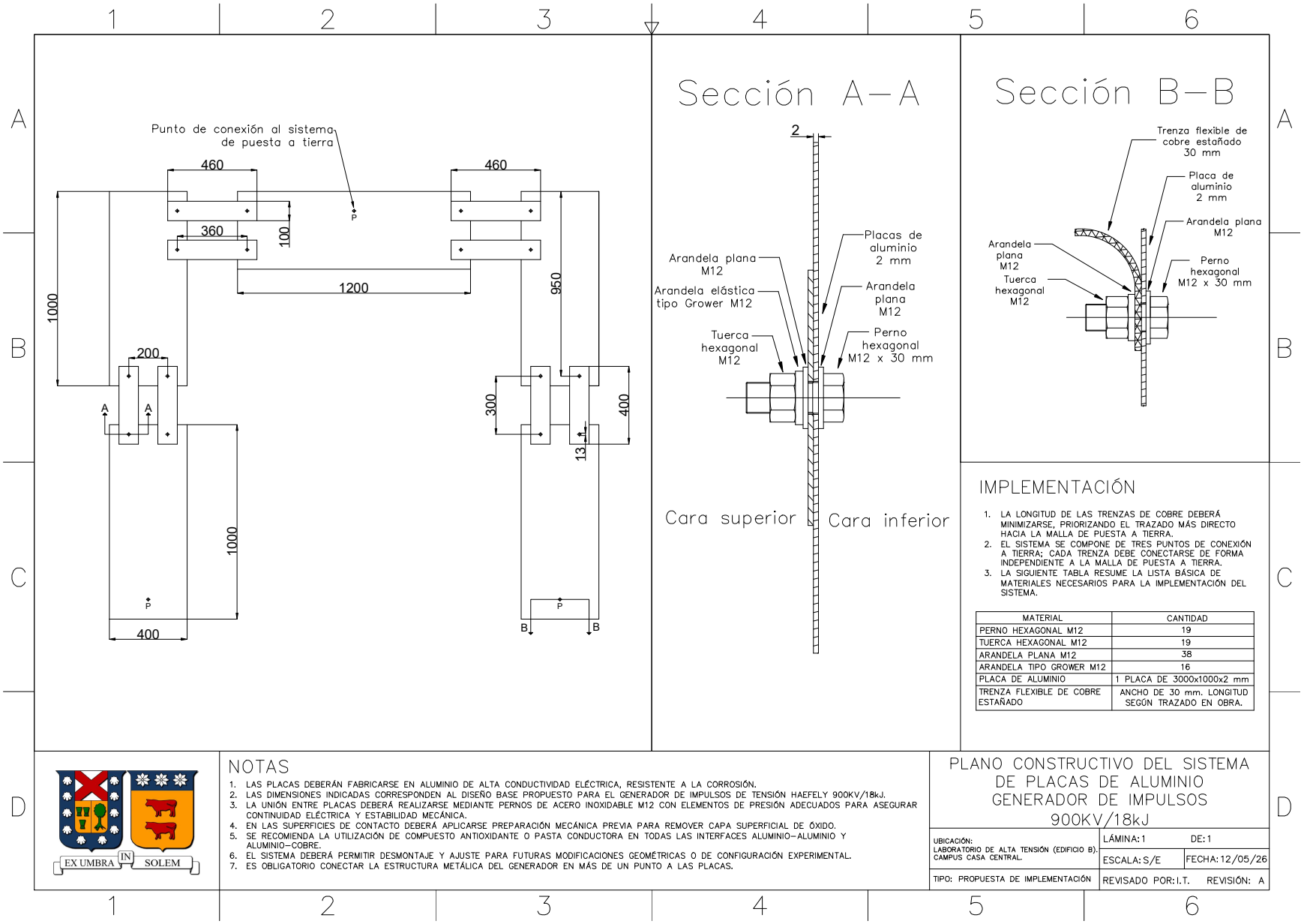


Figura F.2: Diseño general del sistema de placas de aluminio para el generador de impulsos de tensión Haefely 900 kV / 18 kJ.

