



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS**



TESIS

**METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE HUELLAS
ELECTROMAGNÉTICAS EN EQUIPOS E INSTALACIONES
DE POTENCIA**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN TECNOLOGÍA AVANZADA**

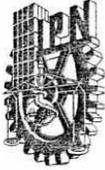
P R E S E N T A:

VICTOR URIEL HAU HERNÁNDEZ

DIRECTORES

**DR. PRIMO ALBERTO CALVA CHAVARRÍA
DR. CARLOS RAMÍREZ PACHECO**

MÉXICO, D.F. 2012



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTORES DE TESIS

México, D.F. a 15 de Febrero del 2012

El Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de UPIITA en su sesión extraordinaria No. 2 celebrada el día 14 del mes de marzo conoció la solicitud presentada por el(la) alumno(a):

<u>HAU</u> Apellido paterno	<u>HERNÁNDEZ</u> Apellido materno	<u>VICTOR URIEL</u> Nombre (s)							
Con registro: <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">A</td> <td style="padding: 2px;">1</td> <td style="padding: 2px;">0</td> <td style="padding: 2px;">0</td> <td style="padding: 2px;">2</td> <td style="padding: 2px;">1</td> <td style="padding: 2px;">1</td> </tr> </table>			A	1	0	0	2	1	1
A	1	0	0	2	1	1			

Aspirante de:

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:
Metodología para la obtención de Huellas Electromagnéticas en equipos e instalaciones de potencia.

De manera general el tema abarcará los siguientes aspectos:
Desarrollo de algoritmos de comunicación entre registradores y PC's.
Diseño de una etapa de acceso en línea a la información almacenada en la PC.
Clasificación y priorización de la información registrada.
Creación de un banco de huellas electromagnéticas para subestaciones eléctricas de potencia.

2.- Se designan como Directores de Tesis a los Profesores:
Dr. Primo Alberto Calva Chavarría y al Dr. Carlos Ramírez Pacheco

3.- El trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesina será elaborado por el alumno en:
UPIITA, CFE

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente hasta la aceptación de la tesis por la Comisión Revisora correspondiente:

Directores de Tesis

Dr. Primo Alberto Calva Chavarría

Aspirante

Victor Uriel Hau Hernández

Dr. Carlos Ramírez Pacheco
Presidente del Colegio

M. en C. Griselda Sánchez Otero



S. E. P.
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA
EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 9:00 horas del día 9 del mes de Marzo del 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de SEPI-UPIITA para examinar la tesis titulada:

Metodología para la obtención de Huellas Electromagnéticas en equipos e instalaciones de potencia

Presentada por el alumno:
HAU HERNÁNDEZ VICTOR URIEL
Apellido paterno Apellido materno
Nombre(s)

Con registro:

A	1	0	0	2	1	1
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA AVANZADA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

DR. PRIMO A. CALVA CHAVARRÍA
1er VOCAL

DR. CARLOS RAMÍREZ PACHECO
2º VOCAL

DRA. LAURA MOONE GARAY JIMÉNEZ
PRESIDENTE

DR. ALBERTO LUVIANO JÁUREZ
SECRETARIO

DR. RAÚL CASTILLO PÉREZ
3er VOCAL

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

M. EN C. GRISELDA SÁNCHEZ OTERO



S. I. P.
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA
EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS.
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

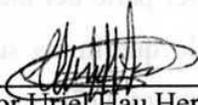


INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 9 del mes de Marzo del año 2012, el (la) que suscribe Victor Uriel Hau Hernández alumno (a) del Programa de Maestría en Tecnología Avanzada con número de registro A100211, adscrito a la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías avanzadas, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Primo Alberto Calva Chavarría y cede los derechos del trabajo intitulado Metodología para la Obtención de Huellas Electromagnéticas en Equipo e Instalaciones de Potencia, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección fam9_0ne@yahoo.com.mx Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Victor Uriel Hau Hernández
Nombre y firma

Hay tantas personas a quienes debo agradecer, que no terminaría de nombrarlas, se omito alguna, les ofrezco una disculpa, no es mi intención hacerlo, simplemente no puedo por la naturaleza del presente trabajo nombrarlos a todos, pero tengan en cuenta que están en mi corazón y mis oraciones.

Quiero agradecer al Instituto Politécnico Nacional por darme la oportunidad de formarnos ética y profesionalmente y ser parte de las generaciones que contribuyen día a día con el desarrollo de la ingeniería en nuestro país, poniendo siempre la “Técnica al Servicio de la Patria”.

A la Comisión Federal de electricidad, a la Gerencia de Ingeniería Especializada, por todas las facilidades proporcionadas para la realización de las pruebas y trabajos de campo en las subestaciones Texcoco, Puebla II, Coyoacán y Querétaro, así como a los trabajadores que laboran en dichas instalaciones, gracias por sus concejos y observaciones.

Agradezco al Dr. Primo Alberto Calva Chavarría y al Dr. Carlos Ramírez Pacheco, por su asesoría, paciencia, apoyo y confianza durante el desarrollo de esta tesis. Al M. en C. Ángel Pretelín Ricárdez, M. en C. Abraham Cruz Rivera, Dra. Sara Guadalupe Cruz y Cruz, Dra. Laura Ivoone Garay Jiménez, al técnico en sistemas Daniel Hernández Aragón, a la M. en C. Diana Torres Peñalosa y al M. en C. Julio Alberto Mendoza, por su guía, consejos y apoyo incondicional.

A mi mamá María del Socorro, mis hermanos Juan Leonardo y Leyla del Carmen, mi esposa Maricruz y a mi hija Karol Daleth, porque sin su paciencia, comprensión, oraciones y amor incondicional, aún en la enfermedad, no hubiera sido posible la culminación de ésta etapa de mi vida, los amo.

A la Dra. María Isabel Ayala Uribe y familia, a la Q.A. Alejandra Medina y familia, por su impulso, apoyo técnico y moral, por su amistad incondicional, por su ejemplo de vida y virtudes. A mi familia y amigos cercanos, gracias por su apoyo y oraciones.

Finalmente, agradezco al Dr. Roberto Daniel Mota Esteves, por su sencillez, humildad y por ser un excelente profesor, por mostrarnos el método socrático de una manera clara en la búsqueda de la verdad consciente de nuestra falta de conocimiento, y por impulsar en nosotros, sin saberlo, el gusto por la vida, sin importar las adversidades y problemas; demostrando que la entrega generosa a lo que queremos, poniendo siempre en alto los valores personales, nos da como resultado la satisfacción de vida.

Gracias a todos y que Dios les Bendiga siempre.

Victor Uriel Hau Hernández.

México, D. F. 2012

Dedico éste trabajo a Dios por su infinito Amor y misericordia. A mi amada familia mi Papá (+), mi Mamá, mis Hermanos, mi Esposa y mi Hija por su incondicional apoyo e impulso anímico. A todos mis familiares y amigos que han recorrido éste camino conmigo, gracias por todo. A la Casa Hogar villa Nolasco y a su Director por brindarme su amistad, apoyo y un lugar cuando lo necesitaba, a la Comunidad de los Misioneros Servidores de la Palabra por su amistad sincera y oraciones.

Contenido	Página
Resumen.	i
Presentación de la Tesis.	iii
Objetivo.	v
Justificación.	vi
Capítulo 1. Estado del arte: Descargas Parciales.	1
1.1 Introducción a las Descargas Parciales	2
1.2 Descargas Parciales en aislamientos.	4
1.3 Causas de descargas parciales en los sistemas de potencia.	11
1.4 Métodos de detección de descargas parciales.	18
Capítulo 2. Método radiométrico de detección de Descargas Parciales.	29
2.1 Introducción.	30
2.2 Generación y detección de las ondas electromagnéticas.	35
2.3 Relevancia del método radiométrico.	36
Capítulo 3. Desarrollo de la metodología para la obtención de Huellas patrón en equipos e instalaciones de potencia.	40
3.1 Introducción.	41
3.2 Desarrollo del sistema de comunicación osciloscopio-computadora.	44
3.3 Optimización del software de clasificación.	52
3.4 Desarrollo de la localización de descargas parciales.	78
Capítulo 4. Trabajo de campo	82
4.1 Introducción.	83
4.2 Trabajo de campo en la Subestación Texcoco.	83
4.3 Trabajo de campo en la Subestación Puebla II.	89
4.4 Trabajo de campo en la Subestación Coyoacán.	106
4.5 Monitoreo de Transformador con descargas parciales.	113
Capítulo 5. Análisis de las señales	119
5.1 Localización de descargas parciales.	120
5.2 análisis de las señales.	129
Conclusiones	136
Bibliografía	139
Apéndice 1. Código fuente de comunicación.	142
Apéndice 2. Huellas patrón de los equipos de potencia	153
Apéndice 3. Metodología para la obtención de huellas electromagnéticas de equipos e instalaciones de potencia.	170
Apéndice 4. Programa de localización de descargas parciales	174

Índice de figuras.

	Página
Figura 1. Falla en papel aislante para transformador de 400 kV debida a la presencia de una cavidad.	vii
Figura 2. Afectaciones al TIU por diversas fallas en transmisión en el 2011. ...	viii
Figura 3. Porcentaje de falla en Interruptores de Potencia.	ix
Figura 4 Esquema de una avalancha inicial en aire.	5
Figura 5. Modelo de una Avalancha Electrónica, provocada por la incidencia de un fotón en medios gaseosos.	6
Figura 6. Efecto de la descarga en el borde entre un sólido y un gas.	9
Figura 7. Forma de onda de la corriente inducida por una descarga parcial rápida asociada a una sobre tensión.	13
Figura 8. Representación de formación de arborescencias (Treeing) debido a una cavidad.	17
Figura 9. Ejemplo de un circuito de prueba de detección de descargas parciales y gráfica de corrientes de desplazamiento y de Descarga Parcial.	20
Figura 10. Esquema de propagación de la señal en un medio aislante producida por una descarga parcial detectada por el método ultrasónico.	26
Figura 11. Diagrama detallado de un sistema de detección de descargas parciales basado en el método ultrasónico con sensores conectados por medio de fibra de vidrio.	28
Figura 12. Diagrama del patrón de descargas parciales internas en los aislamientos. a) En una cavidad dentro del aislante, b) debido a múltiples cavidades.	33
Figura 13. Descargas parciales internas en una cavidad entre el dieléctrico y el electrodo de tierra.	34
Figura 14. Diagrama del patrón de descargas internas en una cavidad entre el dieléctrico y el electrodo de tierra.	34
Figura 15. Diagrama de funcionamiento del sistema radiométrico desarrollado por J. P. Moore.	37

Figura 16. Antena díscono utilizada en el sistema.	42
Figura 17. Esquema de funcionamiento del nuevo sistema de detección de descargas parciales.	43
Figura 18. Huella patrón del comportamiento a valor nominal de un Interruptor de Potencia de 230 kV en operación de cierre.	50
Figura 19. Fotografía del Interruptor de Potencia de 230 kV.	51
Figura 20. Llamado y guardado de datos en el <i>workspace</i>	53
Figura 21 Menú principal de <i>wavelet Toolbox</i>	53
Figura 22. Menu principal de <i>wavelet Packet 1-D</i>	54
Figura 23. Acceso a los datos en el <i>wavelet packet 1-D</i>	54
Figura 24. Parámetros de entrada. Inicio del procesamiento primario.	55
Figura 25. <i>Best Tree</i> y frecuencia de coeficientes de la señal.	55
Figura 26. Señal procesada con sus valores absolutos de coeficientes.	56
Figura 27. Señal original (en negro), y señal procesada (en rojo) fruto del procesamiento primario con el <i>wave packet 1-D</i>	56
Figura 28. Obtención de coeficientes de Fourier de las señales en la base de datos y de la señal desconocida.	57
Figura 29. Determinación de la fuente por medio del procesamiento secundario.	58
Figura 30 a) Señal de transformador pequeño, b) Coeficiente de Fourier de la señal de transformador.	59
Figura 31. Lectura de una señal con sus características.	61
Figura 32. Análisis de la señal mostrada en la figura No. 31 para adquirir el tiempo de arribo, el cual está representado por la variable <i>x</i> mostrada en la imagen.	62
Figura 33. Representación de <i>Best Tree iteration</i> de la transformada Walsh Hadamard.	65
Figura 34. Señal original y reconstruida de una Descarga Parcial captada en la Subestación Texcoco utilizando la transformada Walsh-Hadamard.	66

Figura 35. a) Muestra una señal guardada en la base de datos perteneciente a una maniobra de Apertura de Cuchillas captada en la SE Texcoco con sus coeficientes obtenidos por WHT, b) Muestra la señal Desconocida con sus coeficientes obtenidos por medio de la WHT.	70
Figura 36. Determinación de la fuente de una señal desconocida.	72
Figura 37. Señales utilizadas para crear la señal desconocida sdesc2. a) señal de apertura de cuchillas, b) cierre de cuchillas.	73
Figura 38. Obtención de los coeficientes de la señal mezclada sdesc2 por medio de la FWHT.	74
Figura 39. Clasificación de la señal sdesc2.	75
Figura 40. Desarrollo y guardado de una nueva variable para poner a prueba la eficacia del programa de clasificación.	76
Figura 41. Resultado de la clasificación de la Señal guardada en la variable A.	77
Figura 42. Representación gráfica de la localización por la técnica esférica.	79
Figura 43. Representación de los tiempos de arribo por canal de una señal captada por las antenas.	80
Figura 44. Ubicación del equipo en la subestación Texcoco alrededor del Interruptor de Potencia No.93620 de la línea Texcoco - Zocac Puebla.	84
Figura 45. Distribución de las antenas en la SE Texcoco.	85
Figura 46. Ubicación de las antenas en la Subestación.	86
Figura 47. Captura de señal del Interruptor de Potencia A3460 en operación cerrado con carga.	88
Figura 48. Ubicación del equipo para la captura de Señales de descargas parciales.	89
Figura 49. Huella del ruido de fondo de la subestación Puebla II en el área de 400 kV.	90
Figura 50. Señal de cuchillas A3462 en operación de apertura a) canal 1; b) canal 2; c) canal 3 y d) canal 4 del osciloscopio.	93
Figura 51. Señal de cierre de cuchillas.	95

Figura 52. Tiempos de arribo por canal tomados para la señal captada de las cuchillas en la SE Puebla II: a) canal 1; b) canal 2; c) canal 3 y d) canal 4.	97
Figura 53. Ventana de Matlab para realizar la localización de la descarga.	98
Figura 54. Resultado de las iteraciones para localizar la fuente de la descarga captada por las antenas, correspondiente a las cuchillas de 400 kV, SE Puebla II.	99
Figura 55. Cierre de cuchillas A3462 bus 2 fase A.	100
Figura 56. Apertura de Cuchillas A3462 bus 2, fase A.	100
Figura 57. Arreglo del sistema para la toma de la huella patrón del Transformador de potencia.	101
Figura 58. Señales de huella patrón del Transformador monofásico de potencia. a) Primera toma, b) segunda toma.	102
Figura 59. Captura de huella patrón de interruptor de potencia en operación cierre en vacío.	103
Figura 60. Huella Patrón de Interruptor de Potencia en operación de apertura en vacío.	104
Figura 61. Captura de señal del Interruptor de Potencia A3460 en operación cerrado con carga.	105
Figura 62. Colocación de las antenas en la caseta del GIS en el lado de 230 kV.	107
Figura 63. Huella patrón de la SE Coyoacán con las terminales a prueba desenergizadas.	107
Figura 64. Colocación de las antenas para monitoreo completo de la subestación.	108
Figura 65. Huella patrón de la SE Coyoacán con las terminales a prueba desenergizadas.	109
Figura 66. Ejemplo de tiempo de arribo. Este tiempo se utilizó para realizar la localización de la descarga parcial desconocida.	110
Figura 67. Inicio del programa de localización de descargas parciales.	111

Figura 68. Tiempos de arribo de la señal ordenados de acuerdo a cual es captado primero hasta el último.	111
Figura 69. Coordenadas de localización de la descarga desconocida, la cual concuerda con la ubicación de las maniobras realizadas en el lado de 23 kV.	112
Figura 70. Transformador reductor de 400 a 230 kV.	113
Figura 71. Señal emitida por el Transformador.	114
Figura 72. Segundo monitoreo al transformador.	115
Figura 73. Tercer monitoreo al Transformador Fase A Reserva.	116
Figura 74. Descarga corona detectada en los aisladores del transformador.	117
Figura 75. Imagen de los Aisladores del Transformador captada sin la cámara corona.	118
Figura 76. Esquema de la distribución de las antenas en la SE Puebla para realizar la localización de las maniobras de apertura – cierre de cuchillas.	121
Figura 77. Esquema de la localización de la descarga generada por la maniobra de apertura – cierre de cuchillas.	122
Figura 78. Colocación de las antenas para inicio de maniobras.	123
Figura 79. Ejemplo de tiempo de arribo. Este tiempo se utilizó para realizar la localización de la descarga parcial desconocida.	124
Figura 80. Tiempos de arribo y coordenadas de la señal ordenados de acuerdo a cual es captado primero hasta el último.	125
Figura 81. Coordenadas de localización de la descarga desconocida, la cual concuerda con la ubicación de las maniobras realizadas en el lado de 23 kV.	126
Figura 82. Señal de descarga parcial capturada en el transformador de la fase B.	127
Figura 83. Esquema de ubicación de las antenas alrededor del Transformado de la fase B en la Subestación Querétaro Potencia.	127
Figura 84. Análisis de las señales; a) tiempo de arribo del canal 1 del osciloscopio, tiempo de arribo del canal 2, obtención del tiempo de arribo del canal 3, tiempo de arribo del canal 4.	128

Figura 85. Resultado de la localización de la señal. Se observan varias respuestas porque es un programa con iteraciones, cuando se obtiene el resultado eficaz de acuerdo a los parámetros establecidos de error, entonces se arroja el resultado.	129
Figura 86. Comparación de las distintas señales de Interruptor de potencia.	131
Figura 87. Comparación de las distintas señales de Interruptor de potencia.	133
Figura 88. Comparación de las distintas señales de Interruptor de potencia.	134
Figura 89. Huella Patrón de Cuchillas de 230 kV, ubicadas en la línea Texcoco-Zocac Puebla, en la SE Texcoco, en operación de Cierre con carga.	152
Figura 90. Huella Patrón de Cuchillas de 230 kV, ubicadas en la línea Texcoco-Zocac Puebla, en la SE Texcoco, en operación de Cierre con carga.	153
Figura 91. Huella del ruido de fondo de la Subestación Texcoco en el lado de 230 kV.	154
Figura 92. Huella Patrón Corona en buses, ubicados en la línea Texcoco-Zocac Puebla, en la SE Texcoco.	155
Figura 93. Huella Patrón de Interruptor de Potencia de 230 kV, ubicado en la línea Texcoco-Zocac Puebla, en la SE Texcoco, en operación de Cierre con carga.	156
Figura 94. Huella Patrón de Cuchillas de 400 kV, ubicadas en la línea A3460, en la SE Puebla II, en operación de Apertura sin carga.	157
Figura 95. Huella Patrón de Cuchillas de 400 kV, ubicado en la línea A3460, en la SE Puebla II, en operación de Apertura con carga.	158
Figura 96. Huella Patrón de Cuchillas de 400 kV, ubicado en la línea A3460, en la SE Puebla II, en operación de Cierre con carga.	159
Figura 97. Huella del ruido de fondo de la Subestación Puebla II del área de 400 kV.	160
Figura 98. Huella Patrón del Transformador de 400/230 kV, ubicado en el banco de Transformadores de la SE Puebla II, en operación Nominal.	161
Figura 99. Huella Patrón del Interruptor de Potencia de 400 kV, ubicado en línea A3460 de la SE Puebla II, en operación cierre al vacío (sin Carga).	162

Figura 100. Huella Patrón del Interruptor de Potencia de 400 kV, ubicado en línea A3460 de la SE Puebla II, en operación apertura al vacío (sin Carga).	163
Figura 101. Huella Patrón del Interruptor de Potencia de 400 kV, ubicado en línea A3460 de la SE Puebla II, en operación cierre con Carga.	164
Figura 102. Huella del ruido de fondo dentro de la caseta de la SE Coyoacán con las terminales a prueba desenergizadas.	165
Figura 103. Huella del ruido de fondo fuera de la caseta de la Subestación en el lado de 230 kV.	166
Figura 104. Huella Patrón de maniobras con cuchillas de la subestación en el lado de 23 kV.	167
Figura 105. Huella patrón de Cuchillas en subestación GIS en el lado de 230 kV.	168
Figura 106. Huella patrón de Interruptor de Potencia en Subestación GIS en el lado de 230 kV.	169

Índice de Tablas

	Página
Tabla 1. Indicadores operativos de Calidad del Servicio de Energía eléctrica sin considerar la Zona Centro.	viii
Tabla 2. Principales características de los tres sistemas de detección de descargas parciales.	38
Tabla 3. Datos de placa del interruptor de potencia de 230 kV.	52
Tabla 4. Ajustes al osciloscopio para capturar la señal de la subestación en el área de 230 kV.	87
Tabla 5. Ajustes al osciloscopio para captar la señal de las Cuchillas en el área de 230 kV.	87
Tabla 6. Ajustes al osciloscopio para captar la señal del Interruptor de Potencia en el área de 230 kV en operación de cierre con carga.	87
Tabla 7. Settings del osciloscopio para el área de 400 kV.	90
Tabla 8. Segundo ajuste del osciloscopio para el área de 400 kV.	91
Tabla 9. Ajuste del osciloscopio para captar señal de cierre con carga del Interruptor de potencia de 400 kV.	105
Tabla 10. Primeros ajustes del osciloscopio dentro de la subestación GIS.	106
Tabla 11. Ajustes del osciloscopio para captura de huella patrón completa de la subestación.	108
Tabla 12. Datos de placa del transformador.	113
Tabla 13. Selección de tiempos de arribo para ajustes del osciloscopio.	171

Glosario.

Descarga Parcial: De acuerdo a la Norma IEC 60270, una Descarga Parcial es el proceso de descarga que no puentea la distancia entre dos electrodos.

CFE: Comisión Federal de Electricidad.

TIU (Tiempo de Interrupción por Usuario). Es un indicador que contabiliza el tiempo durante el cual el servicio eléctrico no está disponible.

Huella Electromagnética Patrón: Es la señal electromagnética característica de un equipo de potencia trabajando en condiciones estándar de operación.

VISA (*Virtual Instrument Standard Architecture*). Especificación definida por *Agilent & National Instrument*. Librería que puede ser usada para desarrollar aplicaciones y drivers de I/O de forma que se generen *softwares* que diferentes empresas puedan trabajar conjuntamente sobre el mismo sistema y que puedan ser instalados en conjunción con drivers *VXI plug&play* utilizando simultáneamente varios medios de comunicación (GPIB, VXI, RS232, LAN, USB, etc) y en aplicaciones desarrolladas con diferentes lenguajes (C++, VisualBasic, MATLAB, etc.) .

WHT: *Walsh Hadamard Transform*.

FFT: *Fast Fourier Transform*.

Multipath: Multitrayectoria, es el efecto que genera ruido en las señales, causado por el rebote en las estructuras metálicas de la subestación.

SE: Subestación Eléctrica.

Libranza: Permiso de desconexión de una línea de transmisión para realizar labores de mantenimiento.

GIS: *Gas Insulated Substation*. Subestaciones compactadas aisladas con sistema de extinción de arco de SF₆.

Lista de Comandos MATLAB

Visa (*Virtual Instrument Standard Architecture*). `obj = visa('vendor','rsrname')` Crea un objeto VISA con un nombre y una dirección específica dada en `vendor`. Para tener el nombre es necesario indagarlo por medio del comando `instrinfo`, o proporcionarlo si ya se conoce.

query. Escribe y recibe datos del instrumento.

fopen. Permite abrir archivos u objetos generados y obtiene datos de ellos para su utilización. Al utilizarlo es necesario terminar su adquisición con **fclose**.

ans. Matlab genera una variable de respuesta automática cuando no se genera una variable dentro del programa y es posible utilizarla.

head. Permite la escritura de en dos columnas al tiempo en que se visualiza al inicio los datos requeridos por el comando **query**.

fwrite. Escribe datos a un archivo binario. `fwrite(fileID, A)` escribe los elementos de la matriz `A` a un archivo binario en orden y en columnas.

fprnt. Escribe los datos a un archivo de texto.

int8. Convierte a una señal integral. `I = int*(X)` * puede ser 8, 16, 32 o 64. Convierte los elementos de la matriz `X` a una señal integrada. `X` puede ser numérico como una variable doble.

linspace. Genera un vector lineal espaciado.

line. Genera una línea en la gráfica con valores iniciales `[0 1]` en `x` y `[0 1]` en `y`. Dichos valores se pueden modificar de acuerdo a las necesidades.

binblockread. Lee los datos de un bloque binario. $A = \text{binblockread}(\text{obj}, 'precision')$. Obj simboliza la interface del objeto generado para el equipo a controlar, precision es el número de bits que lee de cada valor y la interpretación de esos bits como valores caracteres, integrales o puntos flotantes.

stairs. Permite graficar variables específicas, lo que se necesita es que sean del mismo grado de salida. Es utilizada para realizar gráfica de una cierta variable contra el tiempo. En los ejes se permite determinar el color de las líneas por medio del comando *ColorOrder*.

set. Permite tener en la gráfica generada los datos de la señal captada del objeto

instrfindall. Encuentra puertos seriales visibles o escondidos en donde se haya declarado la existencia de un instrumento mandando una señal que nos permite regresar a los equipos a su estado inicial.

xlswrite: Escribe una Hoja de Cálculo de Microsoft en la primera hoja de Excel, iniciando en la celda A1.

estado: Es una respuesta lógica del programa, si el resultado es 0, significa que el archivo no fue creado; si es 1, el archivo se creó satisfactoriamente.

disp: Imprime un texto en el Command Window.

xlsread: Lee los datos guardados en una hoja de Excel. Para ello es necesario proporcionarle la dirección de la carpeta donde se encuentra dicha información, la hoja a la cual se desea tener acceso, el rango o columnas que se quiere acceder y el número de filas a leer. Éste comando detecta datos numéricos y en cadena.

hgload: Muestra los gráficos almacenados de un archivo. Puede leer archivos jpeg, fig, bit, ai, pbm, etc.

Resumen.

La presente tesis es la continuación de los trabajos de investigación que dieron como resultado un Sistema de Detección y Localización de Descargas Parciales (DP's) por el método radiométrico, que consiste básicamente de 4 antenas tipo disco conectadas a un osciloscopio de alta resolución. Lo que se realizó para complementar ese sistema fue una metodología de obtención de huellas electromagnéticas de equipo e instalaciones de potencia utilizando una comunicación osciloscopio-computadora por medio del protocolo habla-escucha, conectados a través del puerto USB. Para lograrlo, se utilizó un software desarrollado en Matlab que permite la obtención de los datos y señales por canal, el guardado de la información y el envío vía internet a un servidor para su consulta en línea en cualquier computadora con conexión a internet. Una de las aportaciones más importantes, es la obtención de las huellas patrón de Transformadores, Interruptores de Potencia, Cuchillas y subestaciones encapsuladas (GIS), así como la determinación del arreglo óptimo del osciloscopio para su aplicación en trabajos futuros.

Abstract.

This thesis is a continuation of the research that resulted in a Partial Discharge Detection and Location System, which basically consists in 4 disk-cone antennas connected to a high resolution oscilloscope. The present research was carried out to complement the system and develop a methodology to obtain the electromagnetic fingerprint of power equipment and installations using an oscilloscope-computer communication via the talk-listen protocol, connected to a USB port. To achieve this, a communication software was develop in MATLAB that allows the acquisition of data and signals figures per channel, saving and sending information to a server for the consulting online to any computer using internet connection. One of the most important contributions are the acquisition of the fingerprint pattern of Transformers, circuit breakers, blades and insulated substations (GIS), and obtaining the settings of the oscilloscope adjustment for its use in future works.

Presentación.

Esta tesis es la continuación de los trabajos que dieron como resultado un Sistema de Detección y Localización de Descargas Parciales, el cual está conformado básicamente por cuatro antenas dísceno conectadas a un osciloscopio Tektronix TDS 654C de cuatro canales, con un ancho de banda de 500 MHz y 5 Gs/s. Dicho sistema fue desarrollado con el fin de realizar la detección de descargas parciales.

Se sabe que todos los equipos e instalaciones de potencia presentan un cierto grado de descargas parciales. El nivel de descargas parciales está determinado en las normas correspondientes, cuando se sobrepasan estos límites se generan fallas que son perjudiciales y pueden derivar en la destrucción del equipo o instalación. Por tal motivo, el monitoreo constante de las descargas parciales puede ayudar a ver más de cerca el comportamiento de los equipos.

Este trabajo de Tesis propone una metodología de solución y análisis a la detección de descargas parciales en equipos e instalaciones de potencia utilizando el método radiométrico, con el fin de proporcionar una herramienta de monitoreo y diagnóstico de los equipos e instalaciones de potencia de la subestación. Para ello, se realizó un programa en MATLAB ® que permite comunicar un osciloscopio MSO 4104 de 4 canales analógicos, 1 GHz de ancho de banda y un muestreo de 5 Gs/s, con una computadora por medio del protocolo VISA, conectando el osciloscopio a la computadora por medio de un cable USB-USB.

Así mismo, la información recibida es almacenada en un archivo de Excel el cual guarda los datos de la señal captada por canal. Las señales que se detectan en el osciloscopio son guardadas por canal, lo que denominamos huella electromagnética patrón. Toda esta información se guarda en una carpeta, la cual es enviada a un servidor por medio del software DropBox ®. Este software permite tener acceso a la información en cualquier computadora que tenga conexión a internet.

Las principales contribuciones del presente trabajo son la generación de una base de datos que contiene las huellas electromagnéticas de los equipos e instalaciones de potencia, con las cuales se puede llevar un seguimiento de su comportamiento así como una metodología para su obtención. Se determinó el arreglo óptimo del osciloscopio de acuerdo al nivel de tensión bajo el cual se va a trabajar y de acuerdo al equipo a monitorear.

Una ventaja importante de la implementación de este sistema es la adquisición de los datos completos de la señal que capta el osciloscopio y su clasificación por canal sin combinar información. Así mismo, se obtiene la imagen de la señal que se observa en el osciloscopio y se guarda, todo con el fin de facilitar el envío de la información y su análisis.

Otra ventaja de utilizar este sistema es que se pueden colocar las antenas a diferentes distancias de los equipos o instalaciones, con lo cual se obtienen las señales con tiempos de retardo. Este tiempo de retardo es importante en la localización de las DP's ya que, la antena que se encuentre más cerca de la fuente de emisión, captará primero la señal y la enviará al osciloscopio, permitiéndonos realizar la localización de la descarga.

Este trabajo ha sido presentado a la Gerencia de Ingeniería Especializada de la CFE, la cual facilitó realizar los trabajos de prueba en las subestaciones Texcoco, Puebla II y Coyoacán, comprobando su funcionalidad y obteniendo los resultados que se muestran en el capítulo cuatro de esta tesis. Así mismo, el trabajo ha sido aceptado por CFE como un sistema experimental de detección de descargas parciales, como se constata en el acta de reunión No. 01/2011 con fecha 2011/12/08, clave NI8505-A, convocada por ZTM, LAPEM, GRTC, ACC, IEE, RRCE, estipulado en su punto no. 7.

Finalmente se hacen algunas recomendaciones para trabajos futuros, que consideramos sería importante implementar para obtener una metodología más eficiente.

Objetivo.

Diseñar y aplicar una metodología para la obtención de huellas electromagnéticas en equipos e instalaciones de potencia, particularmente los relacionados con la presencia de descargas parciales.

Objetivos particulares.

1. Desarrollar un programa que permita comunicar por medio del protocolo habla-escucha un osciloscopio con una computadora.
2. Enviar los datos y las huellas electromagnéticas captadas en campo por internet a una computadora remota.
3. Iniciar con la formación de una base de datos de huellas electromagnéticas de equipo primario.

Justificación.

La medición y localización de descargas parciales ha sido de gran interés durante la segunda mitad del siglo XX, ya que ha demostrado ser un indicador útil del funcionamiento de los equipos de potencia. En los inicios de la investigación de descargas parciales, solo se realizaba el estudio de presencia de cavidades de gas en papeles aislantes embebidos en aceite, en aislamientos sólidos y en turbinas de generación [1].

Hoy en día, el área de detección de descargas parciales es aceptada como una de las técnicas no destructivas más valiosas para monitorear el correcto funcionamiento de los equipos. Durante años recientes, la correlación entre las descargas parciales y el tipo de falla, ha adquirido una importancia fundamental en la calidad del control de los equipos de potencia [2].

Investigaciones recientes indican que una de las principales causas de presencia de descargas parciales en equipo eléctrico es la presencia de cavidades. Las cavidades pueden ser generadas por pequeñas burbujas de gas (en el caso de aceites), fracturas en el aislamiento, burbujas de aceite o contaminación, que se forman en los aislamientos sólidos como papel dieléctricos, polietilenos, polímeros, EPDM (Etileno Propileno Dieno Monómero), al momento de su manufactura o durante su manipulación, transporte o montaje [3].

Estas cavidades generalmente están llenas de gas con una rigidez dieléctrica mucho menor a la del material en la que se encuentran. Además, la permitividad del gas es invariablemente menor a la del aislante sólido, ocasionando que la intensidad de campo eléctrico en la cavidad sea más grande que en el dieléctrico [4].

Entonces, bajo condiciones normales de operación, la tensión a través de la cavidad excede la tensión de ruptura e inicia la descarga eléctrica en la cavidad [5]. La presencia de cavidades genera el desgaste del material dieléctrico, minando sus capacidades de aislamiento y, con el tiempo, provoca una falla catastrófica como la que se muestra en la figura No. 1.

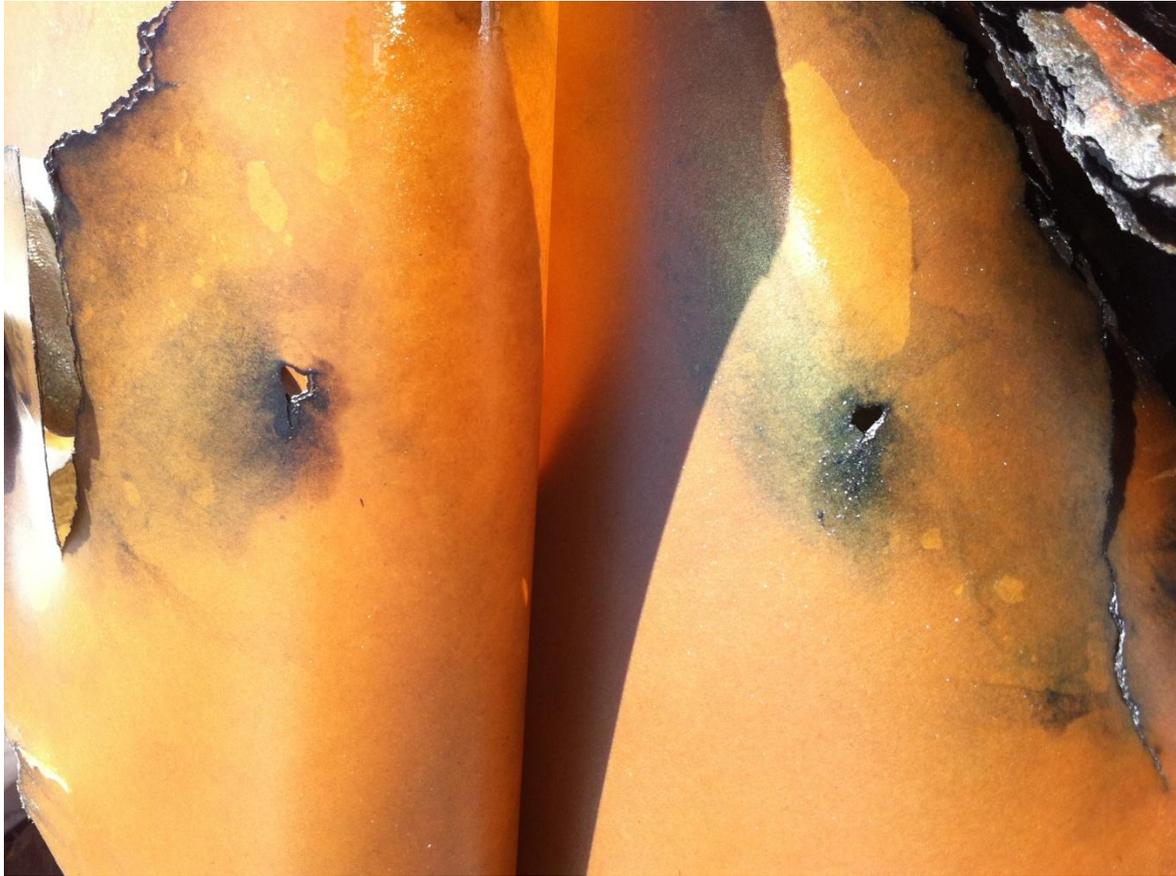


Figura No. 1. Falla en papel aislante para transformador de 400 kV debida a la presencia de una cavidad [6].

De acuerdo con la Comisión Federal de Electricidad, la estadística de fallas de los equipos de potencia es la siguiente [7]:

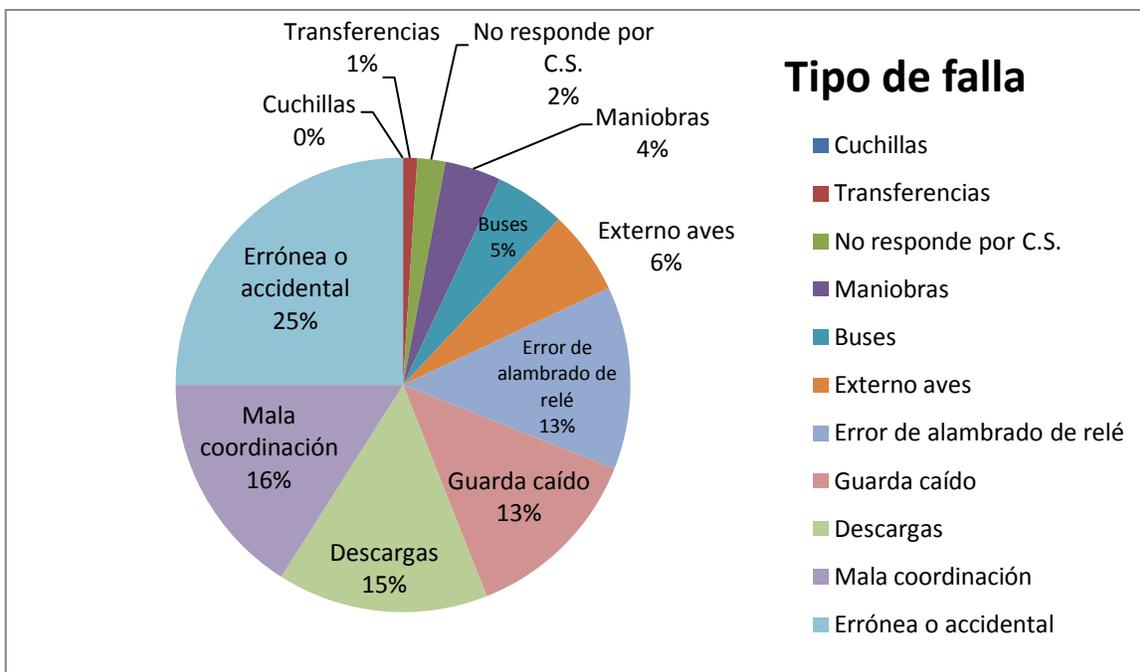


Figura No. 2. Afectaciones al TIU por diversas fallas en transmisión en el 2011 [7].

En su reporte anual de estadísticas, CFE reporta el tiempo de interrupción por usuario (TIU) debido a fallas en el sistema, mostrando el histórico desde el 2003 hasta 2011. Dichos indicadores operativos se muestran en la siguiente tabla [7].

Tabla No. 1. Indicadores operativos de Calidad del Servicio de Energía eléctrica sin considerar la Zona Centro [7].

Indicador	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Calidad en el servicio										
Plazo de conexión a nuevos usuarios (días)	1.18	1.12	1.1	1.05	1.33	1.02	0.96	1.76	0.97	0.84
Cumplimiento de los compromisos de servicio (%)	95.39	95.93	96.11	95.59	92.01	94.35	94.89	96.18	97.18	96.26
Inconformidades por mil usuarios-mes	4.23	4.09	3.75	3.93	4.98	5.44	5.15	4.54	4.4	4.46
Calidad del suministro de energía eléctrica										
Tiempo de interrupción por usuario (min.) sin afectación	124	121	89	77	79	84	79	71	60	43.10

A continuación se muestra el porcentaje de falla de los interruptores de potencia.

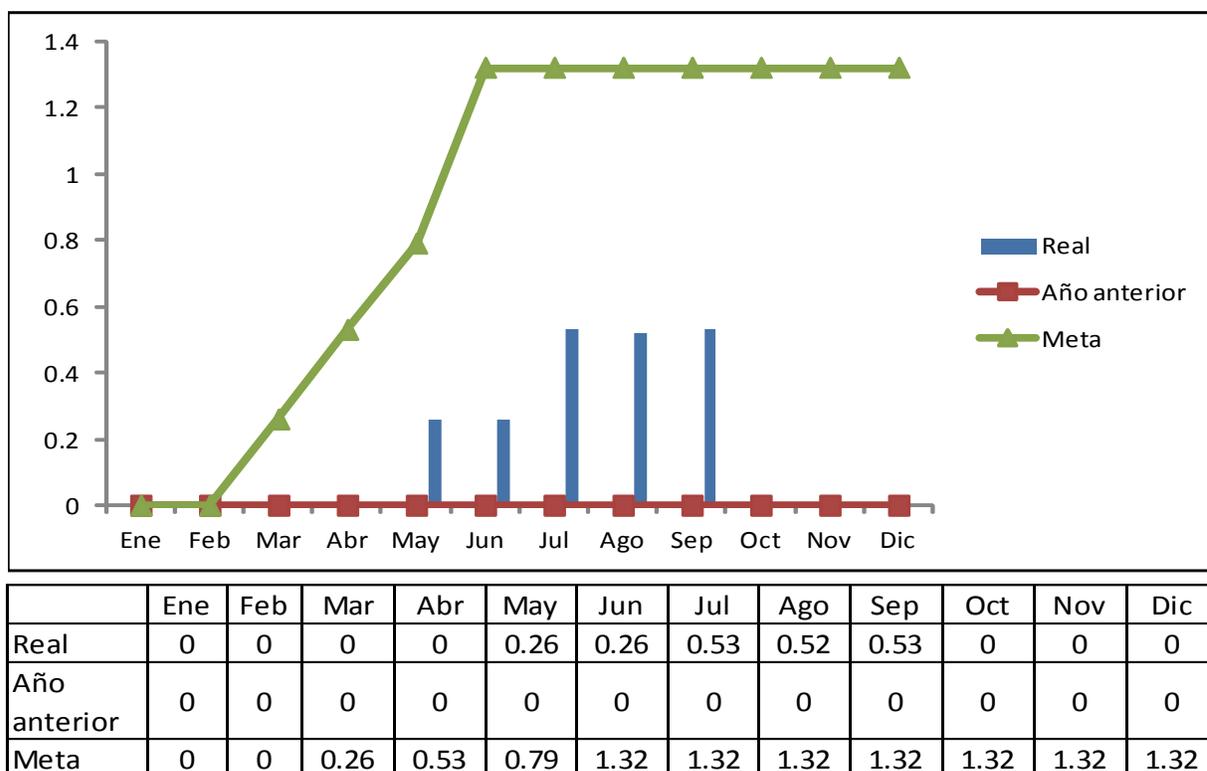


Figura No. 3. Porcentaje de falla en Interruptores de Potencia [7].

Del total de las fallas en los interruptores, solo el 15% corresponden a fallas del tipo eléctrico, en las cuales se enfoca la presente tesis. Las demás fallas fueron del carácter mecánico como mal funcionamiento de los sistemas de apertura y cierre del equipo o un mal acoplamiento de los contacto.

Actualmente no se cuenta con un histórico de fallas provocadas por descargas parciales en los equipos e instalaciones de potencia, pero si se realizara un monitoreo constante a los equipo sería posible llevar un seguimiento de su comportamiento, facilitando la toma de decisiones en el momento en el que se detecte un comportamiento fuera de lo normal.

Con la metodología para la obtención de Huellas patrón de los equipos de potencia se pretende llevar un monitoreo constante de los equipos instalados en las subestaciones, teniendo registrado su funcionamiento a condiciones nominales. Así mismo, se puede enviar la información a los distintos centros de operación de plantas y sistemas eléctricos de CFE para su monitoreo en línea.

Así, se pretende tener un mayor tiempo de respuesta ante alguna eventualidad en el sistema, dando como resultado una mayor productividad en las instalaciones eléctricas y ahorro económico, ya que en lugar de reemplazar el equipo fallado, implicando con esto tiempos largos de interrupción por usuario, se realizaría el reemplazo preventivo del equipo primario que presente descargas parciales.

En el Capítulo 1, se tratarán aspectos de la física de las Descargas Parciales, sus repercusiones en los aislamientos y sus causas en los sistemas de potencia. El capítulo 2 trata sobre los principales aspectos del método radiométrico de detección de descargas parciales. En el capítulo 3 se describirá el diseño y desarrollo de la metodología para la obtención de las huellas patrón, así mismo, se describirá su funcionamiento.

En el capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología en tres subestaciones eléctricas: SE Texcoco, SE Puebla II y SE Coyoacán. Por último en el capítulo 5 se muestran los resultados de la localización de descargas parciales, así como el análisis realizado en campo de las señales obtenidas.

CAPÍTULO 1:

Estado del Arte: Descargas Parciales

1.1 Introducción a las Descargas Parciales.

Estimar el grado de confiabilidad de los equipos de potencia forma parte importante en la valoración de los activos de la empresa suministradora de energía Eléctrica [10]. La elección correcta de un plan de detección y diagnóstico constituye una herramienta muy útil para mantener en óptimas condiciones de funcionamiento las centrales y subestaciones eléctricas.

Una descarga parcial es un fenómeno de ruptura eléctrica que está confinado y localizado en la región de un medio aislante, entre dos conductores que se encuentran a diferente potencial. Los medios aislantes pueden ser sólidos, líquidos, gaseosos o una combinación entre éstos.

El término de “Descarga Parcial” incluye a un extenso grupo de fenómenos de descarga: descargas internas que pueden ocurrir en vacíos o cavidades en aislamientos sólidos o líquidos; aparición de descargas superficiales en los límites de diferentes materiales aislantes; descargas corona que son relacionadas a descargas en aislamientos gaseosos, si está presente un campo no homogéneo muy fuerte; el impacto continuo de descargas en aislamientos sólidos en la forma de canales o arborescencias (treeing) [13] .

De acuerdo a la Norma IEC 60270, una Descarga Parcial es el proceso de descarga que no puentea la distancia entre dos electrodos [15], esta descarga eléctrica puede ser una chispa, una corona o un arco y puede ser originada directamente en uno de los electrodos o puede ocurrir sin la presencia de electrodos, en una cavidad del aislamiento. Tres notas acompañan esta definición:

Nota 1. Generalmente, las Descargas Parciales son ocasionadas debido a la concentración de campo eléctrico local en el aislamiento o en la superficie del aislamiento. Generalmente, dichas descargas aparecen como pulsos teniendo una duración menor a $1\mu s$.

Nota 2. Las descargas Corona son una forma de Descarga Parcial que se presentan en medios gaseosos alrededor de los conductores que se encuentran alejados de los aislamientos sólidos o líquidos. El término Corona no debe ser utilizado para definir todas las formas de descargas parciales.

Nota 3. Las Descargas Parciales están generalmente acompañadas por emisiones de sonido, luz, calor y reacciones químicas.

Desde la segunda mitad del siglo XX ha habido un creciente interés en la medición de descargas parciales, ya que ha demostrado ser un buen indicador del estado de degradación de los aislantes eléctricos. De hecho, hay muchos laboratorios en donde se monitorea la actividad de descargas parciales, para contrastar con los datos existentes en las bibliografías sobre la degradación de los aislantes y estudiar la probabilidad de fallo del objeto bajo ensayo [11].

Hoy en día, se asume en todos los niveles de investigación eléctrica, que un conocimiento adecuado del comportamiento de las descargas parciales en un aislante es muy ventajoso a la hora de determinar su vida útil. Por ello, se han desarrollado e implementado rápidamente nuevas tecnologías para la detección de descargas parciales con técnicas digitales [3].

En la actualidad, los sistemas eléctricos de potencia están conformados por varios componentes que realizan diferentes tareas para llevar la energía eléctrica desde las plantas generadoras hasta los consumidores, una de las tareas más importantes es la del aislamiento tanto en Baja Tensión como en Alta Tensión. Dichos aislamientos pueden ser fabricados de material sólido, líquido, gaseoso, vacío o compuestos, dependiendo de la aplicación y el nivel de Tensión [3].

Cuando el material aislante es sometido a una diferencia de potencial y debido a la presencia de un campo eléctrico el cual tiende a concentrarse en la cavidad, se produce la ionización del gas presente en éstas, dando origen a una descarga eléctrica.

1.2 Descargas Parciales en aislamientos.

Descargas en aislamientos gaseosos

Una descarga parcial es un fenómeno de ruptura eléctrica que está confinado y localizado en la región de un medio aislante, entre dos conductores que se encuentran a diferente potencial eléctrico. La presencia de la descarga puede ser la consecuencia de un aumento del campo eléctrico en un determinado espacio, relativamente pequeño, comparado con las dimensiones del medio aislante.

El aumento del campo puede ser debido a cambios bruscos en la naturaleza del aislante, que pueden ser provocados por vacíos o huecos en un medio sólido o por espacios de gas entre las superficies de un aislante con un conductor o con otro aislante [11].

El proceso de descargas parciales es característicamente pulsante y se manifiesta como unos pulsos de corriente en un circuito externo; este proceso está catalogado como estocástico porque sus propiedades son descritas en función de variables aleatorias dependientes del tiempo [12].

La ionización es un proceso físico, el cual se inicia cuando un electrón libre o un ion negativo llega a un espacio lleno de algún material ionizable, por ejemplo gas donde exista un campo eléctrico. Si un electrón tiene la suficiente libertad para moverse en el gas, éste adquirirá una gran energía dinámica tal que en la colisión del electrón y una molécula neutra se liberará un electrón de ésta por el impacto.

Así cada vez que esto suceda se liberará un nuevo electrón capaz de producir el mismo efecto, logrando de esta forma que el número de electrones libres aumente, produciendo así el efecto avalancha, tal y como se observa en la Figura No. 4.

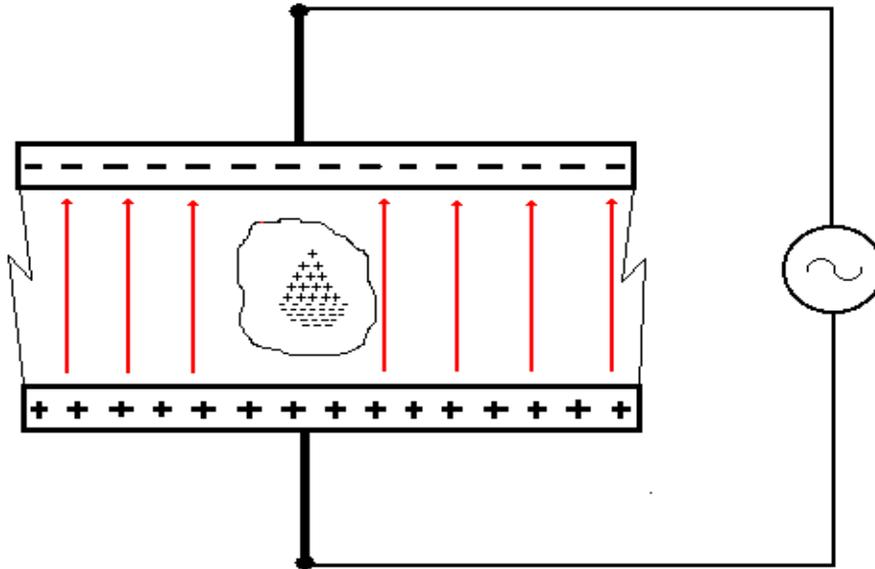


Figura No. 4 Esquema de una avalancha inicial en aire [11].

En campos uniformes y en campos casi uniformes, el inicio de ionización medible usualmente lleva a la descarga en el espacio. En campos no uniformes varias manifestaciones de descargas luminosas y audibles se observan mucho antes de que la ruptura completa ocurra. Estas descargas pueden ser transitorias o estacionarias y son conocidas como descargas corona.

Se completa la distancia interelectródica debido a la degradación evolutiva del aislamiento como la presencia de pequeñas burbujas, grietas, contaminación o presencia de partículas conductoras. El gradiente de Tensión tiene la fuerza suficiente para atravesar la degradación en el aislamiento producido por las descargas parciales. Cuanto mayor sea la Tensión de operación, más fuerte y continua será la Descarga Parcial [13].

Otra condición necesaria para la formación de descargas parciales es que la porción de volumen que contiene al gas (aire), tenga un coeficiente de ionización (Primer coeficiente de ionización de Townsend α) igual o mayor al coeficiente de fijación de electrones (segundo Coeficiente de Townsend η).

Esto asegura que la tasa de ionización por colisión de electrones es mayor que la tasa de fijación de electrones a la molécula, lo cual es requerido para el crecimiento de la descarga. Si esta condición es satisfecha, una descarga parcial puede ocurrir cuando un electrón es inyectado en este volumen.

Este electrón inicial podría, por ejemplo, ser el resultado de una emisión del campo si este es suficientemente grande en la superficie, o en el caso de aislamientos externos, la incidencia de un fotón, como se observa en la siguiente figura.

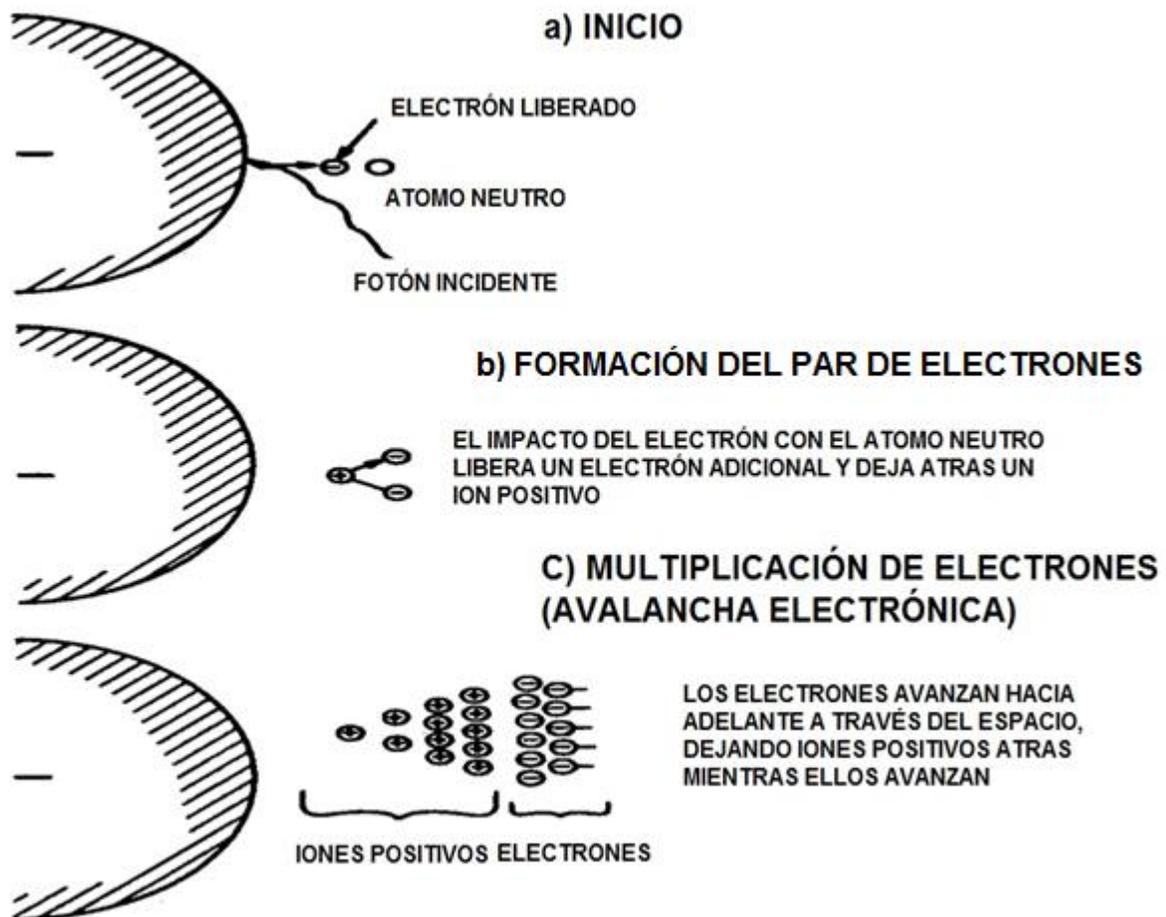


Figura No. 5. Modelo de una Avalancha Electrónica provocada por la incidencia de un fotón en medios gaseosos [14].

En ausencia de campo eléctrico la tasa de electrones y de iones positivos de generación en un gas ordinario es contrario por el decaimiento del proceso y del estado de equilibrio existente. Este estado en equilibrio se ve perturbado por la aplicación de un campo muy elevado. La variación de la medición de corriente en el gas entre dos electrodos en paralelo, se estudia en función a la primera aplicación de tensión de Townsend [13].

Townsend describe que el incremento en la corriente más allá de la tensión aplicada provoca la ionización del gas debido a la colisión de electrones. Si el campo incrementa, los electrones dejan el cátodo y son acelerados más y más debido a las colisiones entre ellos con mayor energía lo que origina la ionización al colisionar con las moléculas o átomos del gas [16]. Para explicar este incremento de corriente, Townsend introduce un *coeficiente de primera ionización*, el cual se define como el número de electrones producidos por un electrón por unidad de longitud de ruta en la dirección del campo..

La descripción del proceso de ionización muestra que hay transferencia de carga en la región donde se produce la ionización. Esto significa que hay circulación de corriente en esta región y cierta potencia disipada. Como la corriente circula en un espacio restringido, la densidad de corriente local es extremadamente alta, lo que produce en la región un intenso calor [9].

Esto provoca un fuerte incremento de presión en la cavidad, este efecto puede ser comparado con el de una explosión en miniatura. Así el material que rodea esta zona es comprimido, generándose una onda de pulsos sónica y ultrasónica que se propaga a través del medio [11].

Descargas en aislamientos sólidos.

Los aislamientos sólidos forman una parte integral de las estructuras de alta tensión. El material sólido proporciona soporte mecánico para las partes conductoras de un sistema eléctrico, al tiempo que aísla a los conductores. Frecuentemente las estructuras de aislamiento consisten en combinaciones de aislamientos sólidos con líquido o con gas.

El transporte de electricidad en gases está limitado a portadores de carga positivos o negativos, y la degradación de las propiedades de aislamiento implica un rápido crecimiento de la corriente por medio de la formación de avalanchas electrónicas, como se explicó en la Figura No.5.

Este no es el caso para aislamientos sólidos. A pesar de las numerosas investigaciones de descargas en sólidos, y un sin número de teorías que se han establecido con el fin de explicar cuantitativamente el proceso de descargas en sólidos, el estado de conocimiento en esta área es todavía inconcluso [5].

Como la tensión eléctrica en sólidos se incrementa hasta alcanzar la tensión de ruptura, la corriente tiende a incrementarse exponencialmente, pero no varía tan notoriamente con el tiempo para la tensión constante. Se cree que el incremento de la corriente en altas tensiones se debe a la inyección de portadores provenientes del electrodo, o de la multiplicación electrónica en el volumen del material, o ambos.

En suma, si existen impurezas o defectos estructurales en el sólido, pueden causar niveles de energía locales permitidos (trampas) en la banda prohibida, y los electrones pueden pasar a través del aislamiento saltando de una trampa a otra [5].

La medición de la tensión de ruptura está influenciada por numerosos factores externos como la temperatura, humedad, clima, descargas en el medio ambiente, si es corriente alterna o corriente directa, descargas en cavidades. Ahora bien, cuando se presenta una descarga en cavidad, la superficie del aislamiento se convierte en un ánodo y un cátodo.

Al existir descargas parciales en el interior de los aislamientos se generan erosiones en el material. Ésta erosión se presenta cuando el material aislante presenta pequeños defectos de fabricación (cavidades) en su interior, dichas cavidades generalmente están llenas de gas. Al aplicarse un campo eléctrico y, debido a la diferencia de permitividades dieléctricas, se va generando en las superficie interna de la cavidad una erosión, la cual va aumentando su tamaño conforme va pasando el tiempo.

Algunos electrones golpean el cátodo con suficiente energía para cambiar los enlaces químicos de la superficie del aislamiento, causando daño a la estructura del sólido y aumentando su inestabilidad térmica local. Estos efectos de degradación forman pequeños canales o pistas en el aislamiento que pueden erosionar poco a poco el material aislante hasta degradarlo y provocar una falla [4].

En sistemas de aislamiento, el material sólido es sometido a un campo eléctrico en conjunción con otros materiales. Si uno de los materiales es, por ejemplo, un gas o un líquido, entonces la tensión de ruptura se ve influenciada más por el medio con permitividad dieléctrica más débil que la del sólido. En la siguiente figura se muestra una sección transversal que representa la prueba de un sistema dieléctrico conformado por un plano y una esfera.