Bibliografía

[1] International Electrotechnical Commission, "High-voltage test techniques – part 1: General definitions and test requirements," International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, Tech. Rep. IEC 60060-1, 2010.

[2] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering: Fundamentals*, 2nd ed. Oxford, UK: Newnes, 2000.

[3] A. Taher, A. Said, T. Eliyan, and A. Hafez, "Analysis and mitigation of ground grid lightning potential rise," *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 2020.

[4] IEEE Power Engineering Society, "Ieee guide for safety in ac substation grounding," IEEE, New York, NY, USA, Tech. Rep. IEEE Std 80-2000, 2000.

[5] M. R. Chalaki, Z. Ahmed, I. Robinson, and J. V. Klüss, "Performance evaluation of high voltage laboratory grounding," in *2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2018, pp. 212–215.

[6] Schneider Electric, *Compatibilidad electromagnética (CEM). Manual didáctico*, Telemecanique, 1996, reimpresión: abril de 2000.

[7] IEEE Power & Energy Society, "Ieee recommended practice for monitoring electric power quality," IEEE, Tech. Rep. IEEE Std 1159-2019, Aug. 2019.

[8] Megabras, *EM-4058 Digital Earth Tester – User Guide*, Megabras, 2016.

[9] International Electrotechnical Commission, "Electromagnetic compatibility (emc) – part 5: Installation and mitigation guidelines – section 2: Earthing and cabling," International Electrotechnical Commission, Tech. Rep. IEC 61000-5-2, 1997.

[10] J. Moreno, J. A. Ardila-Rey, J. M. Martínez-Tarifa, J. A. Robles, and G. Robles, "Characterization of different cable ferrite materials to reduce the electromagnetic noise in smart grids," *Materials*, vol. 11, no. 2, p. 174, 2018.

[11] KEMET Electronics Corporation, *ESD-SR Snap-on Cores for Round Cables for Low and High Frequency (with case)*, KEMET Electronics Corporation, Fort Lauderdale, FL, USA, jan 2025, data Sheet No. E5005_ESD-SR. [Online]. Available: https://www.kemet.com

[12] International Electrotechnical Commission, "Electromagnetic compatibility (emc) – part 2-5: Environment – description and classification of electromagnetic environments," International Electrotechnical Commission, Tech. Rep. IEC 61000-2-5:2017, 2017.

[13] I. Pearson Electronics, *Model 150 Current Monitor Specifications*, Pearson Electronics, Inc., [En línea]. Disponible en: https://www.pearsonelectronics.com.

[14] I. Tektronix, *P6015A High Voltage Probe Instruction Manual*, Tektronix, Inc., [En línea]. Disponible en: https://www.tek.com.

[15] F. Heidler and C. Hopf, "Lemp calculation and lightning current function," in *Proceedings of the 8th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, vol. 4, Yokohama, Japan, 1993, pp. 237–240.

[16] F. Heidler, "Analytische blitzstromfunktion zur lemp-berechnung," in *Proceedings of the 18th International Conference on Lightning Protection*, Munich, Germany, 1985, pp. 63–66.

[17] F. Heidler and J. Cvetić, "A class of analytical functions to study the lightning effects associated with the current front," *European Transactions on Electrical Power*, vol. 12, no. 2, pp. 141–150, 2002.

[18] G. V. S. Rocha, R. P. D. S. Barradas, J. R. S. Muniz, U. H. Bezerra, I. M. D. Araújo, D. D. S. A. da Costa, A. C. D. Silva, M. V. A. Nunes, and J. S. E. Silva, "Optimized surge arrester allocation based on genetic algorithm and atp simulation in electric distribution systems," *Energies*, vol. 12, no. 21, p. 4110, 2019.

[19] J. He, R. Zeng, and B. Zhang, *Methodology and Technology for Power System Grounding*. Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2012.

[20] C. A. Nucci, F. Rachidi, M. V. Ianoz, and C. Mazzetti, "Lightning-induced voltages on overhead lines," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 35, no. 1, pp. 75–86, Feb. 1993.