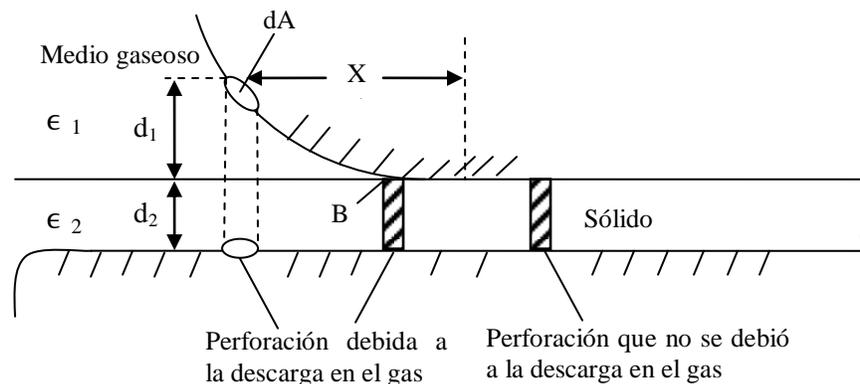


Figura No. 6. Efecto de la descarga en el borde entre un sólido y un gas [5].

Para este caso, la tensión eléctrica en la parte gaseosa incrementa conforme X disminuye, y alcanza valores altos de tensión así como d_1 disminuye (punto B). En consecuencia, existe ruptura en el gas a una tensión aplicada relativamente baja. La carga en la punta de la descarga puede distorsionar el campo local aplicado y transformarlo en un arreglo de campo no uniforme. Se ha estimado que la concentración de carga en la punta del canal de descarga suficiente para generar un campo local del orden de 10 MV/cm [5].

Descargas en aislamientos líquidos

Al igual que en los sólidos, se ha avanzado muy poco en el estudio de descargas en medio líquidos. Su complejidad radica principalmente a que el líquido se encuentra en movimiento. Lo que se sabe es que la tensión de ruptura del líquido depende de la longitud y el espesor del recipiente que lo contiene.

Por estar en constante movimiento, al pasar por un tubo o por la pared del recipiente que lo contiene, el aceite se va electrizando por la fricción, la cual también depende de la velocidad con la cual se propaga en el recipiente. La presencia de impurezas como burbujas de gas, materiales sólidos, humedad, influye en el comportamiento aislante del líquido ya que puede generar descargas debido a la presencia del campo [5].

Estudios de conductividad para aislamientos líquidos en campos de alta energía muestran que la corriente depende de la temperatura. Una vez que se inyecta el electrón dentro del líquido, este gana energía debido al campo aplicado.

En la teoría de ruptura electrónica se asume que algunos electrones ganan más energía del campo que la que pierden al colisionar con las moléculas del líquido. Estos electrones son acelerados hasta que ganan suficiente energía para ionizar las moléculas e iniciar la avalancha electrónica

Ahora bien, la fragilidad de los aislamientos líquidos radica en que, con la presencia de una pequeña cantidad de contaminación, su rigidez dieléctrica cambia drásticamente [4]. En los sistemas de alta tensión donde se utilizan líquidos (principalmente aceite), para el enfriamiento de los equipos, se utilizan filtros para remover partículas e impurezas [17].

Al existir partículas en el líquido aislante, éstas se comportan como pistas conductoras que van generando un puente a lo largo del espacio y, en presencia del campo eléctrico, produce campos entre las partículas el cual, al ser mayor, puede producir una descarga [4].

Así mismo, los aislamientos líquidos pueden contener inclusiones gaseosas en forma de burbujas. El proceso por el cual se generan las burbujas en el líquido incluye [4]:

- i. Paquetes de gas en la superficie.
- ii. Cambios en la temperatura y presión.
- iii. Disociación de productos por la colisión electrónica generando productos gaseosos.
- iv. Vaporización del líquido debido a descargas tipo corona producidos en los puntos irregulares de los electrodos.

La fuerza electrostática alarga la burbuja tan pronto como es formada y, debido a que la tensión de ruptura es más baja que la del aceite, se da una descarga en el interior de la burbuja la cual degrada las características químicas del aceite, produciendo más burbujas, hasta que eventualmente se puentea el espacio y se produce la falla [4].

1.3 Causas de Descargas parciales en los sistemas de potencia

La degradación de un aislante en los equipos eléctricos por las descargas parciales es el resultado de un conjunto complejo de fenómenos:

- a) Elevación de la temperatura del gas encerrado proveniente de los choques elásticos (en el cual se conserva la cantidad de movimiento) entre electrones y moléculas gaseosas.
- b) Bombardeo iónico y electrónico en las paredes de la cavidad provocando su erosión.

- c) Acción de rayos ultravioleta producidos por átomos excitados y por la recombinación de portadores.
- d) Descarga química progresiva del material con producción de gases, particularmente hidrógeno.

La importancia de estos diversos fenómenos, varía ciertamente con el material aislante considerado y las condiciones en las cuales es utilizado, pero las experiencias han demostrado que en un ambiente gaseoso químicamente inerte, la degradación de un aislante obedece a un mismo tipo de evolución que comprende tres fases sucesivas:

- a) Inicialmente el proceso de ataque se limita a una erosión lenta, las cavidades se agrandan y pueden entrar en contacto con otra, debilitando localmente el muro del aislante.
- b) La segunda etapa puede aparecer en los puntos débiles de la cavidad a partir de los cuales las descargas se propagan al interior del aislamiento sano formando caminos conductores (treeing).
- c) Por último, cuando el campo eléctrico en la extremidad de una de las ramificaciones alcanza al gradiente disruptivo intrínseco del aislante se observa un desgaste rápido del material en esa dirección, y cuando esta progresión de daño se produce también hacia al electrodo opuesto, la perforación completa del aislante produce una descarga total de una pieza conductora a otra [11].

Aún cuando la energía de cada descarga parcial es bastante pequeña, una parte importante de los electrones movilizados en la Descarga Parcial pueden tener energías superiores a 10eV. Estos electrones de significativamente alta energía pueden romper enlaces moleculares en un impacto, lo que provoca cambios químicos en el aislante (su degradación), que influyen en el comportamiento posterior de las descargas parciales.

El daño causado a los equipos debido a la presencia de Descargas Parciales deriva en la destrucción de los equipos circundantes y las instalaciones, así como en la pérdida de ingresos debido al corte no programado de energía.

Los primeros estudios revelaron que la forma de onda de una descarga parcial, tiene un frente electrónico de muy altas frecuencias, por lo que los circuitos de detección se basaron en arreglos coaxiales con impedancias lineales de hasta 1GHZ [11].

Las formas de onda de la corriente inducida por una descarga parcial pueden clasificarse en dos tipos, descargas rápidas y lentas. Las descargas rápidas son asociadas a condiciones de sobre tensión, las cuales tienen un frente del orden de 2ns, pero pueden alcanzar tiempos menores de 700ps.

En estos tiempos de muestreo, la corriente puede alcanzar niveles de amperes, por lo que se genera una onda electromagnética que se difunde en el espacio circundante de la zona de descarga. En la siguiente figura se muestra una señal característica de este tipo de descargas parciales en los sistemas de potencia

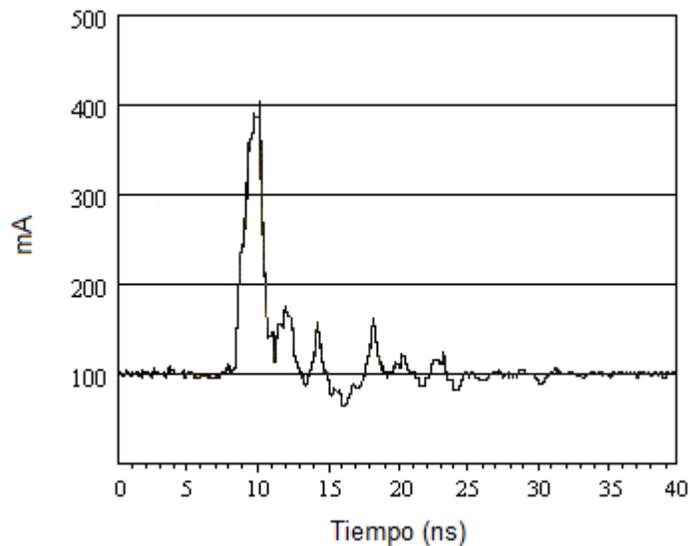


Figura No. 7. Forma de onda de la corriente inducida por una descarga parcial rápida asociada a una sobre tensión [11].

El origen de esta forma de onda de la descarga se encuentra asociado con condiciones de sobre tensión dentro de la cavidad donde se presenta la descarga. Estas condiciones de sobre tensión se originan cuando el voltaje presente en la cavidad para provocar la descarga excede los valores de ruptura del gas sin que exista un electrón libre para iniciar la avalancha de acuerdo al proceso descrito anteriormente.

La forma de onda de una descarga rápida contiene información sobre el tiempo entre el momento en que se alcanzó el gradiente de ruptura en el gas dentro de la cavidad y el momento en que apareció el primer electrón libre.

Esta información es relevante para definir la energía con que se bombardea la superficie y es sin lugar a dudas, el tipo de descarga que mayor daño puede ocasionar en el aislamiento. Sirve también para la localización de esta descarga, pues la gran cantidad de energía liberada en corto tiempo es mucho mayor que la que se encuentra en el medio ambiente como interferencias y que es causada por las transmisiones de radio y telefonía inalámbrica.

Las formas de onda inducidas por las descargas parciales en muestras que presentan degradación severa, se observan formas de onda del tipo lento, cuya duración se prolonga dos órdenes de magnitud más que en las ondas rápidas [11].

Esta descarga lenta está relacionada con la formación de avalanchas sucesivas, generadas por una abundante cantidad de electrones libres provenientes de carga atrapada en la superficie degradada del aislamiento. Bajo estas condiciones, no se alcanzan niveles significativos de sobre tensión entre cada descarga y la duración de la descarga se extiende mientras la conducción de la superficie degradada permita la difusión de cada descarga anterior.

La importancia de la detección de las Descargas Parciales radica en que, si la falla no es detectada o corregida, dicha falla puede generar que los equipos de potencia operen fuera de sus parámetros nominales de operación y eventualmente, una falla catastrófica puede tener lugar.

En los sistemas de potencia modernos, la detección y medición de las Descargas parciales se toman como referencia para saber la salud y el estado de los equipos en las subestaciones en servicio y ayuda a la planeación del mantenimiento [18].

Dependiendo de la aplicación, el aislamiento en los equipos de potencia pueden ser expuestos a condiciones o fenómenos meteorológicos, los rayos del sol y la luz ultra violeta, lluvia, contaminación, golpes por partículas volátiles transportadas por el aire, descargas atmosféricas, etc. O se pueden realizar aislamientos internos los cuales solo serán afectados por defectos de fábrica, mala manipulación al ser instalados en los equipos, o exceder sus niveles nominales de protección [13].

En ambos casos, el aislamiento está expuesto a variaciones de Tensión y a estrés mecánico. Es muy común encontrar estas combinaciones de aislamientos en los equipos de potencia como Transformadores e Interruptores, que en definitiva, son los equipos que deben ser monitoreados con mayor frecuencia [20].

Los aislamientos interno o externo son afectados de diferentes maneras, pero el más afectado es el aislamiento externo, ya que está expuesto a la intemperie, pero puede diagnosticarse e incluso remplazarse fácilmente [20].

La dificultad de encontrar fallas se presenta en los aislamientos internos, ya que es difícil poder observarlos directamente, incluso monitorear su comportamiento o si presentan fallas que ponen en peligro al equipo, la instalación y al personal de operación [21]. Varios factores afectan el aislamiento tanto interno como externo, entre los que podemos mencionar [13]:

1. Contaminación. Los aislamientos externos se localizan generalmente en subestaciones al aire libre. En las zonas industriales o de mucho desarrollo urbano, la contaminación llega a niveles muy grandes y se acumula en las superficies de los aislamientos, incluyendo partículas metálicas y de carbón. Esta pequeña capa de contaminación afecta el nivel de aislamiento y propicia una superficie conductiva apta para que se desarrolle una descarga.

2. Lluvia ácida. En las zonas industrializadas con altos niveles de contaminación causada por el CO₂, genera lluvia ácida al combinarse con el agua de lluvia, la cual corroe la superficie de los aislamientos generando descargas superficiales.
3. Envejecimiento. La tasa de envejecimiento del material aislante depende de la calidad y de su proceso de manufactura. El envejecimiento se le atribuye principalmente a los aislamientos poliméricos ya que sus propiedades tienden a modificarse por el uso. Estas modificaciones a sus características se deben, entre otras causas, a la continua exposición a los rayos UV y a la Tensión eléctrica. Al presentar cavidades por mala manufactura, se pueden ir erosionando por la presencia de Descargas Parciales causando gran daño al aislamiento.
4. Tensión mecánica y tensión eléctrica. Sobretensiones y transitorios eléctricos, combinados con los efectos mecánicos, pueden modificar las propiedades del aislante y pueden generarle daño o destruirlo.
5. Defectos de construcción. En los procesos de manufactura de aisladores poliméricos o equipos de potencia, pueden presentarse pequeñas protuberancias o cavidades en los límites entre aislamientos de diferente constante dieléctrica. Cuando se aplica un campo eléctrico a éstos aislamientos defectuosos, se generan pequeñas descargas que, a la larga, pueden generar falla o la destrucción del equipo.

Como se puede observar, hay gran variedad de material aislante, por lo que detectar, identificar y clasificar las fallas o problemas técnicos que se presentan al estar en funcionamiento en el sistema eléctrico es muy complicado. Sin embargo, los avances técnicos en la prevención y detección de fallas, principalmente de Descargas Parciales presentes en cavidades del aislamiento, pueden ayudar en la prevención de accidentes y, por lo tanto, evitar la destrucción total del equipo.

En los equipos de potencia, las descargas parciales generalmente van acompañadas por descomposición química del material aislante, y en ocasiones causan erosión del aislamiento sólido adyacente. Una descarga parcial en aceite, por ejemplo, produce por lo general un colapso químico, con formación de carbón y gas, al tiempo que se producen ceras que afectan la capacidad dieléctrica del medio.

A menos que el gas producido pueda salir del tanque que contiene el aceite, puede generar descargas más severas que pueden conducir a la falla completa de la estructura del aislamiento [22].

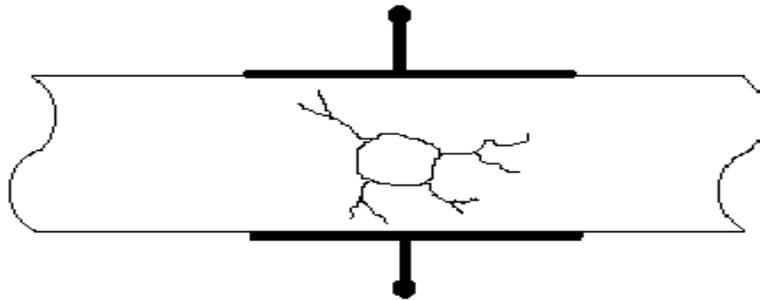


Figura No. 8. Representación de formación de arborescencias (Treeing) debido a una cavidad [22].

Cuando un material sólido presenta algunas impurezas, como cavidades de gas, su resistencia dieléctrica puede ser más o menos igual a la resistencia de su impureza más débil. Para explicar lo anterior, supongamos que una cavidad gaseosa queda atrapada en el aislante sólido durante su manufactura; el gas tiene una permitividad relativa igual a uno, el cual es diferente a la permitividad del material sólido ϵ_r .

El campo eléctrico en el gas puede ser 3 veces el campo en el material sólido, dando como resultado la descarga en el gas a una tensión relativamente baja. La concentración de carga en la cavidad puede generar un campo eléctrico no uniforme; se ha encontrado que dichas cavidades pueden generar campos del orden de los 10 MV/cm el cual es mayor a la descarga intrínseca.

Estas concentraciones de carga van generando poco a poco descargas parciales llevando al aislamiento a la ruptura y, por ende, a su destrucción. Desde el inicio de las descargas parciales, la descarga va tomando forma de arborescencia (Treeing) como se muestra en la figura No. 8. Este fenómeno puede ser observado en los materiales donde prevaleció un campo no uniforme debido a cavidades.

La presencia de burbujas de gas, cavidades y demás defectos de los aislamientos antes mencionados, son las principales causas de presencia de descargas parciales y de la destrucción parcial o total de los equipos. A mayor presión, mayor tensión eléctrica lo que sugiere que el gas de la cavidad cambia a una fase de procesos de descarga. De hecho, mientras más pequeña sea la cavidad, más probabilidades tiene de presentar descargas; de ahí la importancia de ser capaces de detectarlas a tiempo [24].

1.4 Métodos de detección de Descargas Parciales.

Los métodos de detección de descargas parciales no invasivos y con monitoreo en línea, han demostrado ser de gran importancia para el estudio del comportamiento de los equipos de potencia en operación, ya que permiten llevar un seguimiento de los mismos sin la necesidad de estar en la subestación.

Método de laboratorio.

Cuando en una cavidad del dieléctrico se produce una descarga parcial, una cierta parte de la energía que había en la cavidad se disipa en forma de carga eléctrica “ q ”; a estos efectos la cavidad se comporta como un capacitor. Como no es posible medir la cantidad de carga q , se ha definido un valor que puede medirse, el cual es una imagen suficientemente buena de la energía disipada por la descarga parcial en el dieléctrico [26].

La norma IEC 60270 la define como “*carga aparente q*”, la cual es definida como la carga que, si se inyectara instantáneamente a los bornes del objeto a ensayar, cambiaría momentáneamente la tensión entre dichos bornes, en la misma medida que cuando se produce una descarga parcial. El valor absoluto “*q*” de la carga aparente se llama habitualmente amplitud de la descarga y es expresada en picocoulomb (pC) [14].

Definir de esta manera a la carga aparente no significa que sea igual al valor de la carga que se transfiere a través de la cavidad en el interior del dieléctrico en la cual se produjo una descarga parcial, pero si nos da un valor observable del comportamiento de la descarga en los bornes del objeto a analizar, el cual es función del valor de la carga efectiva de la descarga parcial.

Para éste método de detección, se utilizan equipos de medición los cuales, al tener fuera de servicio al equipo a medir, se le inyecta cierta corriente para detectar si tienen descargas en su interior. Dichos equipos, como los desarrollados por OMICROM [29] o por INDUCOR [30], se componen, como se observa en la figura No. 9, básicamente por:

- a) Fuente o generador de Corriente Alterna a aplicar al objeto bajo prueba. Generalmente es un transformador de salida de Alta Tensión.
- b) El objeto bajo prueba que, como se mencionó anteriormente, se comporta como un capacitor.
- c) Capacitor de Alta Tensión exento de descargas parciales (C_k) el cual es mayor que el objeto bajo prueba y se conecta en paralelo con él. También es llamado capacitor de unión o de acoplamiento.
- d) Impedancia de Medida Z_m la cual se conecta en serie con el capacitor de unión o bien en serie con el objeto bajo prueba.

- e) Instrumentos de medición (M), conectados a los bornes de la impedancia de medición que se comporta por lo tanto como una carga resistiva. Lo que miden estos equipos son las corrientes generadas por las descargas parciales.

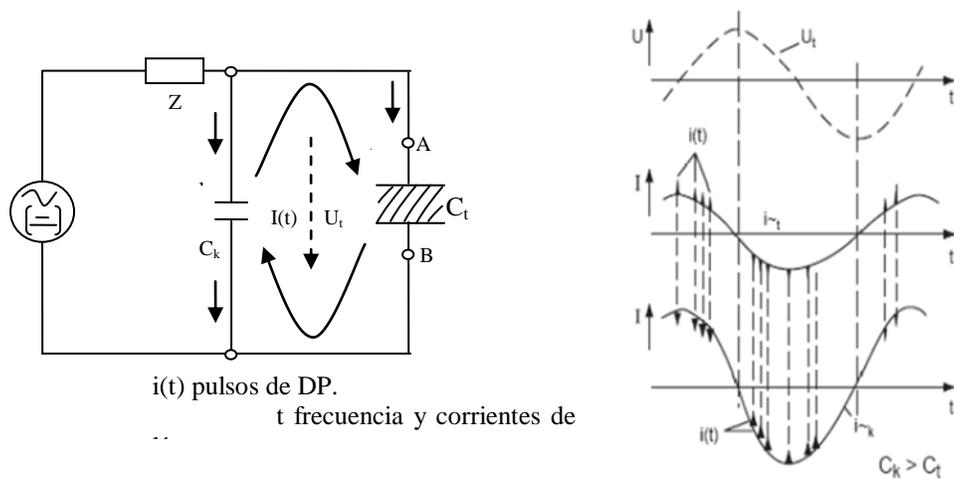


Figura No. 9. Ejemplo de un circuito de prueba de detección de descargas parciales y gráfica de corrientes de desplazamiento y de Descarga Parcial [14].

Los circuitos de medida se dividen en dos grupos, según sea la banda pasante de frecuencias de medida: banda ancha y banda estrecha. La banda pasante del circuito de medida viene fijada por el elemento medidor, como el equipo de prueba de detección de descargas parciales en subestaciones del tipo GIS LDS-6/UHF de Doble Lemke [31]. Para realizar la detección de descargas parciales por este método se deben tener las siguientes consideraciones [32]:

- La carga aparente, en un sistema aislante, depende de varios parámetros que no están relacionados con el tipo de descarga (forma y espesor del aislante, material empleado, etc.).
- La carga aparente, como consecuencia de un reagrupamiento de cargas en los electrodos, depende de la posición del defecto dentro del aislante y del campo eléctrico local.

- c) Solo en equipos compactos se puede asegurar una medida correcta, ya que en equipos grandes o diseñados con parámetros distribuidos como cables de transmisión, motores, etc., los defectos de propagación de ondas entre la fuente de descarga parcial y el equipo de detección deben ser tenidos en cuenta, ya que éste aspecto tiende a distorsionar los resultados de las medidas de descargas parciales. La carga aparente ya no es específica de un defecto del aislante, sino también del canal de transmisión entre la fuente y el equipo de detección. Por lo tanto, es importante realizar unas mediciones de ruido para evaluar la distorsión creada por el circuito de detección, la línea de transmisión y el equipo de medición.
- d) Las señales de descarga parcial son normalmente muy débiles y están superpuestas con el ruido, interferencias o distorsiones del medio y del equipo de medición.
- e) El equipo de medida puede distorsionar las características de la descarga por sí mismo; por ejemplo, si se producen dos pulsos consecutivos en un tiempo inferior al tiempo de resolución del equipo, la magnitud de la carga aparente medida es errónea, ya que ambos pulsos se superponen en uno solo (error de superposición). En este sentido el equipo de detección también considera que el pulso tiene una duración mínima igual al tiempo de resolución.

De acuerdo a la Norma NMX-J-169, La medición de descargas parciales debe ser llevada a cabo por el método de carga aparente de banda ancha con un ancho de banda de 200 kHz mínimo [33].

Las características de instrumentación, equipo y procedimiento de calibración de la misma, así como las conexiones y procedimientos de medición deben ser adecuadas para satisfacer lo descrito en el párrafo anterior.

Los problemas antes mencionados son muy relevantes a la hora de querer detectar descargas parciales en los equipos de potencia o en una subestación. Como puede observarse, es necesario tener filtros, decodificadores y, la condición principal, que el equipo bajo prueba se encuentre desconectado o fuera de línea [32].

También se debe considerar que, de acuerdo a las normas correspondientes a ciertos elementos y aparatos eléctricos de medición y alta tensión como cables, transformadores de potencia, equipos de maniobra, etc., indican valores máximos admisibles del nivel de descargas parciales expresadas en picocoulomb de carga aparente “q”.

Así, por ejemplo, para transformadores de medida y para transformadores de potencia con aislamiento seco, el nivel de descarga parcial permisible debe ser de 50 pC. Para bushings de SF₆/aire y para bushings de Alta Tensión para transformadores de potencia, se acostumbra a permitir un nivel de 3 pC [26].

Con éste método se presenta un problema. Como se sabe las descargas parciales emiten en un ancho de banda que va de los 30 MHz a 1 GHz, por lo que una descarga muy pequeña puede ser pasada por alto por los equipos de detección, por lo que se desarrolla el segundo método de detección de descargas parciales mencionado en la norma IEC 60270, el cual se menciona a continuación.

Métodos de campo.

La medición y detección de descargas parciales en campo ha tenido gran importancia para el cuidado de las subestaciones, ya que representan un gran avance en la detección temprana de fallas para evitar la interrupción del sistema y en suma, dado a la posibilidad de una supervisión continua, el monitoreo remoto permite identificar las tendencias de deterioro en los equipos [2].

No solo los niveles de descargas parciales permiten detectar advertencias tempranas de una inminente falla en un equipo, también aceleran los procesos de ruptura. Se sabe que todos los equipos eléctricos, por su naturaleza, presentan descargas parciales; el monitoreo consiste en detectar anomalías en su comportamiento normal, permitiendo conocer su estado de aislamiento [34].

Una descarga parcial se caracteriza por una liberación muy brusca de energía (pulsación) que se desplaza en el medio en una forma de onda [3]. Al propagarse por el medio, esta onda tiene una atenuación que depende de la naturaleza del medio y de su frecuencia.

Si el medio donde se ha producido la descarga parcial es el aire, como el caso de las descargas corona, las frecuencias audibles se propagan mejor y se atenúan menos que las frecuencias superiores. Si el medio donde se produce la descarga es un líquido, un sólido o la combinación de los dos, las frecuencias superiores se propagan mucho mejor.

El método consiste en captar éstas ondas de emisión y evaluar su energía relativa que es proporcional a la energía de la descarga parcial que la ha generado. Tal como pasa con el concepto de “*carga aparente q*”, la energía relativa no es igual a la energía realmente liberada por la descarga parcial, pero al ser proporcional, es utilizable para medir el nivel de descargas presentes en el equipo. Esta energía relativa se expresa en valor adimensional, es decir, no está referido a ninguna unidad física, y se trata de medidas arbitrarias llamadas pulsos [26]

A lo largo de los años, se han realizado diversas investigaciones en este campo. Se sabe que estos pulsos electromagnéticos pueden ser generados por diversas fuentes como cuchillas, conexión y reconexión de equipos eléctricos de potencia, y fallas por arcos en los sistemas de transmisión. Aunque éstos fenómenos son considerados como interferencias electromagnéticas (EMI).

Método Ultrasónico.

La norma IEC 60270 considera éste método como no invasivo, conformado por sensores acústicos que van adheridos a las paredes de los equipos a prueba, teniendo una buena sensibilidad al detectar señales que surgen en el interior debido a descargas parciales.

Así, por ejemplo, se ha encontrado que la mayoría de descargas parciales detectadas y medidas con éste método apuntan a una acumulación de energía en la banda de frecuencia centrada en los 150 kHz [26]. Es por ésta razón que los equipos basados en ésta tecnología están compuestos por:

- a) Sensor ultrasónico (transductor piezoeléctrico), el cual se adhiere a las paredes del equipo a sensar y capta la onda generada por la descarga parcial. Generalmente están diseñadas para discriminar señales que se encuentren por debajo de los 150 kHz.
- b) Monitor electrónico digital el cual se encuentra conectado al sensor ultrasónico. Su función es la de amplificar la señal captada por el sensor, la procesa y calcula la energía relativa. Es el instrumento de medida, digital o analógico, que tiene un selector de niveles de amplificación de la señal, expresado en decibeles (dB).
- c) Osciloscopio conectado al monitor electrónico para visualizar en su pantalla la señal analógica captada, una vez amplificada.
- d) Memoria interna, para llevar un record de los eventos registrados y analizados, al tiempo que es posible autocalibrar el equipo.
- e) Salida para transmisión de datos como entradas GPIB o USB.

El método de localización por ultrasonido utiliza dos de los fenómenos producidos por las descargas parciales .El primero, producto de la rápida transferencia de carga que se produce, provoca una perturbación eléctrica de alta frecuencia que se propaga a través del circuito externo. El segundo debido a la disipación de energía la que provoca la generación de ondas de presión sónica y ultrasónica, que se propaga a través del medio donde se produce la descarga parcial.

La perturbación eléctrica se propaga a una velocidad cercana a la de la luz (10^8 m/s) a través del circuito eléctrico y la velocidad de la onda sonora dependerá del medio por el cual se propague, pero en general mucho menor comparada con la de la perturbación eléctrica, en aceite de transformador por ejemplo, la velocidad es de 1390 m/s. Es justamente esta diferencia la que permite utilizar estos dos fenómenos para la localización de la descarga parcial.

De esta forma, se puede considerar que la señal eléctrica aparece en los terminales del transformador instantáneamente. No así la onda de presión, la que tomará cierto tiempo para llegar a la red exterior del estanque del transformador. El intervalo de tiempo entre la llegada de las dos señales será una medida de la distancia entre la descarga y el punto en el cual se detecto la señal acústica.

Considerando el aspecto constructivo de los transformadores, la onda de presión producida por la descarga parcial, al propagarse debe atravesar diferentes medios (cobre, aceite, fierro, etc.) antes de alcanzar el sensor. Esto se traduce en diferentes velocidades de propagación, reflexiones, atenuaciones y diferentes modos de propagación.

Todos estos efectos pueden por una parte, limitar la sensibilidad del método, y por otra llegar a ser fuente de posibles errores en la medida del tiempo de propagación y en consecuencia, en la localización de la descarga parcial, con lo que se hace necesario analizarlos en detalle.

En la siguiente figura se muestra un esquema de cómo se detecta las descargas parciales internas por medio del método ultrasónico.

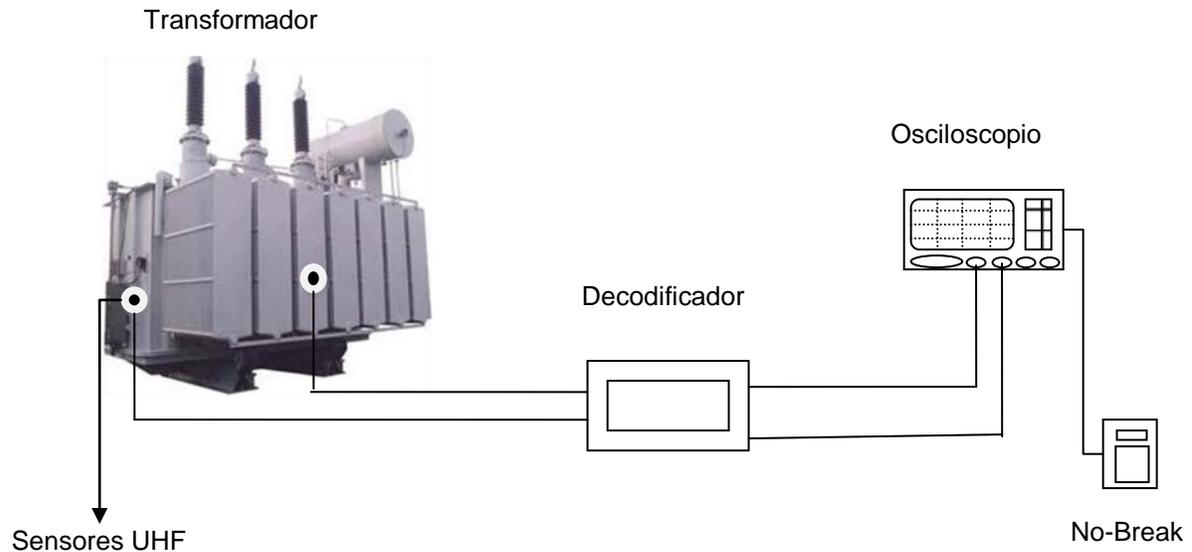


Figura No. 10. Esquema de propagación de la señal en un medio aislante producida por una descarga parcial detectada por el método ultrasónico.

En comparación con el método de laboratorio este método presenta tres ventajas importantes:

1. Posibilidad de realizar la detección de descargas parciales en los equipos de potencia sin necesidad de desconectarlos o sacarlos de línea.
2. Mayor captación de señales.
3. Posibilidad de localizar las zonas o zona del equipo que presenta la descarga interna

Dentro de sus desventajas se encuentra el hecho de que, al utilizar sensores que van adheridos a las paredes de los equipos, solo es posible utilizar éste método en subestaciones encapsuladas en gas (Conocidas como GIS, por sus siglas en ingles), o en los tanques de los transformadores de potencia, al tiempo de que presentan fallas de funcionamiento al estar expuestas a la intemperie por largos periodos de tiempo.

Aunado a lo mencionado en el párrafo anterior, solo es posible utilizarlo en los equipos mencionados. Si se intenta utilizarlos en la localización de descargas parciales en líneas de transmisión, o adherir los sensores en los interruptores de potencia, la amplitud de la onda captada sería muy pequeña, lo que se traduce en una señal mal captada e imposible de localizar [36]. Es por ésta razón que desde el año 1996, con el desarrollo de la teoría y la técnica de nuevas técnicas de radiodifusión, se han realizado investigaciones para realizar detección de descargas parciales por medio de sensores conectados a fibras ópticas.

Así mismo, se han realizado muchas investigaciones para detectar descargas parciales por medio de un nuevo método no invasivo, que no se encuentra en la clasificación de los acústicos y que ha demostrado ser eficiente, ya que puede usarse para detectar señales producidas por todos los equipos de potencia, estamos hablando del método radiométrico, del cual hablaré más tarde.

Como menciona Abbas Zargari, el método acústico ha sido usado comúnmente en la práctica para detectar y localizar descargas parciales en forma indirecta. Básicamente la localización de las descargas eléctricas dentro de una cavidad o en el vacío, producen ondas de presión ultrasónicas las cuales se propagan a través del medio aislante y alcanzan el chasis o cubierta del equipo [37].

Los transductores de presión pueden convertir las ondas ultrasónicas en señales eléctricas que ayudan a la detección e incluso a la localización de la fuente que genera la descarga parcial. La novedad con éste sistema consiste en que estas ondas de presión pasan por las fibras ópticas y viajan a través de ellas gobernadas por los coeficientes elásticos y elasto-ópticos de las fibras de vidrio.

La luz en la fibra puede ser modulada en diferentes maneras, por lo tanto, los sensores de la fibra óptica pueden ser clasificados de acuerdo a la señal que reciben. La limitante es la frecuencia que se propone para éstos sistemas, la cual se encuentra en el rango de los 20 KHz hasta los 300 KHz. Se puede observar un ejemplo de éste tipo de sistema en la figura No. 11.

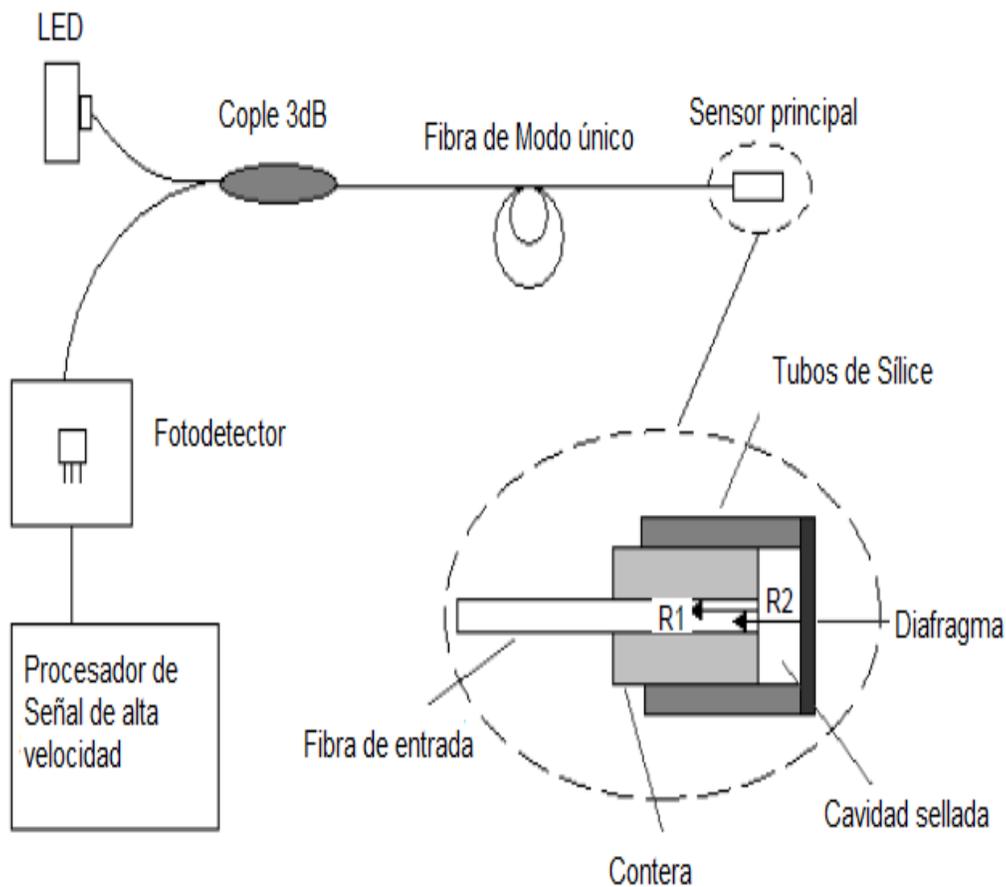


Figura No. 11. Diagrama detallado de un sistema de detección de descargas parciales basado en el método ultrasónico con sensores conectados por medio de fibra de vidrio [17].

Aún así, las ventajas que presenta éste método con el mencionado método de laboratorio y el químico radican principalmente en el hecho de que se adquiere la información de una manera más clara y confiable, al tiempo de que, con la aplicación de fibra óptica, es posible la detección múltiple del origen de las señales.

Su principal desventaja radica en que, al ser parte del método ultrasónico, el sensor debe estar adherido a las paredes del equipo, lo que limita su función, al tiempo de que las señales de UHF y VHF no son homogéneas [17], lo que se elimina con el método radiométrico de detección de descargas parciales.

CAPÍTULO 2:

Método Radiométrico de detección de Descargas Parciales

2.1 Introducción

El área de detección y medición de las Descargas Parciales es aceptada como una de las más valiosas técnicas no destructivas para la evaluación de la calidad y la integridad técnica de los equipos de potencia tanto en Media Tensión como en Alta Tensión y en cables de transmisión.

En sus inicios, se desarrollaron métodos básicos indirectos de detección en línea de actividad de descargas parciales los cuales consistían básicamente en un receptor de radio con una antena y frecuencia variable en el rango de los MHz y un metro analógico con una escala en μV y dB.

Estos dispositivos, también llamados medidores de tensión de interferencia de radio (o RIV por sus siglas en inglés), eran capaces de medir descargas parciales externas o descargas corona. Una mejora a este tipo de tecnología fue la adición de un osciloscopio simple con un ancho de banda limitado para visualizar y clasificar las diversas formas y patrones de onda de las descargas parciales, lo cual se tradujo con el tiempo en la capacidad de detectar y localizar la fuente de las descargas parciales [12].

Es muy conocido que las descargas parciales, en diferentes sistemas de aislamiento, producen efectos físicos diversos y representan diferentes mecanismos de descarga. En años recientes, la correlación entre Descargas Parciales y el tipo de daño o el defecto localizado en el equipo con presencia de falla, ha obtenido una importancia fundamental en la calidad de control de pruebas y en mantenimiento de las componentes de Alta Tensión [24].

Sin embargo, hasta ahora, el problema de identificación y clasificación de fenómenos de descargas parciales ocurridos en los sistemas de potencia se ha realizado por medio de sistemas de detección de contacto por medio de sensores ultrasónicos.

Pero la problemática de las Descargas Parciales va más allá. Si bien es cierto que es posible detectar una falla en los equipos de potencia con sensores colocados en las paredes de dichos equipo, también es cierto que una detección temprana y una clasificación con base científica de las fallas, harán posible evitar un daño mayor al equipo y, en suma, al sistema.

Desde hace tiempo, la evaluación de la calidad o estado de un aislamiento de alta tensión se ha basado en la medición de su factor de pérdidas dieléctricas. Pero a causa de la aparición de los aislantes de material sintético con un factor de pérdidas dieléctricas muy bajo, la detección del nivel de descargas parciales es un buen complemento, incluso en determinados casos es una buena alternativa a la medición del factor de pérdidas dieléctricas [25].

Para la evaluación de la calidad o el estado de aislamiento de elementos ya fabricados (producto final) y/o en servicio, la detección de las descargas parciales resulta más ventajosa, porque hay más posibilidades de localizar defectos o anomalías en puntos o zonas concretas (defectos discretos).

Por lo tanto, permite poner en evidencia puntos débiles que hayan aparecido durante o después de la fabricación, maltrato en el transporte y manipulación del equipo o durante el proceso de montaje [25].

Al igual que la medición del factor de pérdidas dieléctricas, la medida del nivel de descargas parciales tiene como objetivo la estimación de la vida útil probable de los elementos y/o equipos de Alta Tensión en lo que se refiere a su aislamiento.

A pesar de que las técnicas actuales de detección y medición de las Descargas Parciales no proporcionan parámetros cuantitativos de la vida útil esperada, aportan datos cualitativos muy útiles sobre el estado de los aislamientos que permiten la detención temprana de fallos o la localización de puntos débiles [26].

No solo es importante medir las descargas parciales, o detectarlas en los equipos de potencia para evaluar su estado de funcionamiento, sino también su evolución en un lapso de tiempo determinado. De allí se deriva su importancia de detección ya que, al estar presente el fenómeno de descargas parciales, se va degradando el material dieléctrico, provocando fallos que llegan a ser catastróficos.

Para un adecuado control o vigilancia del estado de aislamiento, es conveniente repetir la medición de nivel de descargas parciales y, al mismo tiempo determinar periodos de monitoreo para comparar el comportamiento de un equipo medido con anterioridad con su comportamiento actual.

Una característica de las descargas parciales y que se debe tomar en cuenta al momento de realizar un monitoreo en los equipos de potencia, es que sus patrones de señales generalmente cambian y dependen de la tensión en la que ocurrieron la duración de la falla o prueba, la naturaleza del fenómeno [27].

Actualmente para la interpretación de los patrones de descargas parciales obtenidos mediante métodos normalizados, se utiliza de manera generalizada la referencia generada por el grupo 21.03 de la Conferencia Internacional de las Grandes Redes Eléctricas (CIGRE), “Recognition of Discharges”. De acuerdo con este grupo de trabajo del CIGRE, los principales patrones de descargas parciales son los siguientes [28]:

a) Descargas parciales internas debidas a cavidades dentro del aislante.

Descargas de aproximadamente la misma amplitud, número y localización ocurren sobre la forma de onda senoidal antes de los picos de voltajes. Es decir, los pulsos aparecen cuando la curva de la forma de onda va ascendiendo. Las amplitudes de los pulsos son similares tanto en el ciclo positivo como en el negativo. En la siguiente figura se muestra el diagrama de Lissajous del patrón de estas descargas.

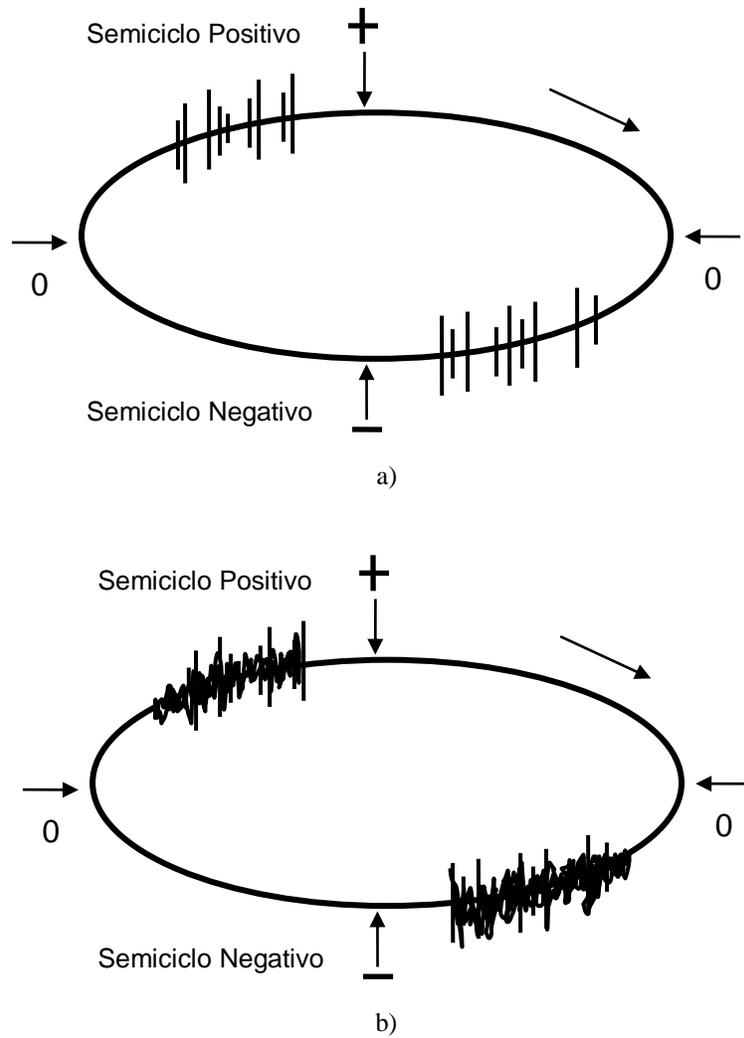


Figura No. 12. Diagrama del patrón de descargas parciales internas en los aislamientos. a) En una cavidad dentro del aislante, b) debido a múltiples cavidades [27].

b) Descargas parciales externas superficiales [28].

Los pulsos de las descargas ocurren sobre la forma de onda senoidal en los picos de voltaje. Las amplitudes de los pulsos son similares tanto en el ciclo positivo como en el negativo. En la figura No. 13, se muestra un ejemplo de este tipo de descargas con una base de tiempo elíptica.

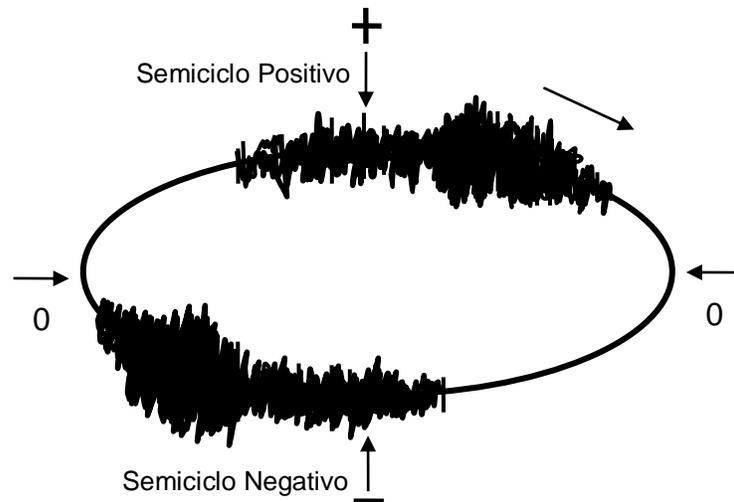


Figura No. 13. Diagrama del patrón de descargas parciales externas [28].

c) *Descargas parciales internas en una cavidad entre el dieléctrico y el electrodo de tierra [27].*

Las descargas se presentan antes de los picos de voltaje de la onda senoidal. En este caso, se tienen un pequeño número de descargas grandes en un medio ciclo y en el otro se tiene un gran número de descargas pequeñas. Esta diferencia en amplitud debe ser mayor de 3 a 1. En la siguiente figura, se muestra un ejemplo de este tipo de descargas.

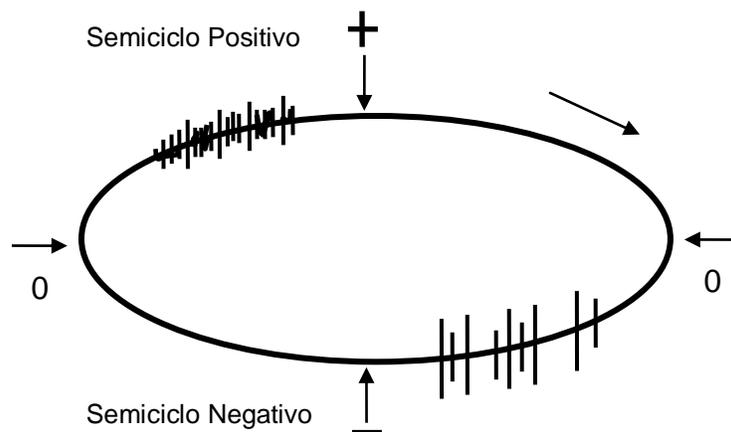


Figura No. 14. Diagrama del patrón de descargas internas en una cavidad entre el dieléctrico y el electrodo de tierra [28].

2.1 Generación y detección de las ondas electromagnéticas.

Su capacidad para monitorear todo su entorno, le proporciona una ventaja considerable con respecto a los otros métodos de detección, como el método químico y de laboratorio que son invasivos, o el ultrasónico, que es semi-invasivo y de los cuales ya se trató en el capítulo anterior.

El estudio de las emisiones de radio electromagnéticas, (conocidas como ondas atmosféricas de radio o esféricas) se ha tomado con mayor seriedad desde que se descubrió su utilidad para detectar descargas parciales en el interior de los equipos e instalaciones de potencia [13].

Las descargas parciales, al generarse, emiten ondas electromagnéticas capaces de viajar largas distancias a lo largo de la atmósfera y su energía está relacionada con las características no lineales de su fuente. Esta energía liberada depende de la corriente transitoria que fluye a través del arco generado [39].

Sin embargo es posible diferenciar las frecuencias características de las ondas al analizar los espectros captados ya que, la característica principal de las ondas de VHF generalmente ocurren en los equipos de potencia; las señales con características de UHF o superiores, son características de pequeños arcos generados en el interior de los equipos e instalaciones de potencia, principalmente en los defectos que tienen sus aislamientos, como por ejemplo, en el interior de una cavidad [43].

Cuando se da un arco entre dos electrodos a diferente potencial en el aire, el resultado es la emisión de una onda electromagnética en forma de ruido conocido como Interferencia Electromagnética (EMI, por sus siglas en Ingles). Las señales captadas muestran que se generan dos arcos cada ciclo, produciendo una señal de ruido con una envolvente de 100 Hz. Estos resultados se extienden desde la frecuencia fundamental hasta la región de UHF [13, 36].

En la banda de VHF, la transmisión de ondas esféricas inducidas por arcos requiere de una estructura para transmitir la energía electromagnética con una longitud de onda de 1 m hasta 10 m. lo que muestra que los mecanismos de arcos en los sistemas de potencia transmiten ondas esféricas como si fuera un sistema de comunicaciones [36].

Las descargas parciales generadas en el interior de los equipos de potencia tales como interruptores de potencia o transformadores, en los límites entre aislamientos de diferente constante dieléctrica o en los conductores, tienen menor energía que los arcos de falla generados en el aire. Esto se debe a que las descargas deben viajar a través de los materiales aislantes como son el aceite, SF₆, aire o polímero, lo que genera una atenuación en la onda.

La onda electromagnética viaja a través de los conductores y sale al exterior del equipo por las conexiones externas de los equipos, las cuales actúan como antenas de emisión. La capacidad de detectarlas, clasificarlas y obtener un análisis completo de sus características, depende del método de detección, captura y guardado de la señal, es en este punto, donde el método radiométrico cobra gran importancia.

2.3 Relevancia del método radiométrico

P. J. Moore ha demostrado la gran utilidad, práctica y versatilidad que tiene el sistema de detección de señales emitidas por las descargas parciales basado en el método radiométrico, y ha sugerido que en la manera de lo posible, se extienda este método de detección para monitorear todos los equipos e instalaciones de potencia [7, 41, 42].

Recientes investigaciones sugieren que la radiación electromagnética en forma de ondas de radio atmosférica (o esférica), son originadas por los equipos y aparatos de los sistemas de potencia cuando se generan fallas o se presentan corrientes transitorias [38].

Lo anterior puede suceder, como se ha mencionado, durante eventos tales como la apertura y cierre de cuchillas, apertura y cierre del Interruptor de Potencia, fallas internas en los aislamientos, etc.

La medición de la condición de descargas parciales en los equipos de una subestación es crítica para anticipar la falla del equipo, prevenir cortes de energía, garantizar la seguridad de los técnicos operadores y de mantenimiento. Es por ello que el monitoreo de las descargas parciales tiene gran importancia [39].

El desarrollo de la técnica radiométrica se caracteriza porque nos permite detectar descargas parciales en un rango de los 30 MHz hasta los 500MHz. La mayoría de los sistemas basados en la tecnología radiométrica utilizan antenas bicónicas o disco conectadas a un osciloscopio o equipos rectificadores, los cuales a su vez, se encuentran conectados a un decodificador el cual guarda la información.

Posteriormente, la información almacenada es transferida a una computadora para analizar y guardar las señales, así es posible determinar si la señal captada se deriva de un evento considerable en el interior al equipo.

Un ejemplo del sistema mencionado anteriormente, es el desarrollado por P. J. Moore, I. Portugués, I. A. Glover [7], en el cual se emplea una antena bicónica, un osciloscopio y una interfaz de comunicación IEEE 488 o GPIB, del que se muestra el diagrama en la figura No. 11.

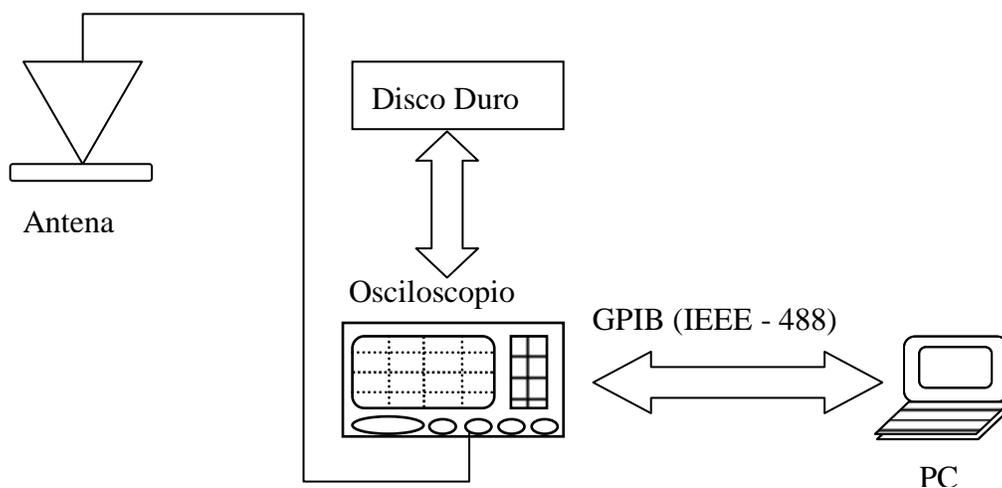


Figura No. 15. Diagrama de funcionamiento del sistema radiométrico desarrollado por J. P. Moore [7].

De acuerdo con la información anterior, y con lo analizado en el capítulo 1, podemos comparar los sistemas de detección de descargas parciales, como se muestra en la siguiente tabla, con el fin de determinar cuál de los métodos antes mencionados nos presenta mayores ventajas para detectar descargas parciales.

Tabla No. 2. Principales características de los tres sistemas de detección de descargas parciales.

Método de laboratorio.	Método Ultrasónico	Método Radiométrico
Se realiza en laboratorio.	Se realiza en campo.	Se realiza en campo.
Es necesario desconectar el equipo y en su defecto desmontar para realizar la prueba.	Poca sensibilidad. Su espectro se centra en 150 KHz.	Captan todo el espectro de las descargas parciales. Se sabe que la frecuencia de emisión de las descargas parciales es de 30 MHz a 1 GHz.
Se induce una tensión al equipo para generar una descarga parcial.	Al adherir los sensores a la superficie del equipo no es posible detectar todas las descargas generadas en su interior.	Les es posible detectar hasta la más mínima descarga.
Es un sistema invasivo.	Es un sistema semi-invasivo.	Es un sistema no invasivo.
Las pruebas pueden ser destructivas si el objeto a prueba ya está muy sensible o presenta malformaciones internas.	Los sensores pueden despegarse de la superficie del equipo perdiendo la medición.	Al no estar en la superficie del equipo es posible dejarlas en el lugar sin que deje de captar señales.
Se auxilia en detección química (Cromatografía de gases), y física por medio de una espectroscopia para determinar si existen indicios de descarga parcial.	En ciertas condiciones atmosféricas o de trabajo no pueden operar.	Pueden operar en casi cualquier ambiente.
-----	Están limitadas a Subestaciones encapsuladas en gas (GIS) y a Transformadores.	Tiene la capacidad de censar las emisiones de cualquier equipo e instalación de potencia conectado en la subestación.

Como se observa en la tabla anterior, de los tres métodos analizados el que presenta mayor ventaja es el método radiométrico, principalmente porque es un método no invasivo y puede operar en cualquier ambiente, no es necesario desmontar el equipo para realizar las pruebas, como en el caso del método de laboratorio.

Al no tener contacto directo con los equipos, no deja marcas en las paredes ni superficies, como en el caso del método ultrasónico. Al estar monitoreando solo las frecuencias características de emisión de las descargas parciales se puede realizar un monitoreo de todos los equipos e instalaciones de potencia ubicados en las subestaciones.

Otro aspecto fundamental que considera éste método, es el hecho de que las señales radiométricas llevan inmersas señales basura o ruido generado por el rebote de las señales con las estructuras metálicas presentes en las subestaciones.

Es por ésta razón y por el efecto multidireccional de las señales, lo que dificulta la caracterización de los efectos de las descargas parciales, por lo que es necesario reconstruir las señales por medio de la utilización de la transformada Rápida de Fourier o la Transformada Rápida de Walsh-Hadamard para adquirir una señal más cercana a la original generada por la descarga parcial.

CAPÍTULO 3:

Desarrollo de la metodología para la obtención de huellas electromagnéticas en equipos e instalaciones de potencia.

3.1 Introducción

La diferencia principal de este sistema basado en el método radiométrico, con los métodos mencionados en los capítulos anteriores, es la versatilidad en la detección de las descargas parciales. Al estar en una subestación, es posible captar las emisiones producidas por las descargas parciales en los equipos e instalaciones de potencia, aún estando alejados del equipo a monitorear.

Cabe aclarar en este punto que, por ejemplo en un transformador o en un interruptor de potencia, no se detectan las descargas porque atraviesen sus cubiertas, en el caso del transformador el tanque y en el caso del interruptor la cámara de extinción. Las señales de las descargas parciales salen al exterior por medio de las conexiones externas que estos equipos presentan.

La presente metodología de captura de huellas patrón es parte de una investigación que derivó en la creación de un sistema de detección de descargas parciales. Por medio de ese sistema se realizó un primer acercamiento a la detección de las descargas parciales obteniendo grandes resultados.

En el caso de los sistemas de detección basados en VHF, tienen la capacidad de detectar señales que van desde los 30 MHz hasta los 300 MHz. Para los sistemas basados en tecnología de detección por medio de ondas UHF, su capacidad de detección es para señales que van de los 300 MHz hasta 3 GHz.

El sistema consiste en un arreglo de cuatro antenas díscono, que poseen la capacidad de detectar señales en un rango de 30 MHz a un 3GHz, con lo cual se abarca todo el espectro característico de las descargas parciales que es de 30 MHz a 1 GHz. Este sistema presenta la gran ventaja de que se está captando todo el espectro [8].

No se le hicieron cambios al sistema de localización desarrollado, pero si se mejoró la funcionalidad y resistencia mecánica de las antenas díscono. En la Figura No. 16, se muestra la nueva antena respetando los parámetros de diseño desarrollados en la investigación anterior [43].



Figura No. 16. Antena díscono utilizada en el sistema.

Con el sistema anterior no se tenía una comunicación con la computadora, todas las señales captadas por las antenas eran mandadas al osciloscopio y éste las almacenaba en su memoria interna. Una vez terminada la prueba se insertaba una memoria USB y se guardaba la información para, posteriormente, guardarlas y analizarlas en una computadora.

Ahora bien, el reto era el de tener comunicación con el osciloscopio para poder salvaguardar los datos recibidos por las antenas en el momento de captar las señales producidas por las descargas parciales, sin modificar sus datos. También era necesario obtener la huella patrón del equipo a sensar, con el fin de tener evidencia gráfica de lo captado por las antenas.

Al mismo tiempo, como se muestra en el esquema de la Figura No. 17, dichas señales y gráficas debían ser enviadas vía internet para que en un punto remoto se pudiese tener acceso a los datos, teniendo seguridad y envío total de la información y la capacidad de tomar decisiones el mismo día de las capturas, a fin de prevenir una falla catastrófica si es detectado un problema de descarga parcial en un equipo.

La importancia de esta comunicación radica en que es posible llevar un monitoreo en línea de los equipos que se están censando en el momento, no importa la distancia a la que se encuentre. Así mismo, se puede tener acceso a las imágenes captadas por cada uno de los canales del osciloscopio. Esta problemática fue analizada y resuelta en esta tesis, el desarrollo y explicación de funcionamiento se muestra a continuación.