[21] IEEE, "Ieee standard for high-voltage testing techniques," IEEE, Tech. Rep. IEEE Std 4-2013, May 2013.

[22] N. M. Osorio, *Sistemas de puesta a tierra*. Santiago, Chile: ProCobre, 1999.

[23] G. Celli, E. Ghiani, and F. Pilo, "Behaviour of grounding systems: A quasi-static emtp model and its validation," *Electric Power Systems Research*, vol. 85, pp. 24–29, Apr. 2012.

[24] H. He, M. Peng, Z. Yi, X. Liu, and Y. Hu, "Grounding grid transient simulation and its application based on the atp-emtp," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Digital Manufacturing and Automation (ICDMA)*, Guilin, China, 2012, pp. 454–457.

[25] P. G. S. Freire, E. T. W. Neto, and C. de Salles, "Evaluation of the grounding system of the high voltage laboratory: Case study," in *22nd International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2021)*, 2021, pp. 719–724.

[26] D. Woodhouse, I. McLagan, and S. Palmer, "Effective use of continuity testing to assess grounding system integrity," in *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 2015, pp. 202–207.

[27] N. Harid, H. Griffiths, S. Mousa, D. Clark, S. Robson, and A. Haddad, "On the analysis of impulse test results on grounding systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 6, pp. 5324–5334, 2015.

[28] H. W. Ott, *Electromagnetic Compatibility Engineering.* Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2009.

[29] Comisión Nacional de Energía, "Norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución," Comisión Nacional de Energía, Santiago, Chile, Tech. Rep. Resolución Exenta No. 209, May 2024.

[30] International Electrotechnical Commission, "Electromagnetic compatibility (emc) – part 4-30: Testing and measurement techniques – power quality measurement methods," International Electrotechnical Commission, Tech. Rep. IEC 61000-4-30, Oct. 2025.

[31] Academy of EMC, "Emc standards," https://www.academyofemc.com/emc-standards, n.d., [En línea]. Disponible en: https://www.academyofemc.com/emc-standards. [Accedido: 25-mar-2026].

[32] Superintendencia de Electricidad y Combustibles, "Pliego técnico normativo rptd no. 02: Clasificación de instalaciones," Superintendencia de Electricidad y Combustibles, Santiago, Chile, Tech. Rep. Resolución Exenta No. 33.277, Sep. 2020.

[33] Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), "Pliego Técnico Normativo RIC no. 06: Puesta a Tierra y Enlace Equipotencial," 2020, resolución Exenta no. 33.877, Reglamento de Seguridad de las Instalaciones de Consumo de Energía Eléctrica, Decreto no. 8 de 2019, Ministerio de Energía. [En línea]. Disponible en: https://www.sec.cl/sitio-web/wp-content/uploads/2021/01/RIC-N06-Puesta-a-Tierra.pdf. [Accedido: 24-may-2026].

[34] Z. Liu and B. Zhang, "Test method for transient characteristics of grounding grid with current return point located in the same grid," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 37, no. 4, pp. 2902–2910, 2022.

[35] W. H. H. Jr. and J. A. Buck, *Teoría electromagnética*, 7th ed. México: McGraw-Hill, 2006.

[36] UIT-R, "Características eléctricas de la superficie de la tierra," Unión Internacional de Telecomunicaciones, Tech. Rep. Recomendación UIT-R P.527-4, jun 2017.

[37] Y. Mizuno, K. Naito, Y. Suzuki, S. Mori, Y. Nakashima, and M. Akizuki, "Voltage and temperature distribution along semiconducting glaze insulator strings," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 6, no. 1, pp. 100–104, 1999.

[38] B. Pungsiri and S. Chotigo, "Design and construction of grounding system in high voltage laboratory at kmutt," in *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, 2008, pp. 745–747.

[39] Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), "Pliego Técnico Normativo RIC N.º 04: Conductores, Materiales y Sistemas de Canalización," Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), Santiago, Chile, Pliego Técnico Normativo RIC N.º 4, 2021.