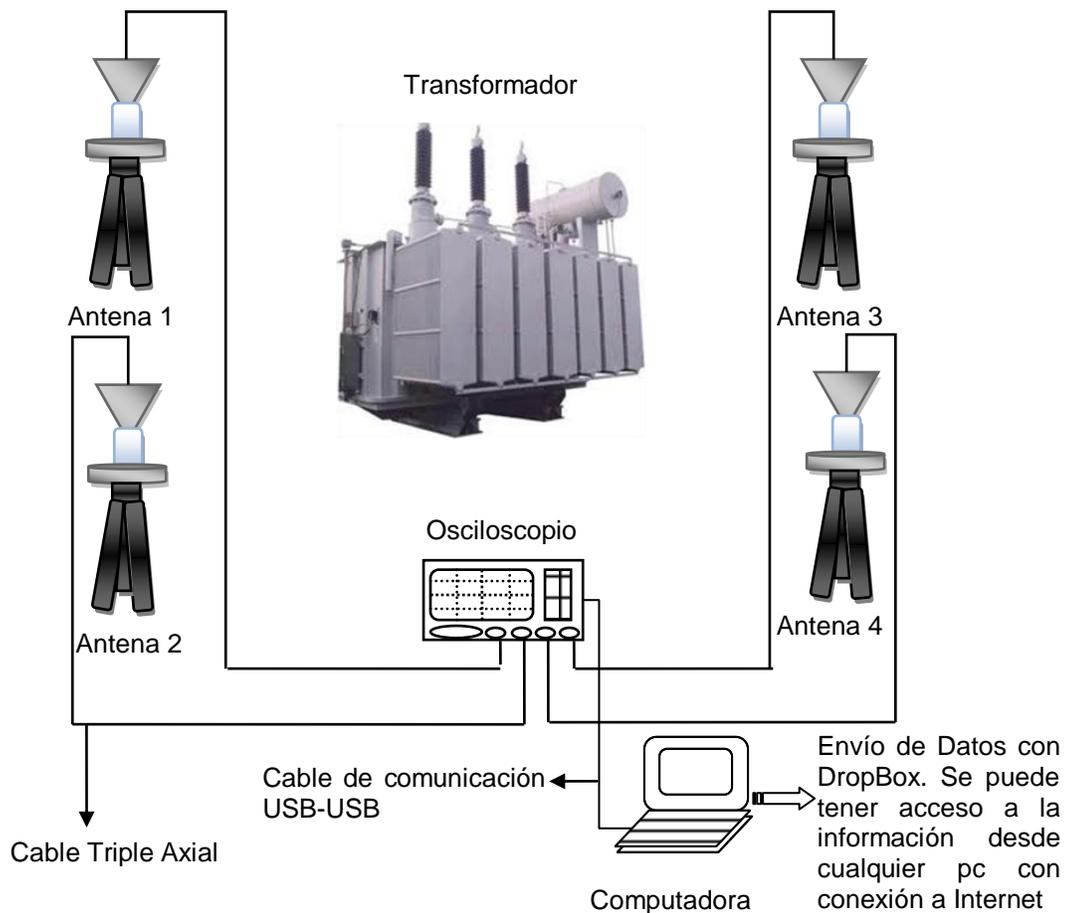


Figura No. 17. Esquema de funcionamiento del nuevo sistema de detección de descargas parciales.

3.2 Desarrollo del sistema de comunicación osciloscopio-computadora.

El programa de comunicación entre el osciloscopio y la computadora, se realizó por medio del proceso habla-escucha utilizando el protocolo VISA [9], conectando el osciloscopio a la computadora por medio de un cable USB. Dicho programa fue desarrollado en Matlab, de acuerdo a lo estipulado en las herramientas de control y medición [44], y tomando en cuenta las consideraciones emitidas por el fabricante del osciloscopio a usar: MSO 4104 de Tektronix, cuyas principales especificaciones técnicas son: osciloscopio de 4 canales analógicos, 1 Gs/s, y 1 GHz de ancho de banda [45].

El MSO 4104 es un osciloscopio de fósforo digital de última generación el cual permite realizar mediciones de señales, su inspección y su muestreo con una capacidad de visualización mayor a 50,000 formas de onda/segundo. Permite el envío de datos por medio de puertos GPIB y USB, utilizando el protocolo VISA.

Para el diseño, se utilizó la comunicación USB-USB, ya que permite el envío de datos de manera más rápida a una computadora con puerto USB generación 2.0. El programa fue desarrollado de acuerdo a lo estipulado para osciloscopios Tektronix en su página de internet, respetando su programación interna y sin modificar sus parámetros de fábrica, a fin de no dar un mal uso al osciloscopio o en su defecto desconfigurarlo [46].

El primer paso para la comunicación con el osciloscopio es la generación de un objeto virtual en el cual se pueda realizar la comunicación. Dicho objeto se genera en Matlab por medio del comando *visa*, el cual es un comando de comunicación con el osciloscopio. Dicho comando necesita: las siglas de identificación del osciloscopio; la dirección del puerto al cual se va a conectar el osciloscopio, conocida como *visa_address*, los puntos de muestreo o regulador de señal *buffer*.

```
visa_brand = 'tek';  
visa_address = 'USB::0x0699::0x0401::C001476::INSTR';  
buffer = 20 * 1024;
```

```
dpo =
visa(visa_brand,visa_address,'InputBufferSize',buffer,'OutputBuffer
rSize',buffer);
```

A continuación, se procede a abrir el objeto virtual creado, con el fin de adquirir información sobre el estado del osciloscopio. Si se obtiene como respuesta un 1, entonces la comunicación se ha realizado satisfactoriamente.

```
fopen(dpo);
query(dpo,'*idn?;')
query(dpo,'*esr?;')

if ans ~= '0'
    query(dpo,':allev?;')
end
head = query(dpo,':head?;');
head = head(end-1);
```

Por último, se guarda la comunicación y se cierra el objeto creado, lo que permite a la computadora tener acceso completo a los datos que capte el osciloscopio.

```
fid = fopen('dpo4k_spi.lrn', 'wt');
fprintf(fid,lrn_str,'%s');
fclose(fid);
```

Una vez que se ha establecido la comunicación correcta con el equipo, se procede a habilitar los cuatro canales del osciloscopio, para que puedan tener la habilidad de enviar los datos de las señales y que puedan realizar un muestreo de la señal, tal como se observa en la pantalla del osciloscopio.

```
query(dpo,':data:source ch1::data?;') query(dpo,':wfmo?;')
query(dpo,':data?;')
reco1 = query(dpo,':hor:reco1?;'); % Encuentra longitud
fwrite(dpo,[':data:start 1;stop ' reco1(1:end-1) ']);
```

Para generar la señal en una Figura, es necesario obtener los datos tanto horizontales como verticales de la señal. Los datos horizontales pertenecen al tiempo de muestreo de la señal, los datos verticales a la tensión.

```
% Obtención de informacion de escala vertical Canal 1
yof1 = query(dpo, ':wfmo:yof1?;', '%s', '%E');
ymul = query(dpo, ':wfmo:ymul?;', '%s', '%E');
yzel = query(dpo, ':wfmo:yzel?;', '%s', '%E');

Obtención de informacion de escala horizontal Canal 1
nrp1 = query(dpo, ':wfmo:nr_p1?;', '%s', '%E');
xin1 = query(dpo, ':wfmo:xin1?;', '%s', '%E');
xzel = query(dpo, ':wfmo:xzel?;', '%s', '%E');
```

Dichos valores se almacenan y se imprimen en un archivo de Excel, el cual permite su almacenamiento. Una vez guardados, imprimimos los datos y se construye la forma de onda de la señal.

```
fwrite(dpo, ':curve?;');
wave1 = int8(binblockread(dpo, 'int8'));

% Canal 1
scaled_wave1 = (double(wave1)-yof1).*ymul+yzel;
scaled_time1 = linspace(xzel,xzel+(xin1*nrp1),nrp1);
```

El comando *binblockread*, permite leer un bloque de datos binarios con una precisión de *int8*, la cual es el número de bits permitidos para escribir un valor. El comando *linspace*, genera un vector lineal espaciado, de acuerdo a los datos horizontales obtenidos con anterioridad. Con los datos anteriores, es posible pasar a la visualización de la señal adquirida en el canal dado de alta en el programa, tal como aparece en la pantalla del osciloscopio.

Para ello, se habilita una nueva ventana para generar la Figura correspondiente con el comando *figure*. Para la captura de la señal se utiliza el comando *stairs*, el cual permite hacer un gráfico de las señales con variaciones en el tiempo, como son el caso de las descargas parciales, comparando tensión vs tiempo.

```
figure;
wfmgraph1 = stairs(scaled_time1,scaled_wave1);
set(1,'NumberTitle','off','Name','my wave ch1');
title(cellArray);
xlabel('time (s)');
ylabel('voltage (v) Ch1');
% ylim([min(scaled_wave) max(scaled_wave)]);
delete(maxline,minline);
xlim([min(scaled_time1) max(scaled_time1)]);
% Anotación de punto de disparo trigger
trigline1 = line([0 0],[max(scaled_wave1) min(scaled_wave1)], [0
0], 'Color', 'red', 'LineStyle', ':');
maxline1 = line([min(scaled_time1) % max
max(scaled_time1)], [max(scaled_wave1) max(scaled_wave1)], [0
0], 'Color', 'cyan', 'LineStyle', '--');
minline1 = line([min(scaled_time1) % min
max(scaled_time1)], [min(scaled_wave1) min(scaled_wave1)], [0
0], 'Color', 'cyan', 'LineStyle', '--');
grid on % Escala
saveas(wfmgraph1,path,'fig');
delete(1)
```

Es posible obtener el *trigger* o disparo de la señal por medio de la obtención del punto máximo de la señal de onda. Una vez generada la imagen, es guardada para su envío en la misma carpeta en la que se guardan los datos de la señal y, para ahorrar memoria RAM, la imagen es borrada del *Command window* de Matlab.

Ahora, los datos captados son almacenados en un archivo en Excel. Para generar el archivo se utiliza el comando *xlswrite*, el cual genera una hoja de cálculo nueva y la organiza de acuerdo a cómo uno la programe.

```
tit=[{'SeñalCh1'}, {'TriggerCh1'}{'detalles'}, {'detalles2'}, {'detalles3'}, {'detalles4'}, {'TiempoCh1'}];  
[estado]=xlswrite(file,tit,hoja,'A1');
```

Lo primero que se declara son los títulos de la columna y se envía el comando para crearlos. Una vez creada, las columnas de la nueva Hoja de Excel es llenada con los valores obtenidos por cada uno de los canales, esto se programa de la siguiente manera.

```
vall=scaled_wavel;  
[estado1]=xlswrite(file,vall,hoja,'A2');  
  
if estado1==0  
disp('La creacion del archivo ha fallado.');
```

Donde *scaled_wavel* es, por ejemplo, los datos de la señal captada por la antena 1. Éste comando ordena los datos de tal manera que no se sobrescriban ni que se pierda información.

El envío de los datos e imágenes de la señal es por medio de la dirección dada de alta al inicio del programa, representada por *path*, y se realiza un resguardo de la información en un espacio libre en internet, el cual se obtiene por medio del software DropBox.

DropBox es un espacio de almacenamiento gratuito hasta 2 Gb de información, en el que la información es encriptada utilizando los estándares definidos por la Secretaría de Defensa de los Estados Unidos [47]. Toda la transmisión de datos se realiza bajo el protocolo de encriptación SSL, al mismo tiempo que los servidores de DropBox se encuentran encriptados bajo el protocolo AES-256, lo que permite que ninguna persona ajena o sin permiso explícito pueda acceder a la información.

DropBox utiliza el sistema de almacenamiento único de Amazon, denominado S3, el cual cuenta con una política de seguridad única en su tipo, y que garantiza la seguridad e inviolabilidad de la cuenta, el ID, y los archivos.

Una vez captados y guardados los datos de la señal, se procede a preparar al osciloscopio para otra medición, borrando la información adquirida de la memoria temporal del osciloscopio, lo que garantiza que, al obtener otra señal, no se van a transponer o combinar los datos, teniendo un registro único para cada evento captado.

```
fwrite(dpo,lrn_str)
if head == '1'
    fwrite(dpo,[':head ' head ';;verb ' verb ';']);
end

delete(instrfindall)

close all;
clc; clear all;
% fclose(dpo);
```

Este proceso puede repetirse las veces que sean necesarias para llevar un registro de los acontecimientos dentro de la medición de las descargas parciales en las subestaciones. Así mismo, este programa nos permite tener un histórico del comportamiento de los equipos sensados, esto con el fin de detectar comportamientos anómalos.

Los registros del comportamiento del equipo a valores nominales de operación lo llamamos Huella Patrón, un ejemplo se muestra en la Figura No.18, en donde se observa el espectro electromagnético de la operación de cierre de un interruptor de potencia de 230 kV, captado por el sistema durante las pruebas que se desarrollaron en la subestación Texcoco, perteneciente al anillo de alimentación principal de la Ciudad de México controlada por CFE.

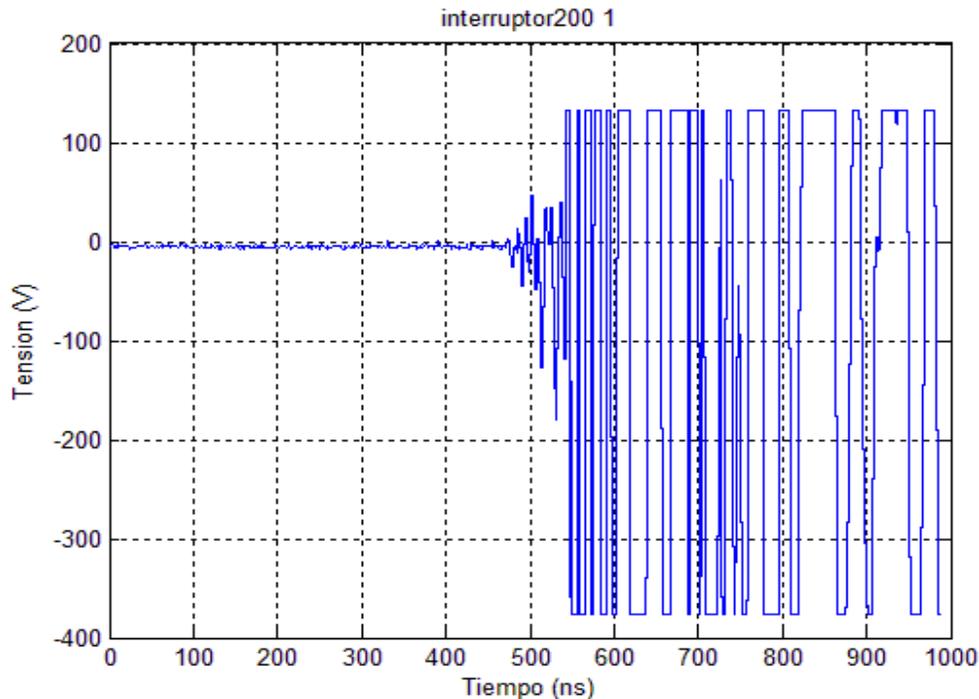


Figura No. 18. Huella patrón del comportamiento a valor nominal de un Interruptor de Potencia de 230 kV en operación de cierre.

Se observa que, al iniciar la descarga, la señal va aumentando su amplitud e inicia con una frecuencia muy alta. Este proceso se debe a que se da inicio al proceso de ionización del medio y por la presencia de carga espacial. El proceso de descarga inicia cuando los contactos del interruptor se van acercando, al modificar su distancia y en presencia de un campo eléctrico, y por la presencia de la carga espacial existe una densidad volumétrica de carga lo que inicia una avalancha electrónica.

La señal se hace más lenta y tiende a cuadrarse en los máximos de la señal, esto se debe al proceso de arranque – parada de la descarga. La avalancha electrónica se asume como una concentración volumétrica positiva y justo atrás la carga negativa, debido a la movilidad de los electrones. El campo externo se debilita debido a los autocampos de los electrones y la carga espacial y los iones dejan de recibir energía (como una parada). Si se logra vencer las concentraciones electrónicas de 10^8 , se vencen los autocampos y se continúa con la descarga.

Al final se observa que no se logró captar en su totalidad la descarga, esto debido a que se había programado al osciloscopio para que captara solo 1000 datos por evento, esto se corrigió en las pruebas posteriores de las cuales se hablará en el Capítulo 4. En la tabla No. 3 se muestran los datos de placa del Interruptor de potencia del cual pertenece la señal mostrada en la Figura No. 18 y en la Figura No. 19 se muestra una fotografía del interruptor.



Figura No. 19. Fotografía del Interruptor de Potencia de 230 kV.

Tabla No. 3. Datos de placa del Interruptor de Potencia de 230 kV.

Interruptor 93620		
Tensión nominal: 245 kV.	Tensión de aguante a 60 Hz: 460 kV.	Corriente nominal: 1600 A.
Nivel de aislamiento al impulso: 1175 kV.	Corriente interruptiva de Corto Circuito: 40 kA.	Presión de operación del SF ₆ : 0.68 MPa.
Tiempo de interrupción: 50 ms.	Peso del gas SF ₆ : 36 kg.	Frecuencia Nominal: 60 Hz.

Entonces, podemos definir a la huella patrón como la huella electromagnética de un equipo de potencia trabajando en condiciones normales de operación, la cual permite llevar un control del equipo y, al detectarse una diferencia, poder avisar con anticipación a los equipos de mantenimiento, previniendo una falla del equipo.

3.3 Optimización del software de clasificación.

Como se mencionó anteriormente, el programa diseñado en la investigación anterior para localizar la fuente de donde proviene la señal de la descarga parcial se modificó de tal manera que fuera más dinámico para proporcionar las coordenadas de las antenas y obtener el resultado del análisis más rápido.

Con el sistema anterior, era necesario procesar primero con un software los datos guardados de las descargas ya que no eran guardados en la computadora; se tenía acceso a los datos de forma manual, es decir, se tenía que abrir la dirección de la carpeta en la ventana *current folder*; una vez abierto, se arrastraban los datos al *workspace* y solo se podía tener acceso a ellos escribiendo los comandos necesarios en el *Command window*. Este proceso de lectura de los datos era muy tardado y aumentaba el tiempo de análisis. En la siguiente Figura se muestra la lista de señales en el *workspace* de Matlab ®, las cuales debían ser guardadas antes de ser utilizadas en el *Command window*.

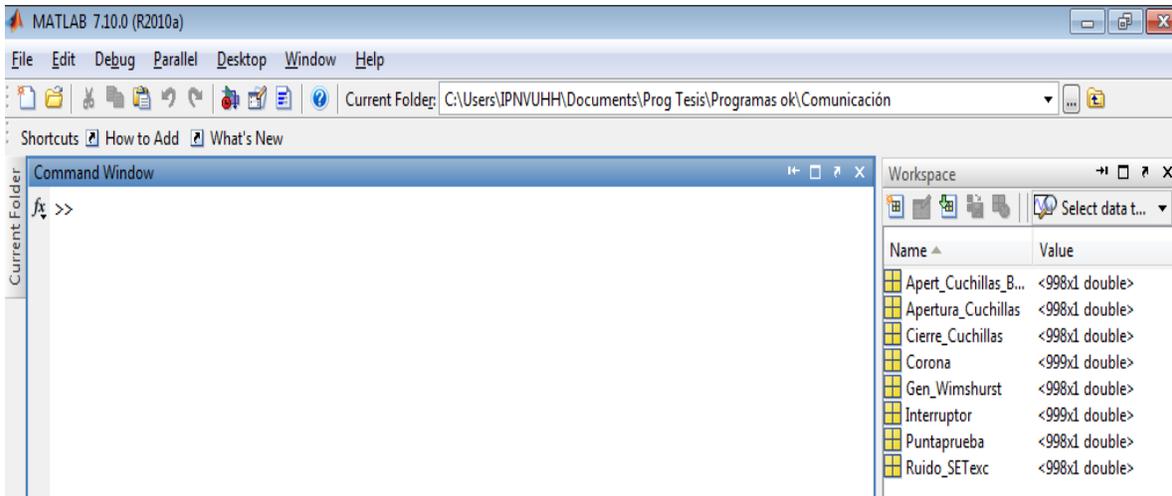


Figura No. 20. Llamado y guardado de datos en el *workspace*.

Una vez guardados los datos, eran sometidos a un procesamiento primario utilizando la limpieza de señales (*denoising*) de la transformada wavelet, que se encuentra en el menú *wavemenu* de Matlab. En la Figura No. 21 se observa la ventana principal de wave menu. Una vez abierto el menú, se seleccionaba la opción *wavelet packet 1-D* para que aparezca la ventana de herramientas, como la que se muestra en la Figura No. 22.

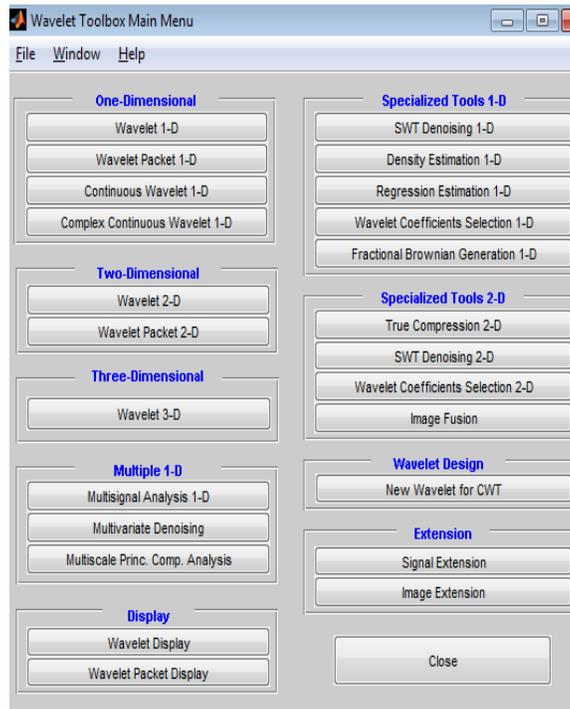


Figura No. 21. Menú principal de *wavelet Toolbox*.

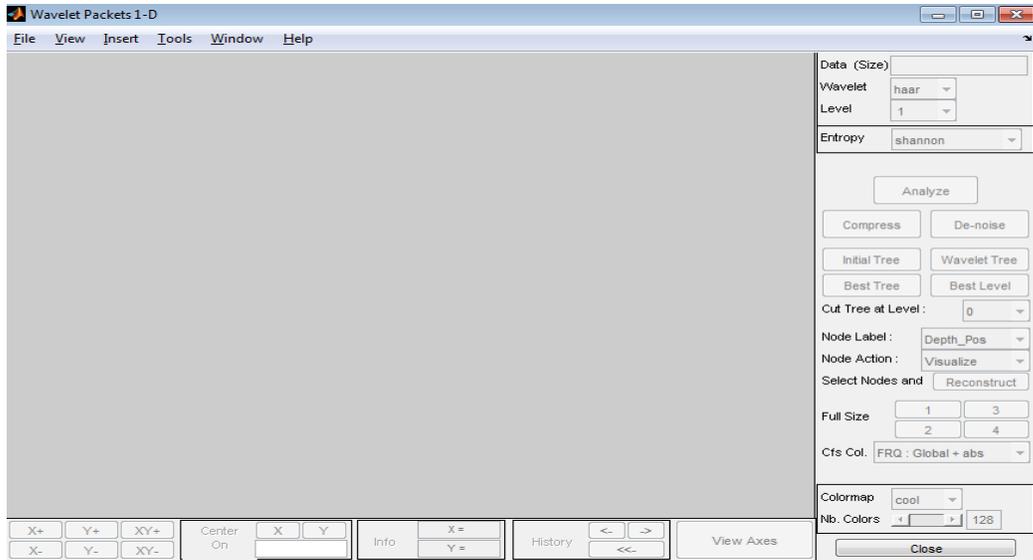


Figura No. 22. Menú principal de *wavelet Packet 1-D*.

Se accesa a los datos dando click en *file, import from workspace* tal como se ilustra en la Figura No. 23. Se seleccionan los parámetros necesarios para realizar el procesamiento digital primario. De acuerdo a los experimentos realizados y a las pruebas en las señales, los parámetros adecuados se muestran en la Figura No. 23 donde se observa la señal sin procesar y las opciones para proporcionar los parámetros. Cada vez que se inicia una nueva señal, se deben escribir de nueva cuenta los parámetros.

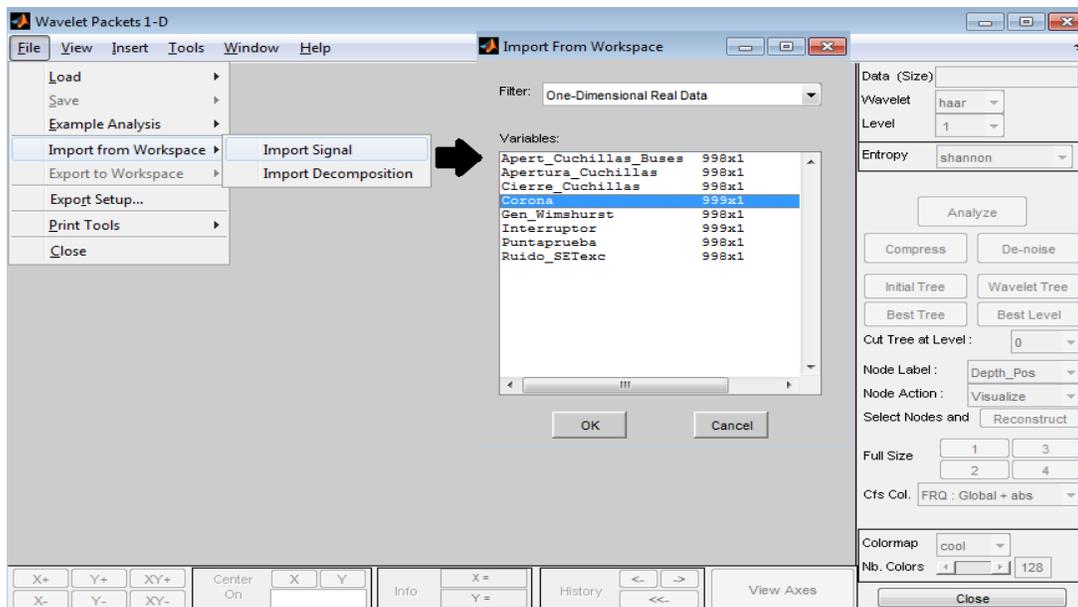


Figura No. 23. Acceso a los datos en el *wavelet packet 1-D*.

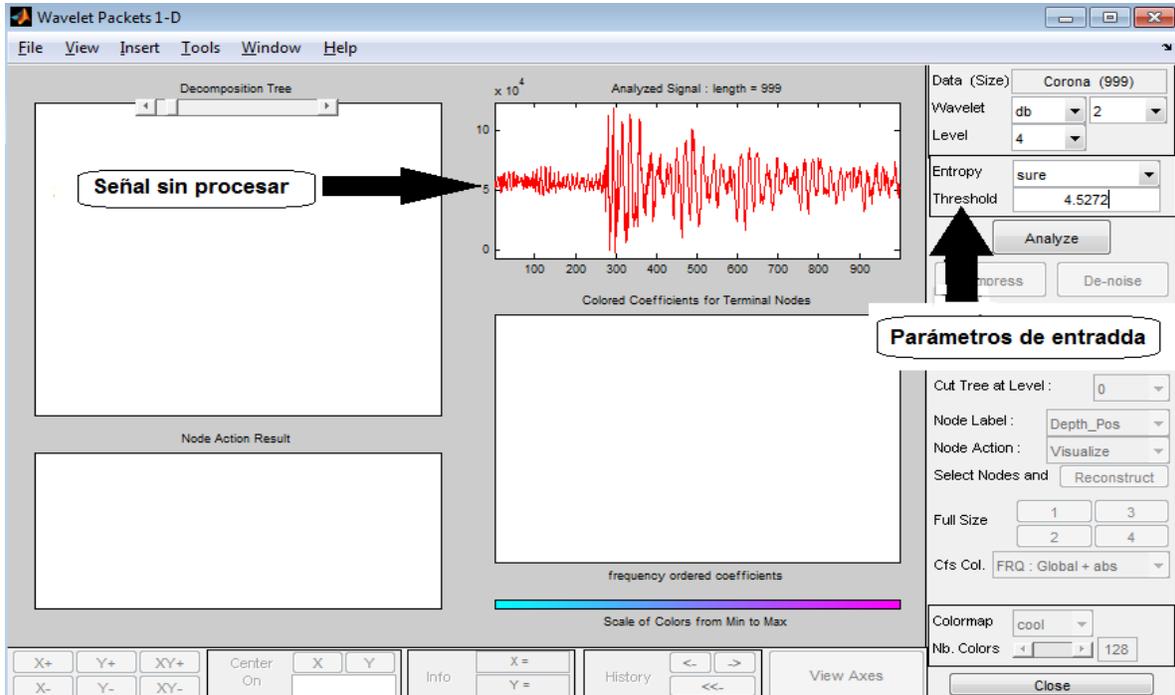


Figura No. 24. Parámetros de entrada. Inicio del procesamiento primario.

Al seleccionar la opción de *best tree*, el cual es la mejor iteración para realizar los cálculos (Figura No. 25), se realiza un filtrado de la señal dando como resultado la señal original con la señal después del procesamiento primario, así como la escala de frecuencia de los coeficientes originales y los coeficientes considerando el umbral, como se muestra en la Figura No. 26.

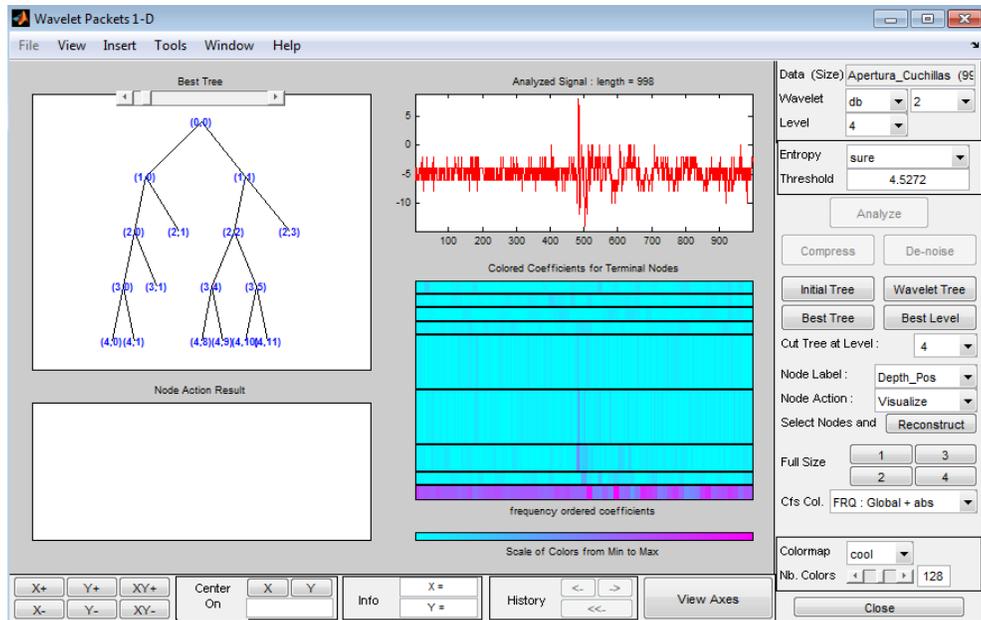


Figura No. 25. Best Tree y frecuencia de coeficientes de la señal

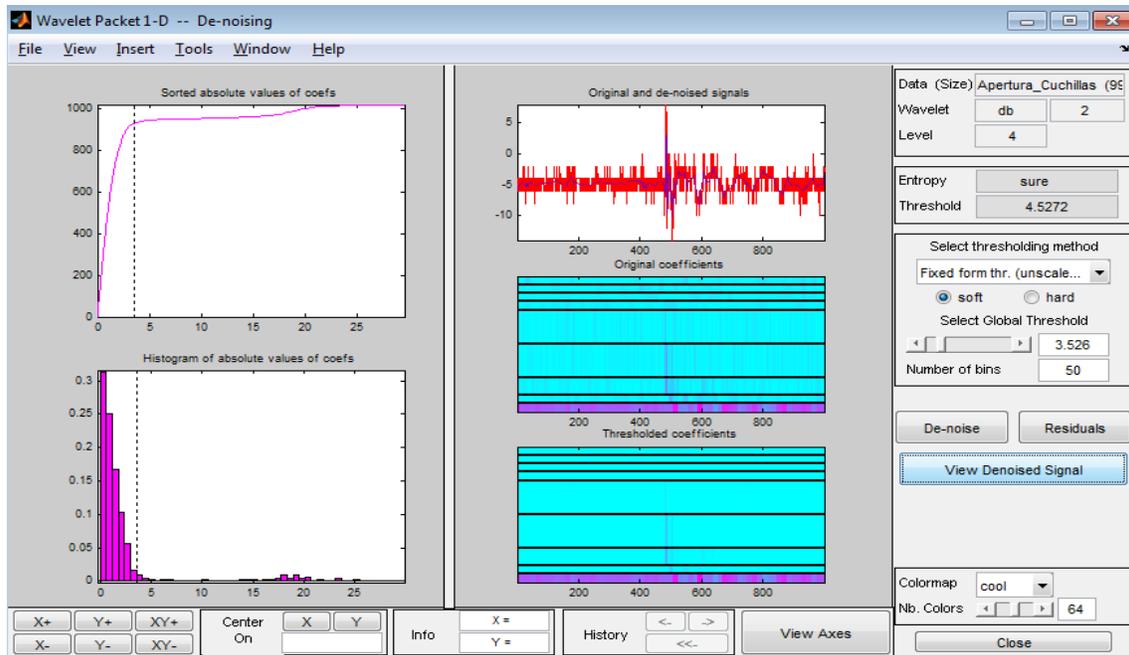


Figura No. 26. Señal procesada con sus valores absolutos de coeficientes.

En la siguiente Figura se observa el resultado del procesamiento primario.

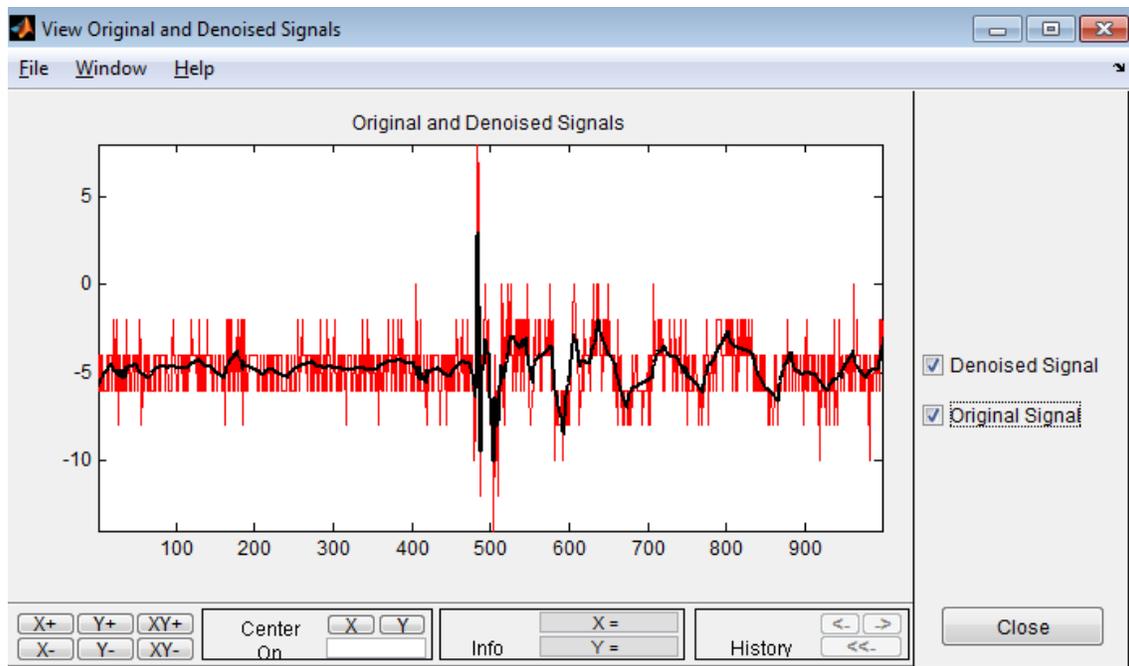


Figura No. 27. Señal original (en negro), y señal procesada (en rojo) fruto del procesamiento primario con el wave packet 1-D.

Dado que los coeficientes no pueden ser guardados por este método, es necesario realizar un procesamiento secundario. El objetivo de este procesamiento es realizar un banco de datos para identificar la fuente. El banco de datos es almacenado en el *Workspace* de Matlab, y se obtienen sus coeficientes de Fourier, como se muestra en la siguiente Figura.

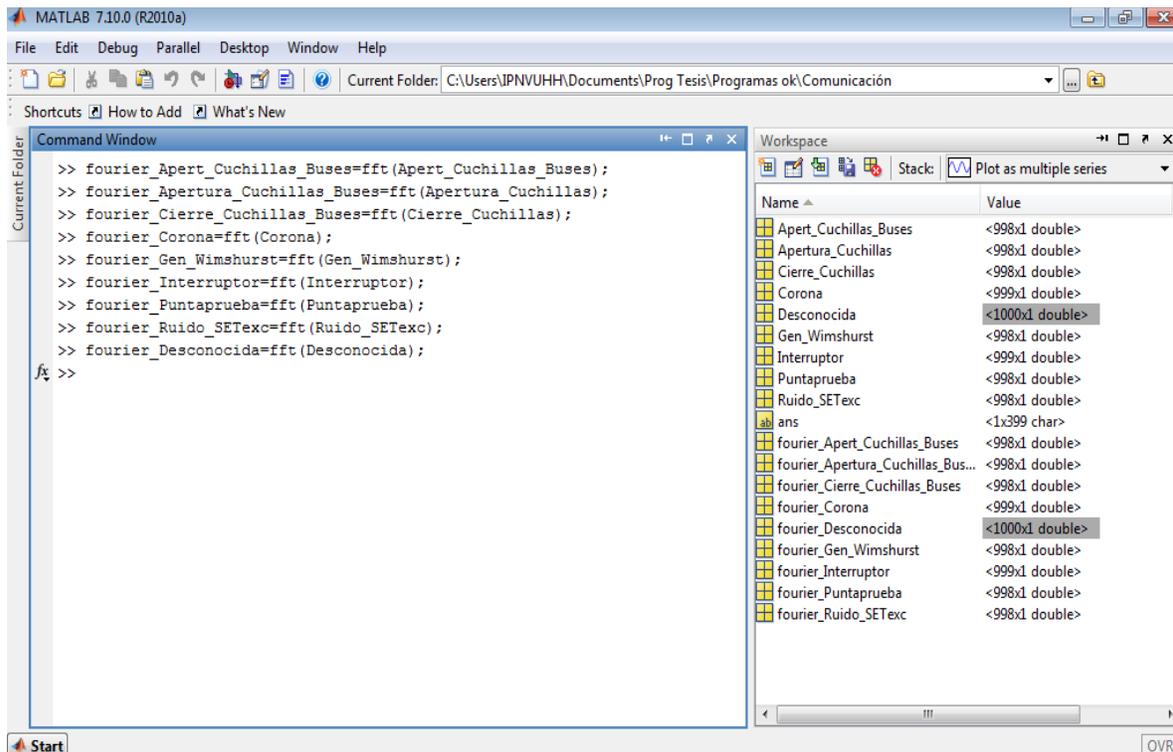


Figura No. 28. Obtención de coeficientes de Fourier de las señales en la base de datos y de la señal desconocida.

Se almacena la señal captada por la antena (que es denominada como señal Desconocida) al banco de datos, se obtienen sus coeficientes de Fourier y se ingresan al algoritmo para que se inicie la comparación. El programa automáticamente determinará la fuente a la que pertenece la señal por medio de una respuesta lógica [8], resultado de la sustracción de los coeficientes de Fourier de la señal desconocida menos los coeficientes de cada una de las señales de la base de datos, comparando los resultados y obteniendo el mínimo. Si el resultado es 0, significa que la señal no pertenece a ninguna señal; si es 1, es que la señal pertenece a una de las señales del banco de datos.

Los resultados de ejecutar el procesamiento secundario y de la comparación de la señal se muestran en la siguiente Figura, en la cual, la señal desconocida es catalogada como una señal de Apertura de Cuchillas.

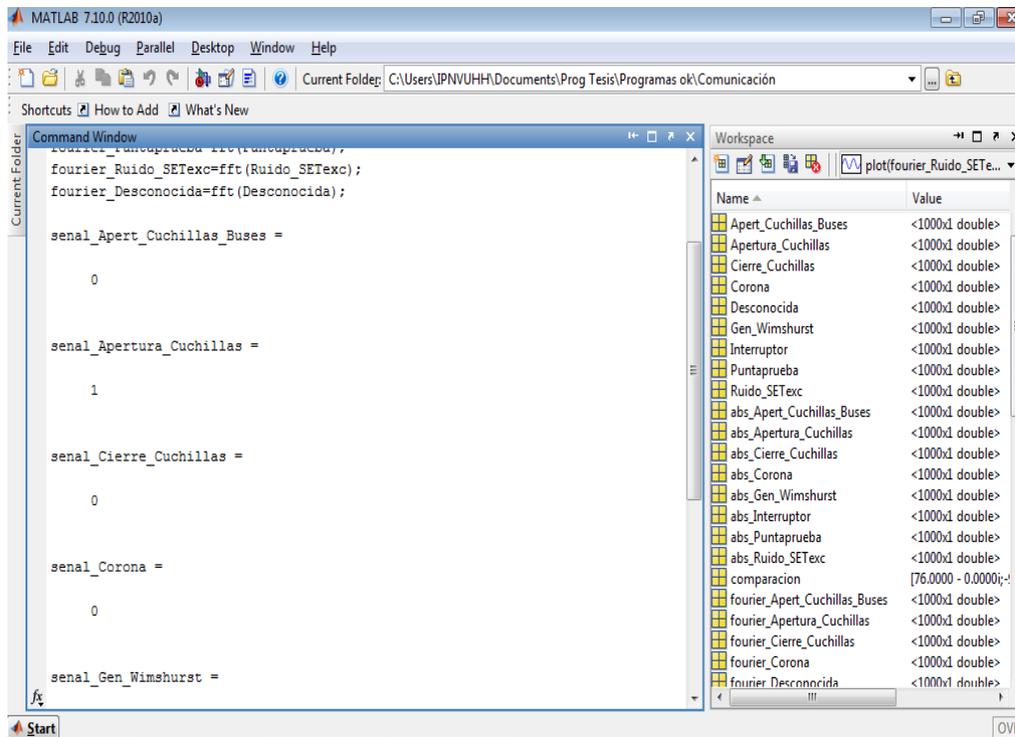
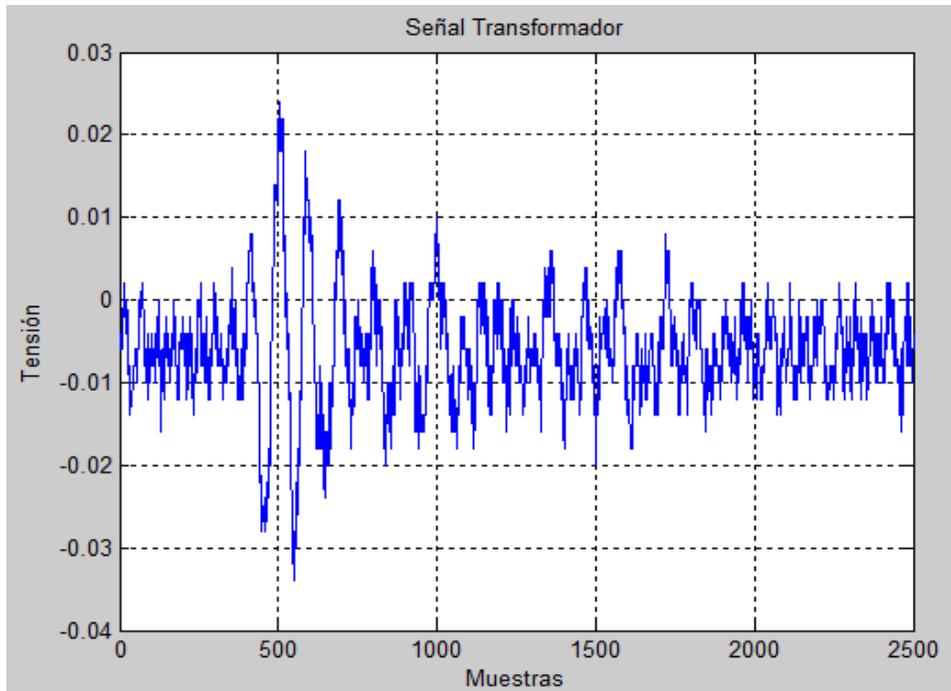
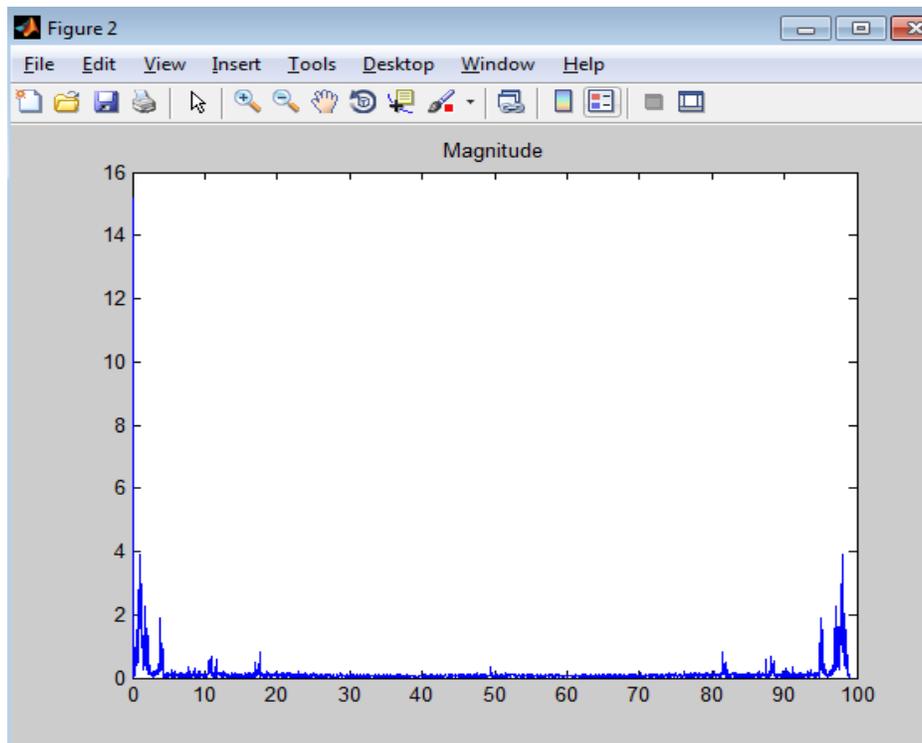


Figura No. 29. Determinación de la fuente por medio del procesamiento secundario.

Un ejemplo de obtención de Coeficientes de Fourier con el sistema anterior es el que se muestra en la siguiente Figura.



a)



b)

Figura No. 30. a) Señal de transformador pequeño. b) Coeficiente de Fourier de la señal de transformador [7].

La mayor ventaja de utilizar la Transformada de Fourier en análisis de imágenes y señales radica en que obedece el Teorema de Convolución, lo cual lo hace más atractivo, pero para señales Transitorias o de pulsos, al momento de pasar la señal al dominio de frecuencias, parte de la información desaparece, ya que la Transformada de Fourier es una gran herramienta para señales periódicas, no transitorias, como lo son las huellas electromagnéticas patrón de los equipos e instalaciones de potencia. [48].

Es en este punto donde entra el análisis de tiempo y de energía que, computacionalmente hablando, se encuentran inmersos en el paquete *wavelet* de Matlab, en el cual se encuentra la Transformada de *Walsh Hadamard*, la cual se utilizó para realizar los análisis de las señales y de la que voy a hablar más adelante.

Con la nueva metodología, como se organizan y guardan los datos en una hoja de Excel, es más fácil tener acceso a dichos datos por medio del comando *xlsread*, el cual accede a la hoja de Excel y detecta tanto datos numéricos como de escritura. Así se facilita el análisis, se disminuye el tiempo de procesamiento y se evita el utilizar otro software externo.

Otra ventaja que se tiene con el sistema desarrollado en esta tesis con respecto a los otros métodos mencionados en el capítulo anterior, es el guardado de las imágenes que se presentan en la pantalla del osciloscopio. Se pueden abrir dichas imágenes, como la mostrada en la Figura No. 31, por medio del comando *hgload*. Con este comando se abre la imagen que nos permitirá analizar el inicio de la señal y así determinar el tiempo de inicio.

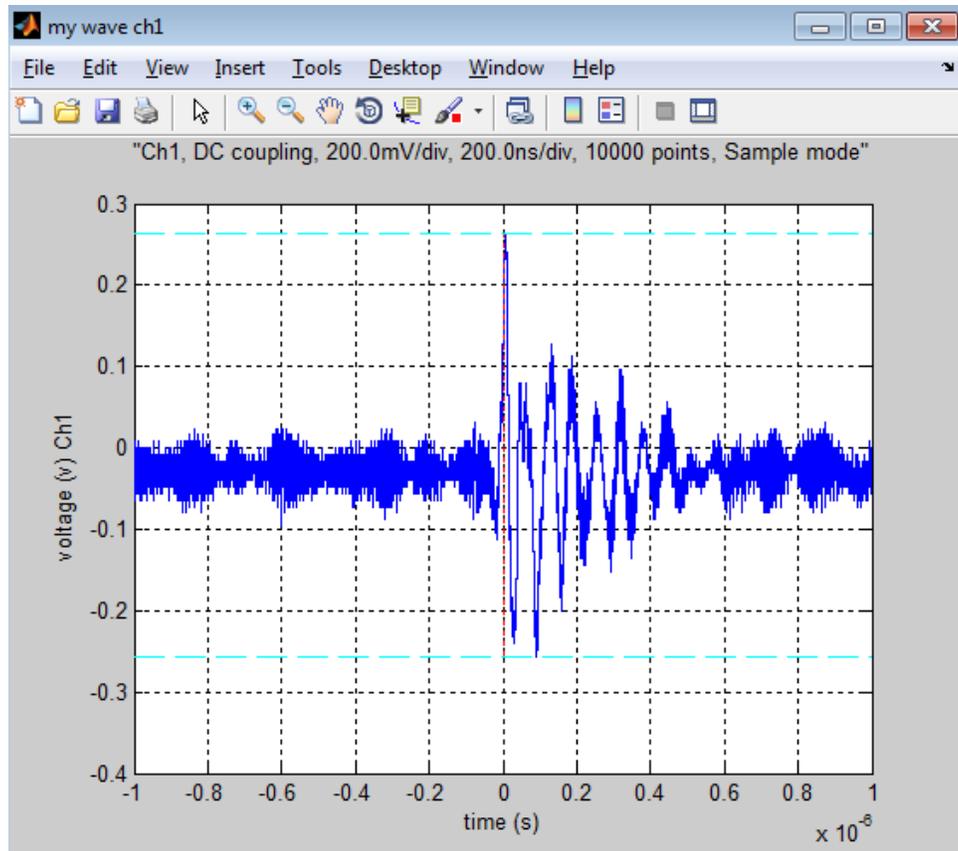


Figura No. 31. Lectura de una señal con sus características.

Al abrir las cuatro imágenes, correspondientes a las señales captadas por las cuatro antenas del osciloscopio, se adquieren los tiempos de arribo por canal de la señal. Como se observa en la siguiente Figura, al analizar la señal es posible obtener el punto en el tiempo en el que inicia la descarga.

```
ch1=hgload('C:\Users\IPNVUHH\Dropbox\Señales\apertcierrecuchillas4
00fB\wfmgraph1.fig');
ch2=hgload('C:\Users\IPNVUHH\Dropbox\Señales\apertcierrecuchillas4
00fB\wfmgraph2.fig');
ch3=hgload('C:\Users\IPNVUHH\Dropbox\Señales\apertcierrecuchillas4
00fB\wfmgraph3.fig');
ch4=hgload('C:\Users\IPNVUHH\Dropbox\Señales\apertcierrecuchillas4
00fB\wfmgraph4.fig');
[Channel1]=xlsread(path,'Hoja1','A2:A9990');
```

```
[a,text1]=xlsread(path,'Hoja1','I2:I2');
[Channel1]=xlsread(path,'Hoja1','A2:A9990');
[a,text1]=xlsread(path,'Hoja1','I2:I2');
```

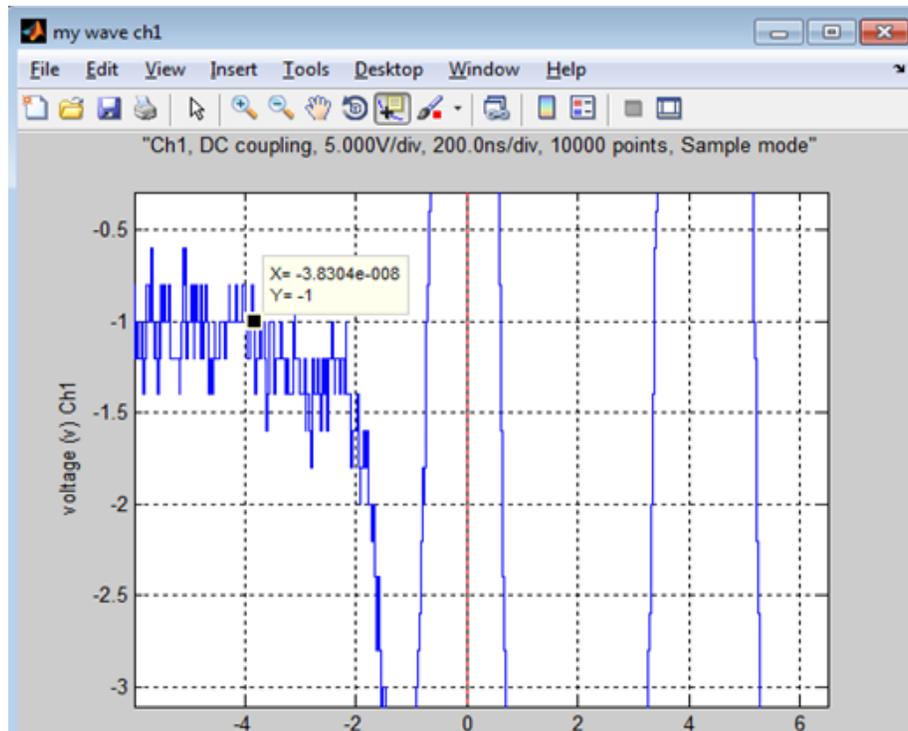


Figura No. 32. Análisis de la señal mostrada en la Figura No. 31 para adquirir el tiempo de arribo, el cual está representado por la variable x mostrada en la imagen.

Para el programa es importante la localización física de las antenas, es por ello que se deben colocar de acuerdo a un cuadrante de coordenadas que uno mismo propone alrededor del equipo a sensor o, en su defecto, en un lugar de la subestación que nos permita captar las señales. Dicha coordenadas pueden darse de alta de dos maneras, manteniendo fijas las distancias o, si se va a estar cambiando de posición las antenas, al momento de correr el programa, se pedirán las coordenadas.

Como se tiene una posición diferente de cada antena, la señal llega a tiempos diferentes a cada una, lo que se conoce como tiempo de retardo o tiempo de arribo. Entonces, podemos definir el tiempo de arribo como el tiempo que tarda la onda electromagnética en recorrer la distancia entre la fuente que la origina hasta la antena.

Al tener el tiempo de arribo de los cuatro canales, es posible calcular el tiempo de arribo relativo. El tiempo de arribo relativo, aunado con las coordenadas de las antenas, se utiliza para realizar la localización de la fuente de la descarga parcial, como se explica en el punto 3.4. Para obtener el tiempo relativo, se organizan los tiempos de arribo de acuerdo al primer canal que detecta la señal hasta el último, realizando, por ejemplo para el primer y segundo tiempo de arribo, la siguiente operación.

$$t_{01}=t_1-t_0$$

donde:

t_0 es el primer tiempo de arribo de la señal, es decir, el tiempo captado por la antena más cercana a la fuente.

t_1 es el segundo tiempo relativo por la antena.

t_{01} es el tiempo de arribo relativo.

Con estos datos, y considerando que la velocidad de propagación de la onda electromagnética es de 3×10^8 m/s, se procede a realizar el cálculo de localización. Lo primero que se realiza es proponer un tiempo arbitrario para que el programa realice las iteraciones de cálculo. Este tiempo arbitrario es el doble del tiempo de arribo relativo t_{01} .

En lo que respecta a la obtención de los coeficientes de las señales para su reconstrucción, se utiliza la transformada rápida *Walsh Hadamard*, la cual corresponde al procesamiento primario de la señal en el programa anterior. Como se ha mencionado, antes se realizaban dos procesamientos denominados procesamiento primario, en los cuales se reconstruía la señal y se guardaba y que se realiza por medio del paquete *wave packet 1-D* del *wavemenu toolbox* de Matlab®.

Dicho paquete utiliza la transformada rápida *Walsh Hadamard* (WHT) y su inversa para calcular los coeficientes de las señales y eliminar el ruido de fondo en ella. La problemática con solo utilizar de esta manera el *wavemenu*, radica en que no es posible guardar los coeficientes utilizados para la reconstrucción de la señal.

Por esta razón se realizó el procesamiento secundario que utiliza la transformada rápida de Fourier (FFT) y su inversa para guardar los coeficientes y realizar una comparación de coeficientes con señales almacenadas y una nueva señal captada.

La transformada de Hadamard está íntimamente relacionada con la transformada de Walsh, hasta tal punto que en muchas ocasiones encontramos un único tratamiento para ambas, al que se hace referencia como transformada *Walsh-Hadamard* (WHT). Sus propiedades más importantes son [49]:

- a) Es real, simétrica y ortogonal.
- b) Es una transformada rápida. Ya que la transformada contiene únicamente valores +/-, por lo que no se requieren multiplicaciones para su cálculo. De esta forma, el número de sumas y restas necesario puede reducirse desde N^2 hasta aproximadamente $N \log_2 N$.
- c) Posee una buena compactación de energía para imágenes o señales altamente correlacionadas

Otra ventaja que presenta la implementación de la transformada *Walsh Hadamard*, es su arquitectura flexible al crear un programa [49]. Además, sus opciones algorítmicas internas de iteración son representadas en formas de árboles, como se observa en la Figura No. 33, y similarmente a la estructura de datos de la Transformada Rápida de Fourier, lo que en el *wave packet* de Matlab se traduce como el *best tree*, que en realidad es la mejor iteración para el cálculo de exponentes [51, 52].

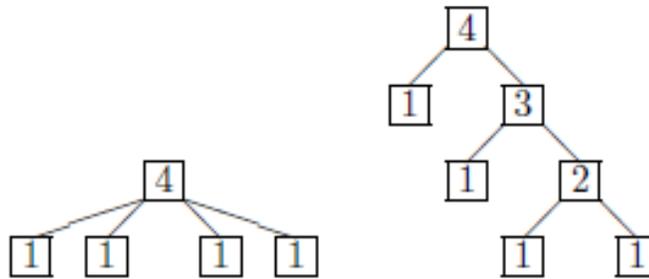


Figura No. 33. Representación de *Best Tree iteration* de la transformada *Walsh Hadamard*.

La transformada de *Walsh-Hadamard* se utiliza en un sin número de aplicaciones, tales como procesamiento de imágenes, el procesamiento del habla, el filtrado, procesamiento de señales y el análisis de espectro de potencia. Es muy útil para reducir los requisitos de ancho de banda de almacenamiento y análisis de espectros.

Así mismo, esta herramienta se utiliza para el análisis de filtros, en el diseño de semiconductores, en análisis de señales biológico – médicas como el encefalograma, analizadores de voz y, recientemente, en aplicaciones de ondas electromagnéticas provenientes del espacio.

Al igual que la FFT, la transformada de *Walsh-Hadamard* (WHT) tiene una versión rápida, la Transformada Rápida de *Walsh-Hadamard* (FWHT). En comparación con la FFT, la FWHT requiere menos espacio de almacenamiento y es más rápido para el cálculo, ya que utiliza sólo las adiciones y sustracciones reales, mientras que la FFT requiere valores complejos [53].

La FWHT es capaz de representar las señales con discontinuidades fuertes con mayor precisión utilizando un menor número de coeficientes que la FFT. Tanto la FWHT y la FWHT inversa (IFWHT) son simétricas y, por tanto, utilizan procesos de cálculo idénticos.

Dada su versatilidad, esta transformada es utilizada para la eliminación de ruido tanto en imágenes con ruido Gaussiano [49, 50], como para señales con ruido por el efecto *multipath*. Así, se pueden guardar los coeficientes encontrados para realizar el cálculo al tiempo de que se reconstruye la señal, eliminándole el ruido de fondo, tal como se muestra en la siguiente Figura.

En comparación con otras transformadas, la WHT intenta aproximar la señal como un todo, con una estructura uniformemente distribuida. Esto pasa porque Walsh no considera el cero, todos sus valores son +1 y -1 y así, es fácilmente implementada en sistemas computacionales como sus correspondientes valores binarios lógicos [54].

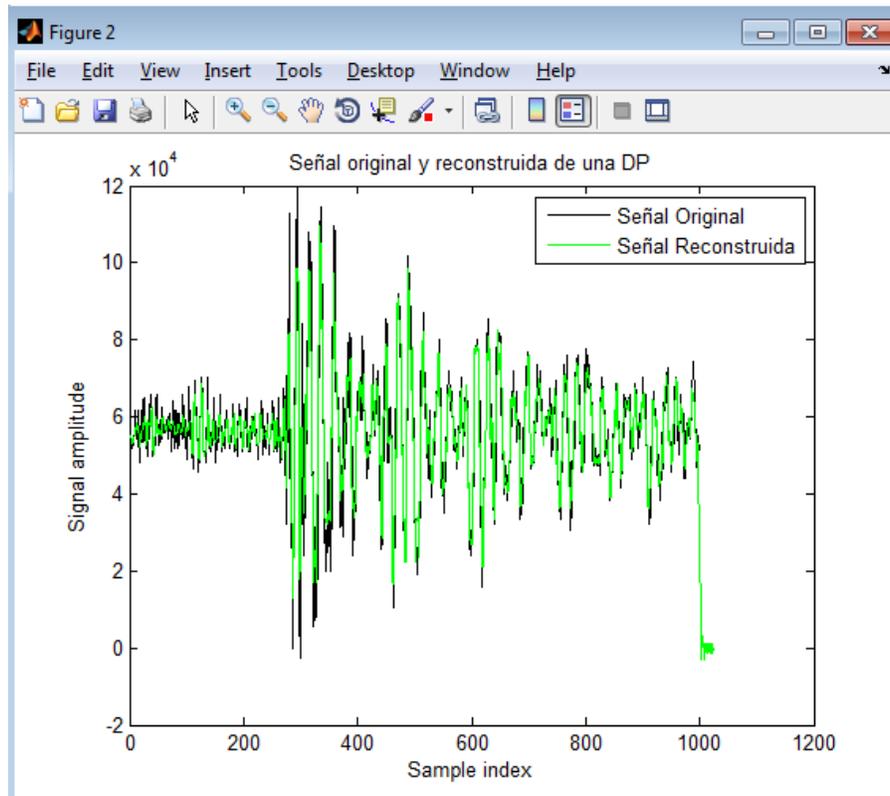


Figura No. 34. Señal original y reconstruida de una Descarga Parcial captada en la Subestación Texcoco utilizando la transformada Walsh-Hadamard.

Si comparamos la Figura No. 27 con la figura anterior, se puede observar que todo el procesamiento primario se realiza en un solo paso sin necesidad de estar metiendo los datos manualmente y guardando, ahora sí, los coeficientes obtenidos para la señal, algo que no se podía hacer con el sistema anterior.

Para ahorrar tiempos computacionales al momento de correr el programa, evitamos el ploteo de las señales con sus coeficientes y su reconstrucción. Nos limitamos a guardar los coeficientes para realizar la clasificación de la señal desconocida.

La comparación entre una señal nueva y una que ya se encuentra almacenada se realiza una vez que se tienen los coeficientes. Para hacerlo, se realizó un programa en MATLAB cuyo código es el siguiente:

```
clc; clear all; close all;

path='C:\Users\IPNVUHH\Documents\Prog Tesis\Suebstación
Texcoco\Datos Subestación Texcoco\desc1.xlsx';
[Desconocida]=xlsread(path, 'Hojal', 'E1:E1000');

load ('C:\Users\IPNVUHH\Documents\Prog Tesis\Programas ok\Base de
datos\Apertura cuchillas\Apertura_Cuchillas');

load ('C:\Users\IPNVUHH\Documents\Prog Tesis\Programas ok\Base de
datos\Apertura cuchillas\Apert_Cuchillas_Buses');

load('C:\Users\IPNVUHH\Documents\Prog Tesis\Programas ok\Base de
datos\Cierre Cuchillas\Cierre_Cuchillas');

load('C:\Users\IPNVUHH\Documents\Prog Tesis\Programas ok\Base de
datos\Corona\Corona');

load('C:\Users\IPNVUHH\Documents\Prog Tesis\Programas ok\Base de
datos\Gen_Wimshurst\Gen_Wimshurst');

load('C:\Users\IPNVUHH\Documents\Prog Tesis\Programas ok\Base de
datos\Interrupcion\Interrupcion');

load('C:\Users\IPNVUHH\Documents\Prog Tesis\Programas ok\Base de
datos\Puntaprueba\Puntaprueba');

load('C:\Users\IPNVUHH\Documents\Prog Tesis\Programas ok\Base de
datos\Ruido SE\Ruido_SETexc');
```

```
load('C:\Users\IPNVUHH\Documents\Prog Tesis\Programas ok\Base de
datos\Desconocida');
```

```
% Fast Walsh Hadamard Transform
```

```
fd=fwht(Desconocida);
fc=fwht(Corona);
fp=fwht(Puntaprueba);
fac=fwht(Apertura_Cuchillas);
facb=fwht(Apert_Cuchillas_Buses);
fcc=fwht(Cierre_Cuchillas);
frse=fwht(Ruido_SETexc);
fi=fwht(Interruptor);
fgw=fwht(Gen_Wimshurst);
```

```
% Resta de coeficientes
```

```
Cor=fc-fd;
Pprueba=fp-fd;
ACuchillas=fac-fd;
ACuchillasb=facb-fd;
CCuchillas=fcc-fd;
RSETexc=frse-fd;
Int=fi-fd;
Gen_Wim=fgw-fd;
```

```
% Inverse Fast Walsh Hadamard Transform
```

```
ifc=ifwht(Cor);
ifp=ifwht(Pprueba);
ifac=ifwht(ACuchillas);
ifacb=ifwht(ACuchillasb);
ifcc=ifwht(CCuchillas);
ifrse=ifwht(RSETexc);
ifi=ifwht(Int);
ifgw=ifwht(Gen_Wim);
```

```
% Absolutos
```

```
aCor=abs(ifc);
aPprueba=abs(ifp);
aACuchillas=abs(ifac);
aACuchillasb=abs(ifacb);
aCCuchillas=abs(ifcc);
aRSETexc=abs(ifrse);
aInt=abs(ifi);
aGen_Wim=abs(ifgw);
```

```
% Promedios
```

```
pCor=mean(aCor);
pPprueba=mean(aPprueba);
pACuchillas=mean(aACuchillas);
pACuchillasb=mean(aACuchillasb);
pCCuchillas=mean(aCCuchillas);
```

```

pRSETexc=mean(aRSETexc);
pInt=mean(aInt);
pGen_Wim=mean(aGen_Wim);

% Comparación
comparacion=[pCor;pPprueba;pACuchillas;pACuchillasb;pCCuchillas;pR
SETexc;pInt;pGen_Wim];

senal=min(comparacion);

if senal==pCor
    senal_Corona=senal;
    disp('La señal desconocida pertenece a una Señal Corona');

elseif senal==pACuchillas
    senal_Apertura_Cuchillas=senal;
    disp('La señal desconocida pertenece a una Señal de Apertura
de Cuchillas');

elseif senal==pACuchillasb
    senal_Apertura_Cuchillas_Buses=senal;
    disp('La señal desconocida pertenece a una Señal de Apertura
de Cuchillas');

elseif senal==pCCuchillas
    senal_Cierre_Cuchillas=senal;
    disp('La señal desconocida pertenece a una Señal de Cierre de
Cuchillas');

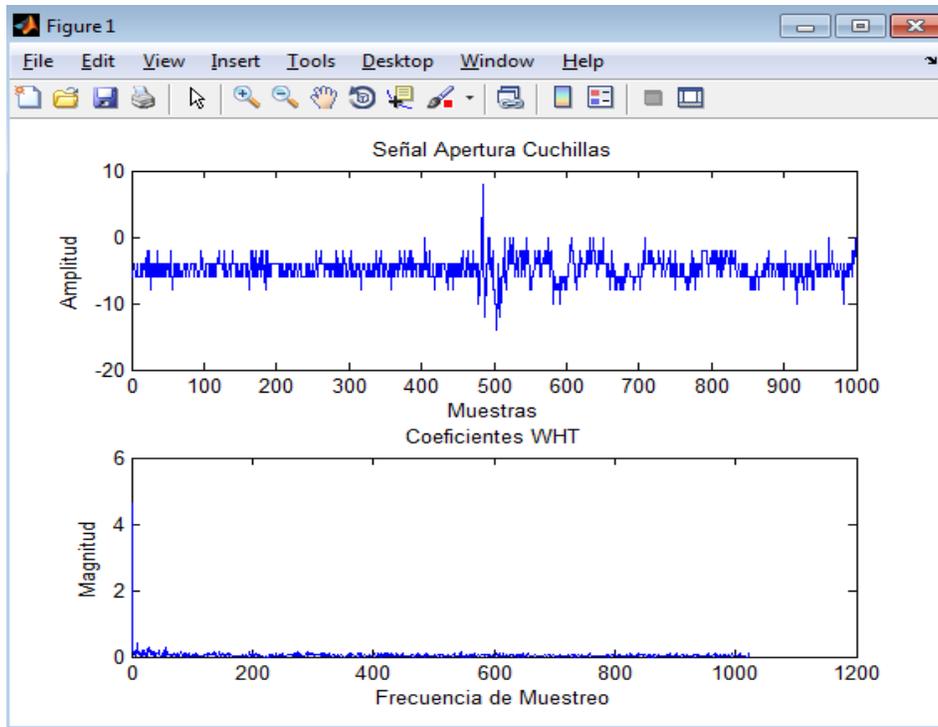
elseif senal==pRSETexc
    senal_Ruido_SETexc=senal;
    disp('La señal desconocida pertenece a una Señal de ruido de
fondo de la Subestación Texcoco del lado de 200 Kv');

elseif senal==pInt
    senal_Interruptor=senal;
    disp('La señal desconocida pertenece a una Señal de
Interruptor de 200 Kv');

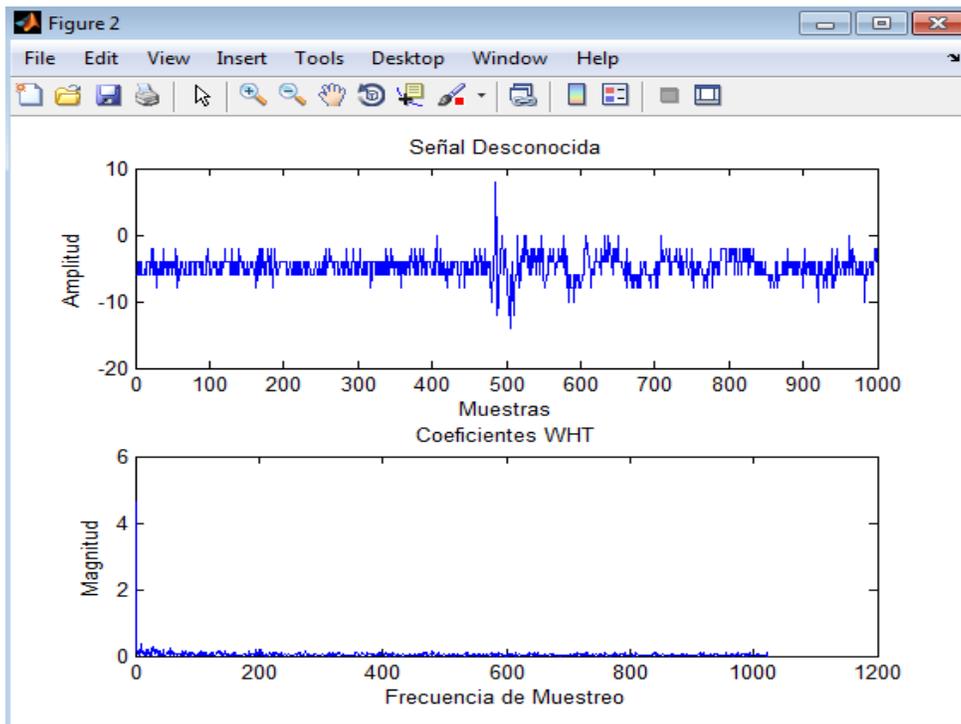
elseif senal==pGen_Wim
    senal_Generador_Wimshurst=senal;
    disp('La señal desconocida pertenece a una Señal de un
Generador Wimshurst');
else
end

```

A continuación se muestra un ejemplo de obtención de coeficientes para una señal de Apertura de Cuchillas y otra señal desconocida. Con los coeficientes que se obtienen por la FWHT, se realiza su clasificación que se muestra más adelante.



a)



b)

Figura No 35. a) Muestra una señal guardada en la base de datos perteneciente a una maniobra de Apertura de Cuchillas captada en la SE Texcoco con sus coeficientes obtenidos por WHT, b) Muestra la señal Desconocida con sus coeficientes obtenidos por medio de la WHT.

Al tener los coeficientes se realiza la comparación entre los promedios de las señales guardadas en la base de datos y la señal desconocida captada y guardada por el sistema, el programa automáticamente determinará la fuente a la que pertenece. Este paso del programa se realiza con la siguiente línea de comandos.

```
senal=min(comparacion);
if senal==pCor
    senal_Corona=senal;
    disp('La señal desconocida pertenece a una Señal Corona')

elseif senal==pACuchillas
    senal_Apertura_Cuchillas=senal;
    disp('La señal desconocida pertenece a una Señal de Apertura
de Cuchillas')

elseif senal==pACuchillasb
    senal_Apertura_Cuchillas_Buses=senal;
    disp('La señal desconocida pertenece a una Señal de Apertura
de Cuchillas')

elseif senal==pCCuchillas

    senal_Cierre_Cuchillas=senal;
    disp('La señal desconocida pertenece a una Señal de Cierre de
Cuchillas')

elseif senal==pRSETexc

    senal_Ruido_SETexc=senal;
    disp('La señal desconocida pertenece a una Señal de ruido de
fondo de la Subestación Texcoco del lado de 200 Kv');

elseif senal==pInt

    senal_Interruptor=senal;
    disp('La señal desconocida pertenece a una Señal de
Interruptor de 200 Kv')

elseif senal==pGen_Wim

    senal_Generador_Wimshurst=senal;
    disp('La señal desconocida pertenece a una Señal de un
Generador Wimshurst')
```

Si los coeficientes de la señal desconocida, una vez procesada, pertenecen o se encuentran dentro del rango de alguno de los coeficientes de las señales anteriormente guardadas en la base de datos, entonces esa señal desconocida pertenece a la señal que se muestra en la pantalla del Command Windows de Matlab.

Los resultados al ejecutar el programa muestran que la señal desconocida proviene de una maniobra de apertura de cuchillas, tal como se muestra en la siguiente Figura, resultado que concuerda con el obtenido por medio de la metodología anterior.

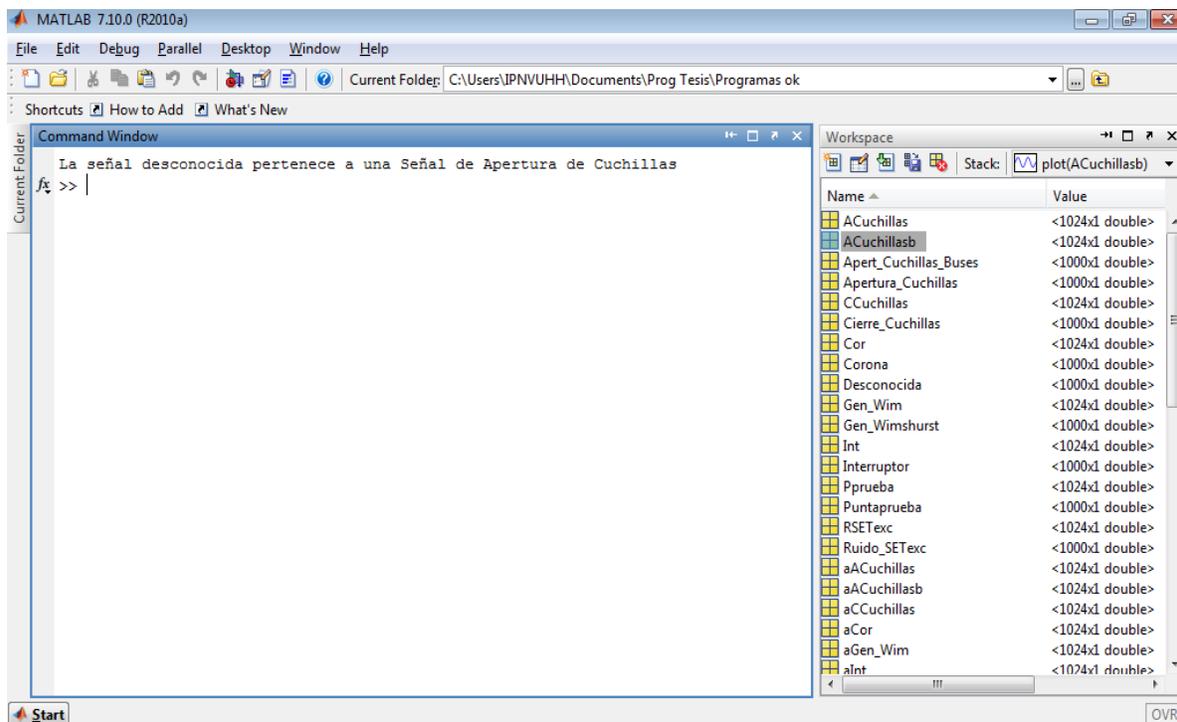
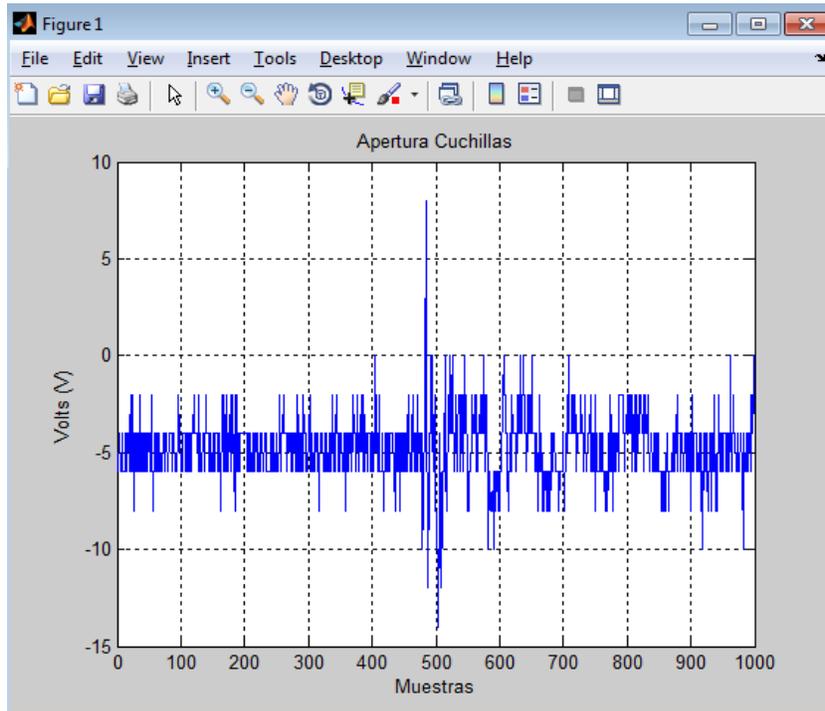


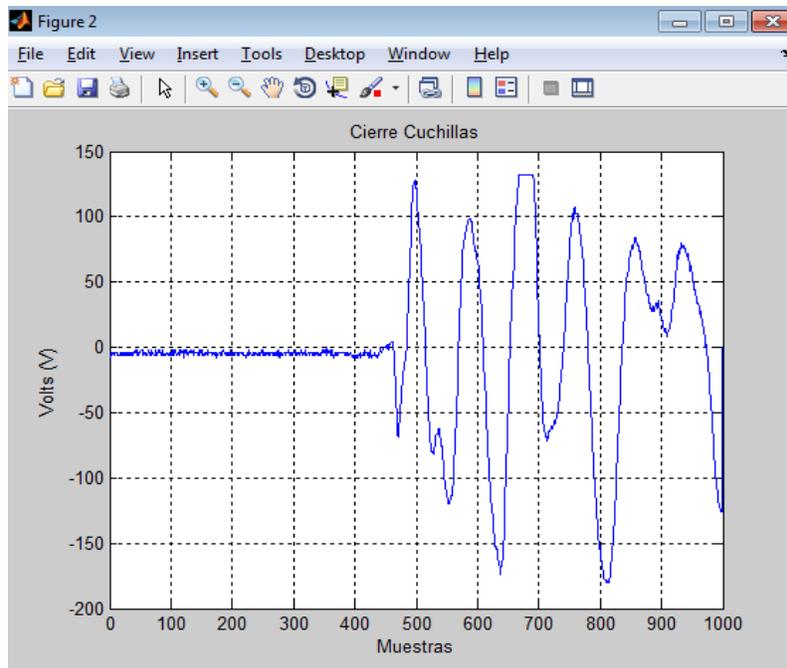
Figura No. 36. Determinación de la fuente de una señal desconocida.

Para probar que el sistema es eficaz en la determinación de pertenencia de una señal desconocida, se crea una nueva señal, que se denominó sdesc2, y es la suma de las señales de Cierre_Cuchillas y Apertura_Cuchillas, que se encuentran almacenadas en la base de datos, teniendo una tendencia mayor la señal de Cierre_Cuchillas.

En la Figura No. 37 a) se muestra la huella electromagnética de las cuchillas en operación de apertura y, en la 37 b), la huella electromagnética de las cuchillas en operación Cierre.



a)



b)

Figura No. 37. Señales utilizadas para crear la señal desconocida sdesc2. a) señal de apertura de cuchillas, b) cierre de cuchillas

En la siguiente Figura se observa el resultado de realizar el análisis con la metodología explicada en esta tesis y se muestran los coeficientes de la señal obtenidos con la FWHT.

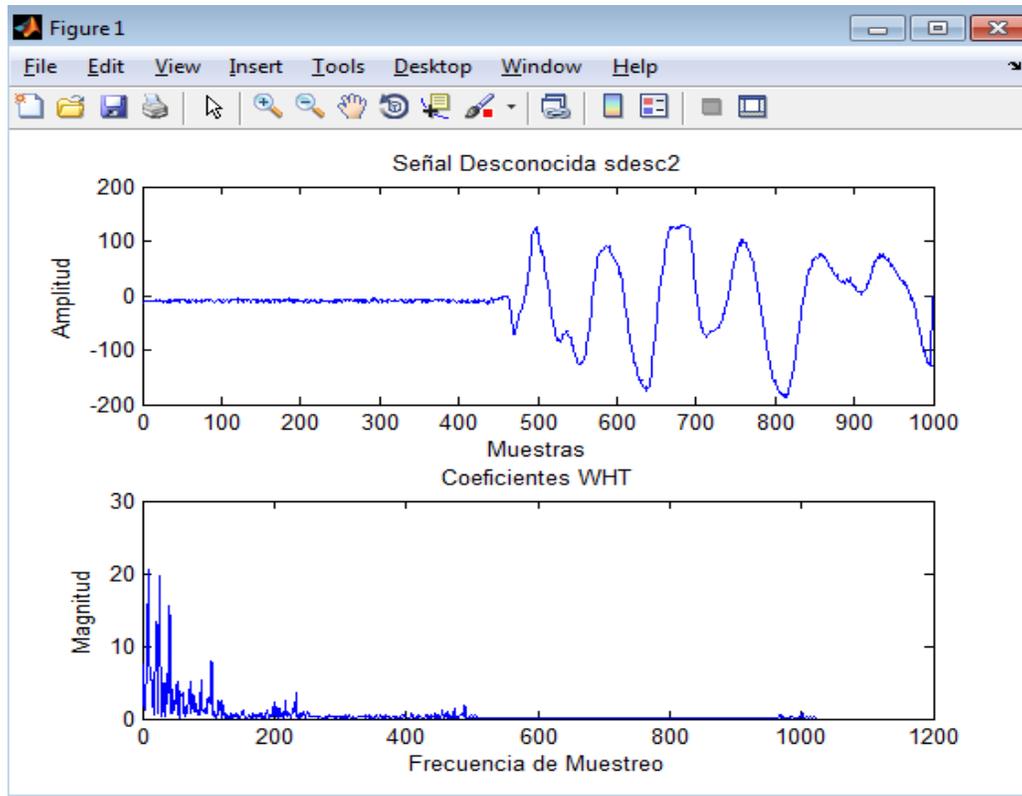


Figura No. 38. Obtención de los coeficientes de la señal mezclada sdesc2 por medio de la FWHT.

Al correr el programa de clasificación se obtiene, tal como se esperaba, que la señal se catalogada como perteneciente a una señal de Cierre de Cuchillas, como se observa en la siguiente Figura.

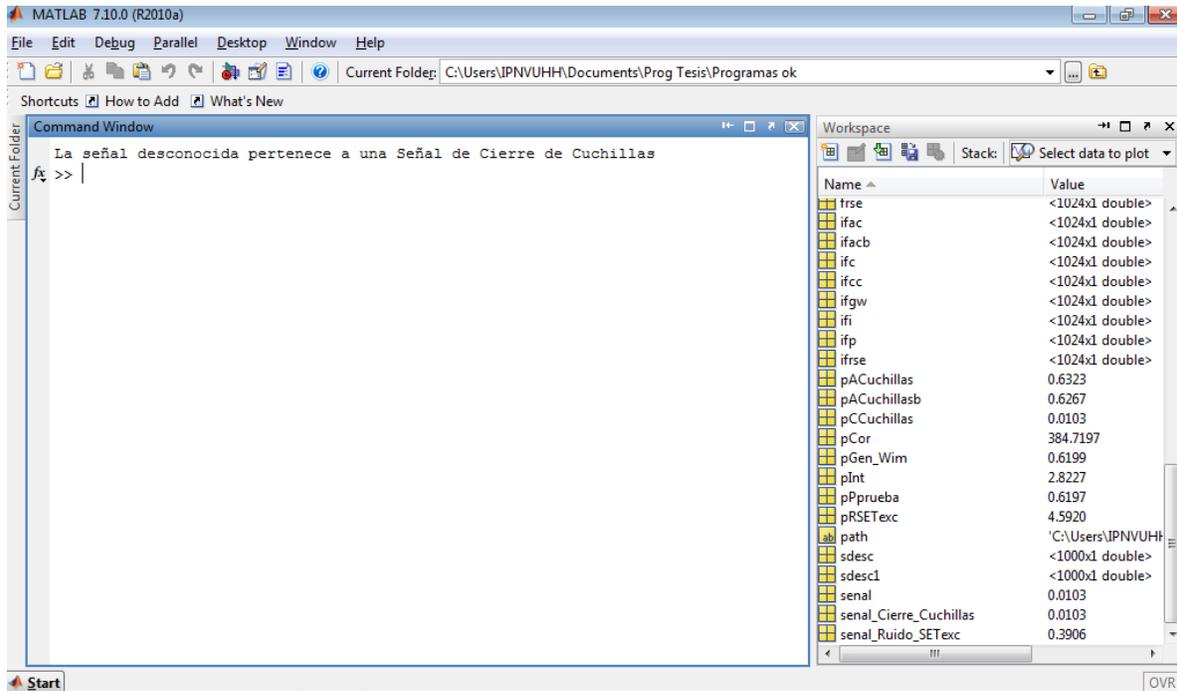


Figura No. 39. Clasificación de la señal sdesc2.

Ahora, si nuestro sistema funciona adecuadamente, al restarle a la señal desconocida sdesc2 la señal de Cierre_Cuchillas, debería darnos como resultado la Señal de Apertura_Cuchillas. En el *Command Window* desarrollamos la operación para elaborar una nueva variable, la cual va a ser sometida al análisis en el programa de clasificación. Una vez generada la variable, se guarda para poderla llamar. Este proceso se muestra en la siguiente Figura.

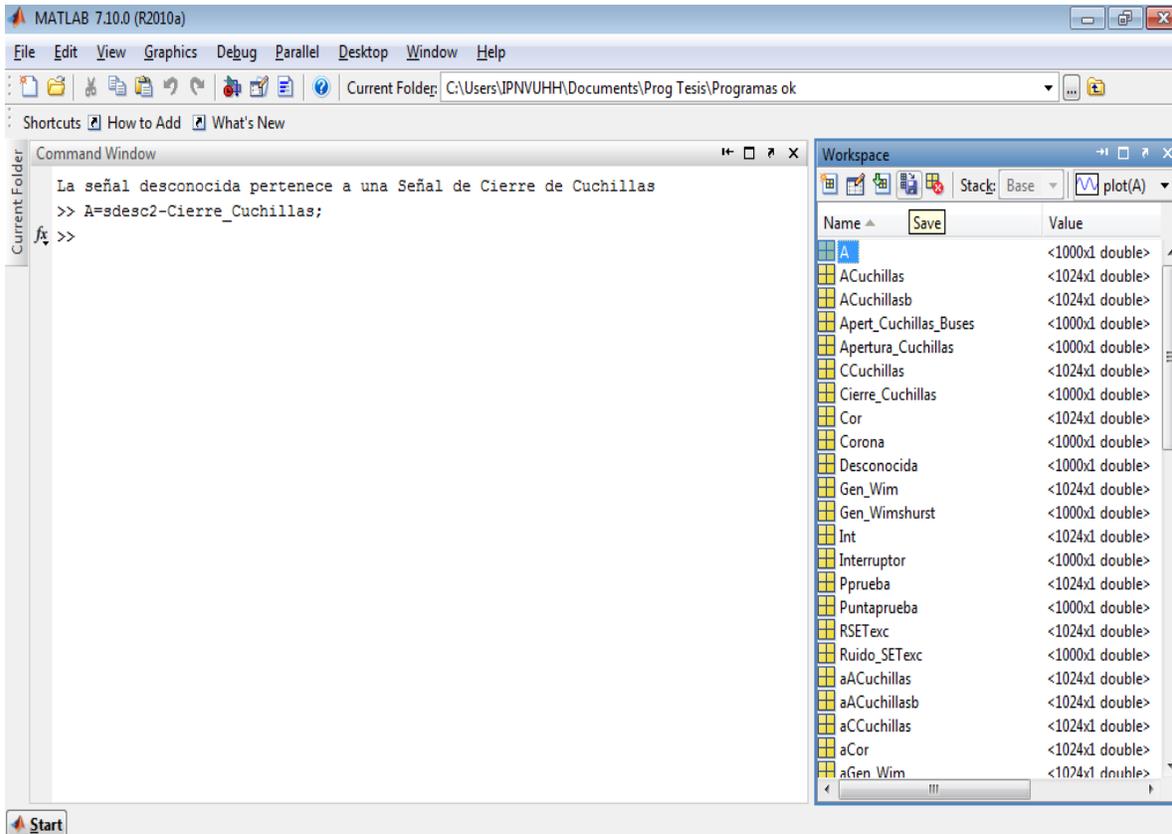


Figura No. 40. Desarrollo y guardado de una nueva variable para poner a prueba la eficacia del programa de clasificación.

En el programa, se manda llamar a la variable A con el comando:

```
load('C:\Users\IPNVUHH\Documents\Prog Tesis\Programas ok\Base de datos\A');
```

Y se da inicio al programa, dando como resultado que la señal A, tal como se esperaba, pertenece a una señal de Apertura de Cuchillas, como se muestra en la Figura No 41.

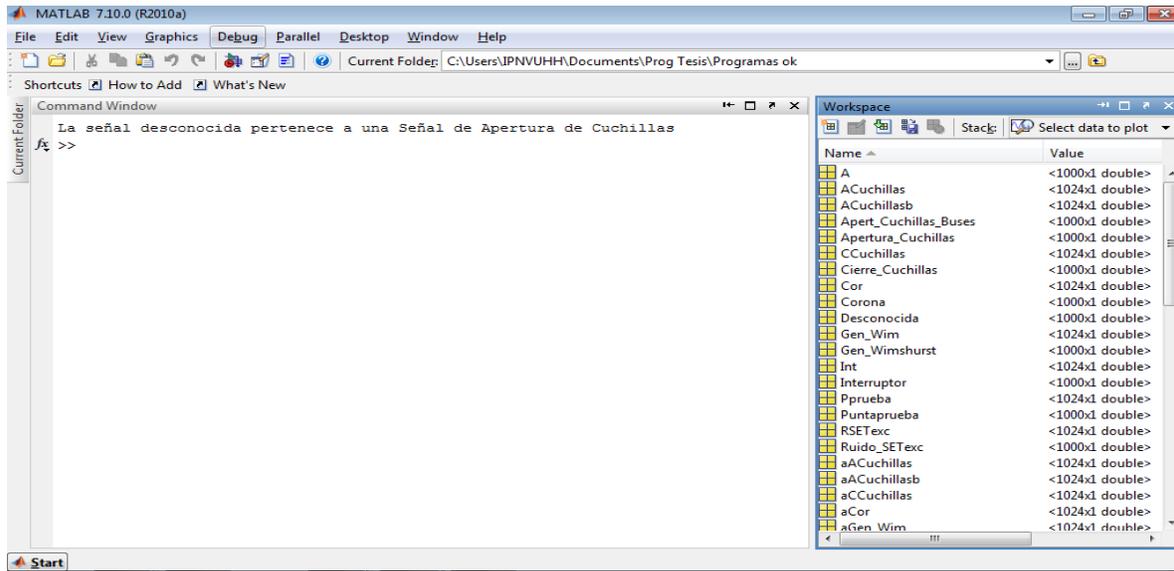


Figura No. 41. Resultado de la clasificación de la Señal guardada en la variable A.

En la metodología se tiene la opción de utilizar el sistema anterior o el nuevo, depende de la persona que lo utilice y de su visión de cual es más eficaz. Ambas transformadas trabajan con energía, Fourier integra la señal en un cierto tiempo, realizando cálculos complejos para obtener sus coeficientes y realizar el análisis frecuencial. Por su parte, la transformada Walsh Hadamard descompone la señal sobre una base de ondas rectangulares, de amplitudes +1 y -1, lo que la hace fácil de calcular e idónea para la representación de señales discontinuas.

En contrapartida con la FFT, que calcula los coeficientes de la señal para pasar del dominio del tiempo al dominio de frecuencia; la WHT no da información frecuencial directa, sino que éste se deduce del número de pasos (cruces) por cero por unidad de tiempo. Cuanta más alta es la frecuencia de la señal, mayor es el orden de la transformada de Walsh que interviene en su desarrollo en serie, lo que conlleva a un mayor número de transiciones o pasos por cero. Cuál utilizar dependerá del usuario, ambas transformadas son eficaces para el análisis de las señales [55].

3.4 Desarrollo de la localización de descargas parciales.

Una vez captadas las señales de las descargas parciales y de ser guardadas en la base de datos, el siguiente paso es su localización. Esta localización se basa en la adquisición conjunta de los datos captados por las antenas conectadas a los cuatro canales del osciloscopio.

Debido a que las ondas electromagnéticas se propagan por el medio a la velocidad de la luz, como lo describe Moore [36] es posible desarrollar un sistema de localización de descargas utilizando la técnica esférica [56], el cual se basa en la ecuación general de la esfera:

Con la cual se obtiene la posición de la fuente de emisión de la descarga parcial en 3D. Es por esta razón que se necesita un arreglo de 4 antenas colocadas entre sí equidistantemente, ya sea alrededor del equipo o instalación de potencia a monitorear, o en un punto específico de la subestación, la razón es que se necesita tener las señales con un tiempo de arribo.

Como se mencionó anteriormente, los tiempos de arribo se obtienen al analizar los espectros de la señal. Como las antenas están colocadas en diferentes coordenadas de acuerdo a un plano, la señal va a llegar a cada antena con una diferencia de tiempo, lo que nos permitirá calcular las coordenadas en las que se generó la descarga parcial.

Como se describe en la investigación anterior [8], el objeto de esta técnica es el de trazar esferas de radio igual a las trayectorias de propagación de las ondas desde el equipo que emite la descarga parcial hacia cada una de las antenas y realizar las intersecciones entre las cuatro diferentes esferas que se generan, el resultado de esa intersección será el valor de la coordenada real de la descarga parcial.

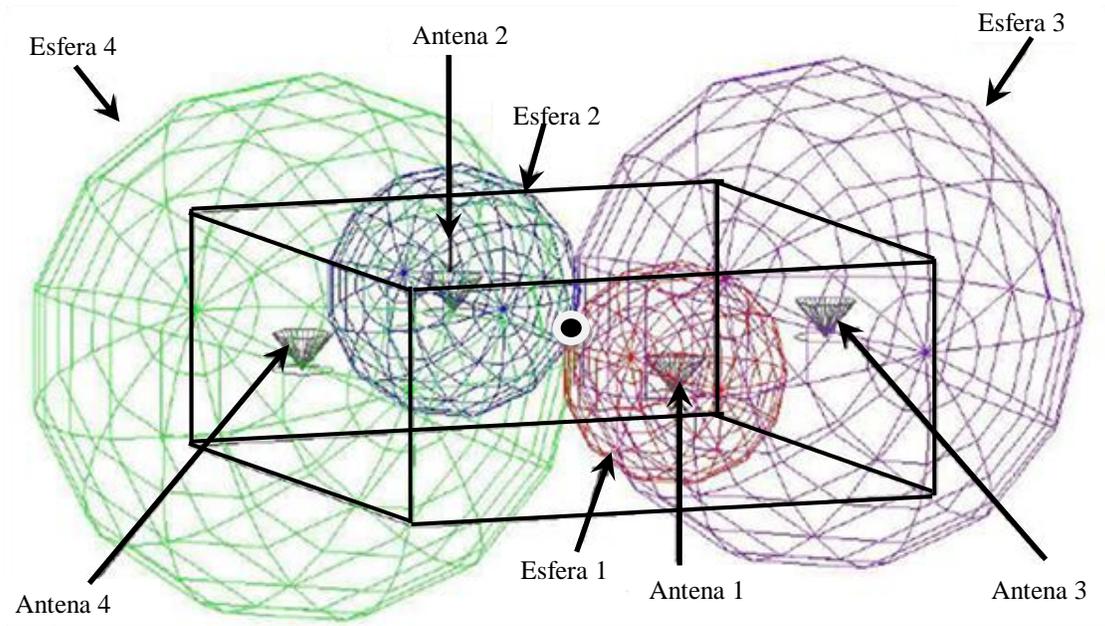


Figura No. 42. Representación gráfica de la localización por la técnica esférica [8].

Al presentarse la descarga parcial representada por la esfera rellena de color negro en el centro, las emisiones electromagnéticas generadas por la fuente se propagan por el aire [8]. Estas ondas son detectadas por las antenas conectadas al osciloscopio, el radio de cada esfera dependerá de la distancia a la que se encuentre cada antena con respecto al equipo en el cual se generó la descarga, representado por el cubo.

Dado que cada antena tiene su coordenada tridimensional, cada coordenada es guardada en el programa de localización. Para calcular las variables h , j y k de la ecuación de la esfera se emplea:

Donde (X_1, Y_1, Z_1) corresponden a la coordenada de la antena 1; (X_2, Y_2, Z_2) corresponden a la coordenada de la antena 2; (X_3, Y_3, Z_3) corresponden a la coordenada de la antena 3 y (X_4, Y_4, Z_4) corresponden a la coordenada de la antena 4.

Como se mencionó, al inspeccionar la señal la única parte importante, tal como lo realiza Moore [57] y Torres P. [8], es el inicio de la descarga donde podremos obtener el tiempo de arribo de la señal. Este tiempo será considerado como absoluto y se realizará un cálculo para obtener un tiempo relativo. En la siguiente Figura se muestra un ejemplo de tiempo de arribo de una señal en sus cuatro canales.

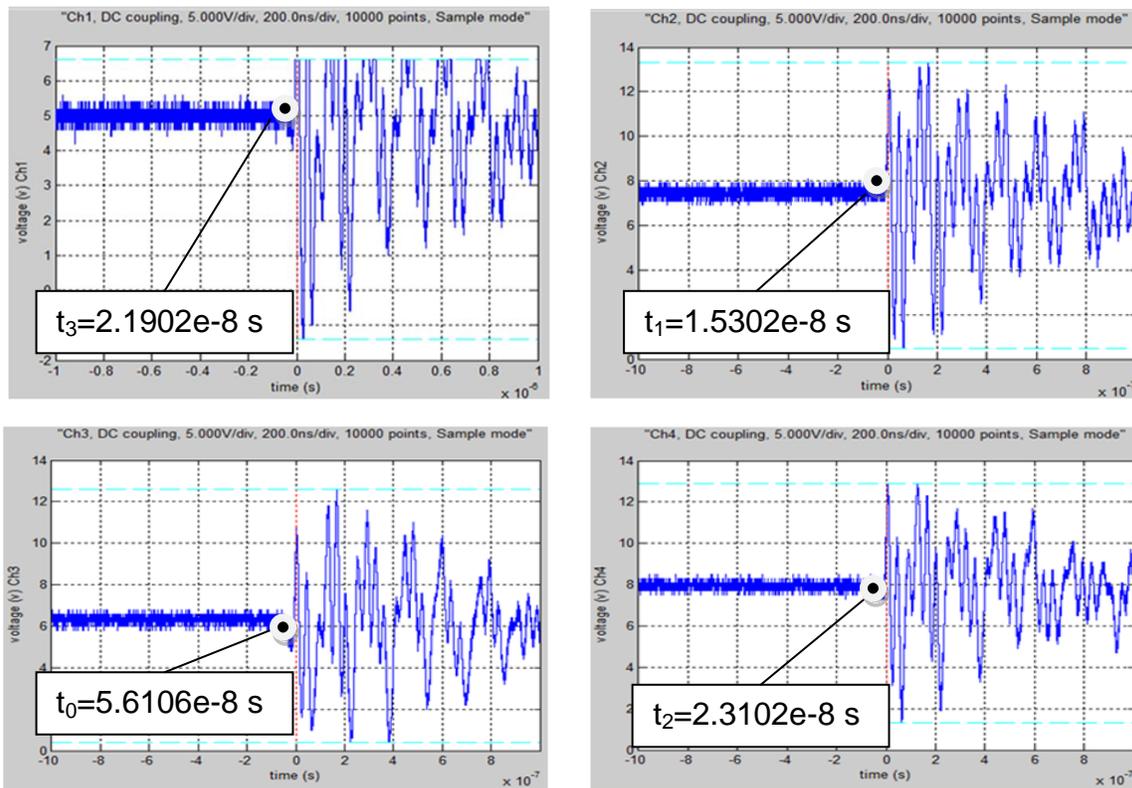


Figura No. 43. Representación de los tiempos de arribo por canal de una señal captada por las antenas.

Como se observa en la Figura, la primer antena que recibe la señal es la antena número 3, la segunda es la número 4, la tercera la número 1 y por último la número 2, lo que nos indica que las antenas 3 y 4 se encontraban más cerca de la emisión de descarga parcial.

Con los tiempos de arribo se obtienen los tiempos relativos, los cuales son la diferencia entre la señal que llega primero con respecto a las demás, así, tenemos tres tiempos de arribo que se denominan t_{01} , t_{02} y t_{03} , y su cálculo se realiza de la siguiente manera.

Para que el cálculo de las coordenadas de la descarga parcial sea eficiente, es necesario calcular un tiempo arbitrario para que a partir de éste valor, el programa de localización comience con sus iteraciones hasta dar con el valor real de la coordenada. Este tiempo arbitrario se obtiene utilizando la siguiente ecuación.

Es así como se establecen las ecuaciones generales de la técnica esférica para el acercamiento matemático de las coordenadas espaciales reales de la descarga parcial (h , k , j , T), donde h , k y j son las coordenadas espaciales de la descarga y, como se mencionó anteriormente, T es el tiempo real de arribo de la señal, considerando la velocidad de propagación de la onda electromagnética $v=3 \times 10^8$ m/s. El programa utilizado para la localización utilizado en esta metodología se muestra en el apéndice No. 4.

CAPÍTULO 4:

Trabajo de Campo.

4.1 Introducción.

Se realizaron pruebas del sistema en tres Subestaciones eléctricas, pertenecientes al anillo de alimentación principal de la Ciudad de México, en coordinación con la Comisión Federal de Electricidad: La SE Texcoco, la cual es una subestación reductora de 400 a 230 kV; y la SE Puebla II, también subestación reductora de 400/230/115 kV, y la Subestación Coyoacán, subestación reductora de 230 a 23 kV.

Los trabajos realizados en las subestaciones antes mencionadas, consistieron principalmente en la obtención de Huellas patrón y localización de la fuente de descarga parcial. Para ello se trabajó en conjunto con los técnicos de planta de las subestaciones para colocarnos en el lugar, respetando los lineamientos de seguridad.

Se realizaron análisis de las señales captadas por el sistema, obteniendo los tiempos de arribo de algunas señales. Así mismo, se probó el envío de los datos a la base de datos en internet y se comprobó el acceso a la información desde otra computadora, principalmente en la SE Puebla II y SE Coyoacán.

En la sección 4.2 se muestran los resultados obtenidos en la SE Texcoco, mostrando algunas Huellas adquiridas en el lado de Baja Tensión, es decir, en el lado de 230 kV. En la sección 4.3, se muestran los resultados del trabajo de campo de la SE Puebla II en el lado de Alta Tensión, es decir, en el lado 400 kV y en el punto 4.4, los resultados obtenidos de la SE Coyoacán.

4.2 Trabajo de campo en la Subestación Texcoco.

En el mes de Marzo del se realizó una libranza en la línea 93620 Texcoco – Zocac Puebla. Bajo autorización del personal de la subestación, se instaló el equipo, ubicando las antenas de manera estratégica alrededor del Interruptor de Potencia identificado con el número 93620 sin sobrepasar las distancias de seguridad, tal como se muestra en la siguiente figura.



Figura No. 44. Ubicación del equipo en la subestación Texcoco alrededor del Interruptor de Potencia No.93620 de la línea Texcoco - Zocac Puebla.

La colocación de las antenas fue realizada con la siguiente distribución mostrada en la Figura No. 45. Las antenas son conectadas al osciloscopio por medio de cables triple axial con conectores BNC de 50Ω . Este cable tiene la característica de estar triplemente aislado a las señales del medio, lo que nos genera más fiabilidad en la señal que se transmite a través de ellos. En la siguiente figura se muestra la colocación de las antenas en el área de la línea librada en la subestación Texcoco, con el tendido del cable triaxial hacia el osciloscopio.

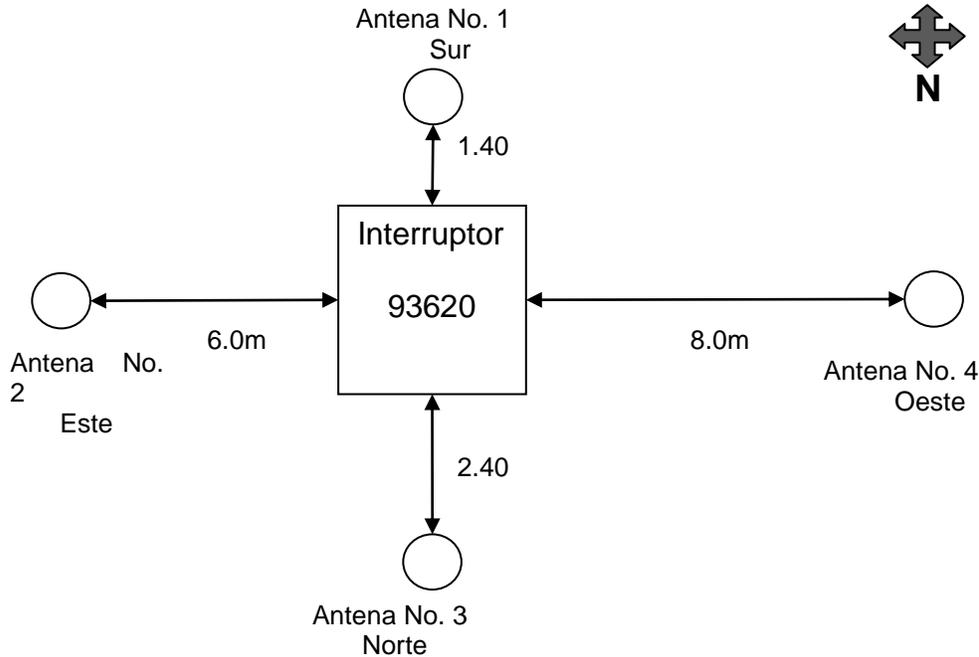


Figura No. 45. Distribución de las antenas en la SE Texcoco.

Como se ha mencionado, el método de detección de las DP's se realiza con cuatro antenas colocadas con diferentes distancias de las antenas respecto al Interruptor de Potencia, esto con el fin de tener tiempos de arribo diferentes, lo que significa un correcto funcionamiento de las antenas (Ver figura No. 46)

Considerando que los tiempos de viaje electrónicos para desencadenar las DP's tiene una duración de unos nanosegundos se genera un campo electromagnético inducido por el movimiento de las cargas. Lo anterior puede entenderse como una Onda Electromagnética Transversal a la propagación, la cual se radia en todas direcciones.

La versatilidad de la antena utilizada en nuestro método consiste en que se tiene bajas pérdidas y una ganancia sensiblemente uniforme teniendo un patrón omnidireccional, así mismo, su cobertura acimutal casi uniforme permite recibir ondas electromagnéticas provenientes de todo su alrededor.



Figura No. 46. Ubicación de las antenas en la Subestación.

Una de las aportaciones importantes del proyecto, fueron la adquisición de settings o ajustes del osciloscopio para las determinadas señales de los equipo. En la literatura internacional no se mencionan, así que se consideran un gran avance en el estudio del comportamiento y el grado de afectación de las descargas parciales a los sistemas de potencia.

Los ajustes al osciloscopio permitirán en trabajos futuros la colocación y preparación del sistema para captar las señales que se deseen, sin la necesidad de esta realizando pruebas de captura para determinar un ajuste correcto. De acuerdo al equipo a monitorear será la atenuación a utilizar, si es un interruptor o una cuchilla debe utilizarse una atenuación de $1\text{ M}\Omega$, esto para proteger al osciloscopio.

En las tablas siguientes se muestran los diferentes ajustes realizados en la subestación, con los cuales se adquirieron las huellas patrón de los equipos y de la misma subestación, las cuales se muestran en el Apéndice 2.

Tabla No. 4. Ajustes al osciloscopio para capturar la señal de ruido de fondo de la subestación en el área de 230 kV.

Antena	Ubicación (distancia de separación del Interruptor)	Atenuación	V/Div	Tiempo de Muestreo ns	Nivel de disparo
Sur	1,40 m	50 Ω	5	2	7 V
Norte	2,90 m	50 Ω	5	2	7 V
Este	5,80 m	50 Ω	5	2	7 V
Oeste	8,00 m	50 Ω	5	2	7 V

Tabla No. 5. Ajustes al osciloscopio para captar la señal de las Cuchillas en el área de 230 kV.

Antena	Ubicación (distancia de separación del Interruptor)	Atenuación	mV/Div	Tiempo de Muestreo ns	Nivel de disparo
Sur	1,40 m	50 Ω	50	100	7 V
Norte	2,90 m	50 Ω	50	100	7 V
Este	5,80 m	50 Ω	50	100	7 V
Oeste	8,00 m	50 Ω	50	100	7 V

Tabla No. 6. Ajustes al osciloscopio para captar la señal del Interruptor de Potencia en el área de 230 kV en operación de cierre con carga.

Canal	Nivel de disparo	Atenuación	V/Div
1	12 V	1 M Ω	100
2	12 V	1 M Ω	100
3	12 V	1 M Ω	100
4	12 V	1 M Ω	100

Con los ajustes mostrados en la Tabla No. 6, se realizó la captura de la señal de un interruptor de 230 kV en operación de cierre, dicha señal se muestra en la Figura No. 47, mostrando las señales captadas por las cuatro antenas.

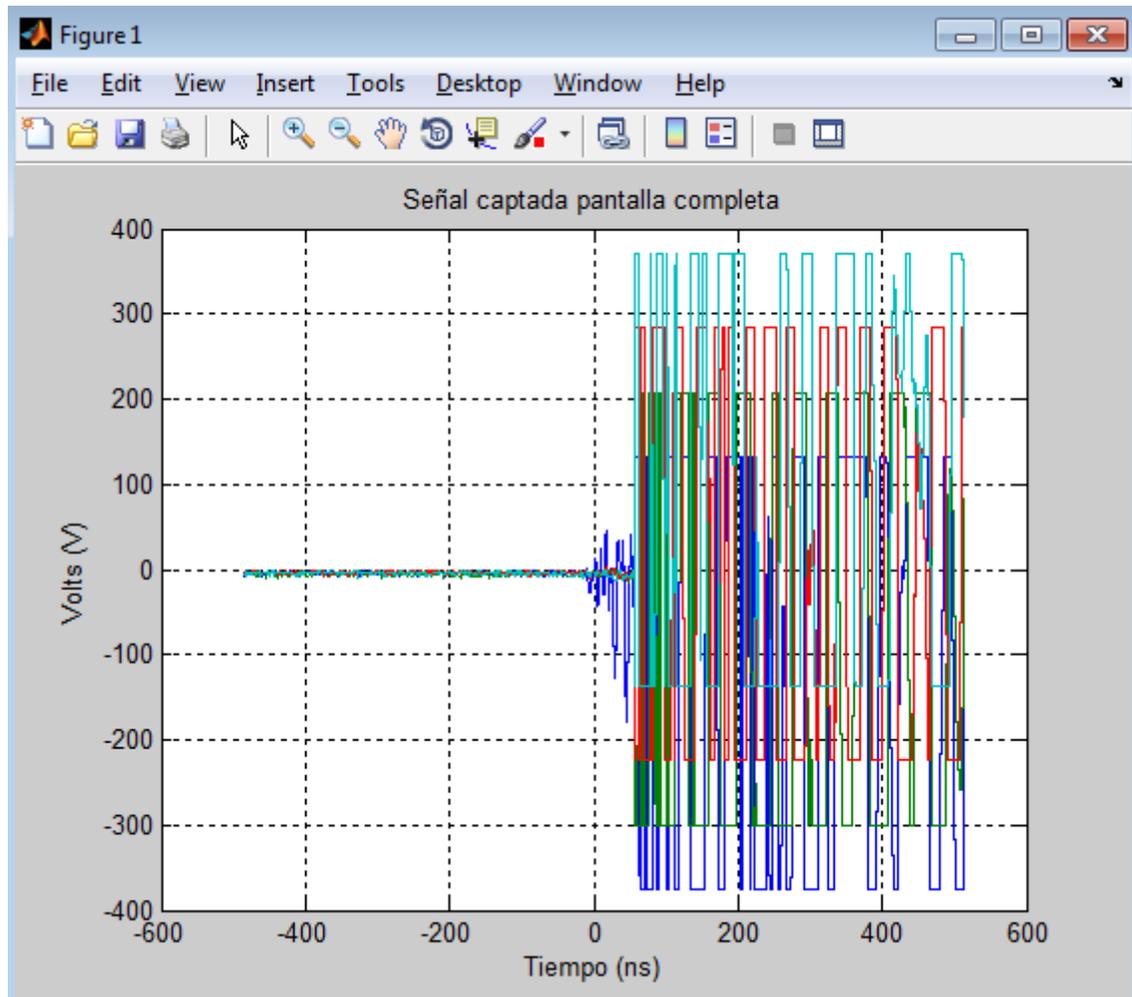


Figura No. 47. Captura de señal del Interruptor de Potencia A3460 en operación cerrado con carga.

Conforme se va disminuyendo la distancia interelectródica en el proceso de cierre se va aumentando el campo eléctrico, el sistema de extinción de arco en el interior del interruptor va realizando la extinción del arco hasta llegar al cierre total del interruptor, provocando que la señal se cuadre. Como se observa en la figura no se obtuvo una señal completa, esto se debe al número de muestras el cual se programó el osciloscopio, esto fue corregido en los trabajos posteriores pasando de 1000 muestras a 10000.

4.3 Trabajo de campo en la SE Puebla II

Este trabajo fue realizado el día 24 de Noviembre del 2011, en esta ocasión se presentó el programa de captura de señales tal como se muestra en el apéndice No. 1, fruto de los resultados obtenidos en el trabajo anterior de la subestación Texcoco.

Respetando las áreas de seguridad y las recomendaciones del personal técnico operativo de planta, se elige la mejor ubicación de las antenas, colocando el equipo en el área donde se localiza el Bus No. 1 de la cuchilla A3461, como se muestra en la Figura No. 48.



Figura No. 48. Ubicación del equipo para la captura de Señales de descargas parciales.

De acuerdo con los ajustes realizados en Texcoco, nos fue posible preparar al osciloscopio para realizar la toma de la huella patrón de la subestación. De acuerdo a los datos se propone el ajuste mostrado en la Tabla No. 4. La primera señal que se captura es el ruido electromagnético de la subestación.

Tabla No. 7. Settings del osciloscopio para el área de 400 kV.

Canal	Atenuación	mV/Div	Muestreo ns
CH1	50 Ω	50	20
CH2	50 Ω	50	20
CH3	50 Ω	50	20
CH4	50 Ω	50	20

Esta captura se realiza con el fin de tener un nivel de inicio para llevar un mejor monitoreo del comportamiento de los equipos de la subestación y poder detectar pequeñas descargas que influyan en el correcto funcionamiento de los mismos, adquiriendo la siguiente señal.

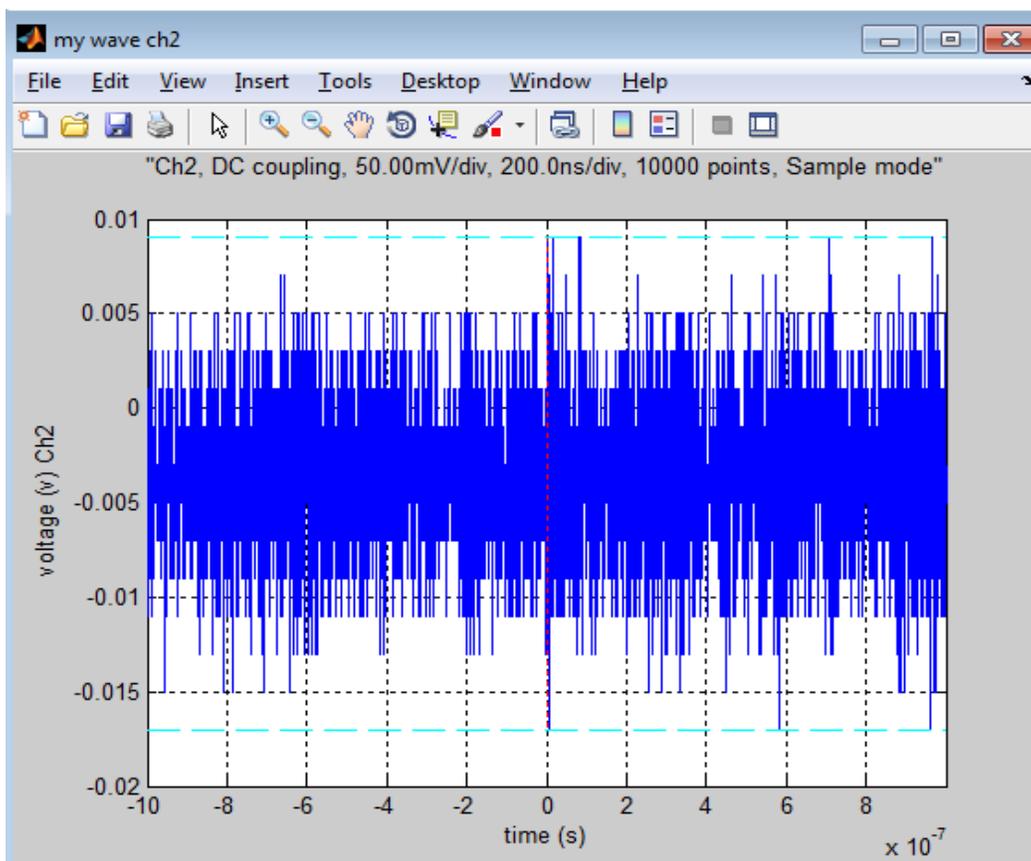


Figura No. 49. Huella del ruido de fondo de la subestación Puebla II en el área de 400 kV.

Como se puede observar, una de las nuevas ventajas del sistema es que adquirimos la imagen de la señal que se muestra en el osciloscopio y, al mismo tiempo los settings del mismo. Se distinguen también pequeños picos dentro de la señal, se determina que son producto de las pequeñas descargas corona que se producen en las cuchillas, comportamiento normal en la subestación.

Como estamos en el área de Alta Tensión, se realiza un nuevo análisis de ajuste al osciloscopio para la captura de las señales en esta área de la subestación. Se obtienen las huellas patrón de las cuchillas A3461, para esto, se toman los datos de placa para analizar el nivel de disparo al cual debemos poner el osciloscopio, por lo que el nuevo ajuste realizado quedó como se muestra en la Tabla No. 8.

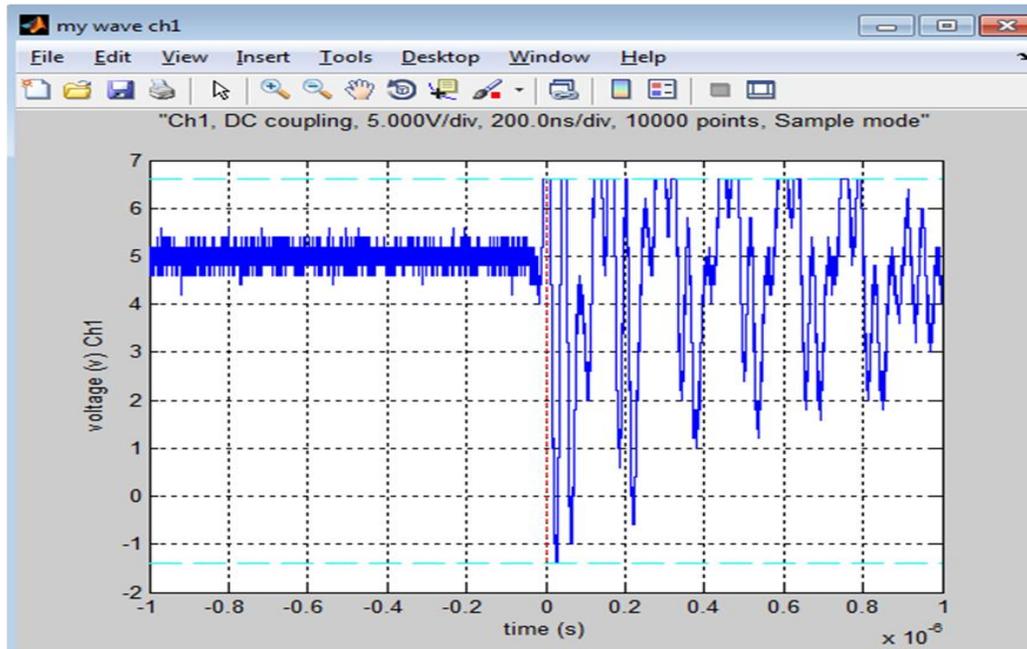
Se debe destacar que el aumento de la atenuación del osciloscopio es para protegerlo del golpe de inducción que recibe por medio de las antenas, al tiempo que nos permite observar de manera completa las señales por canal.

Tabla No. 8. Segundo ajuste del osciloscopio para el área de 400 kV.

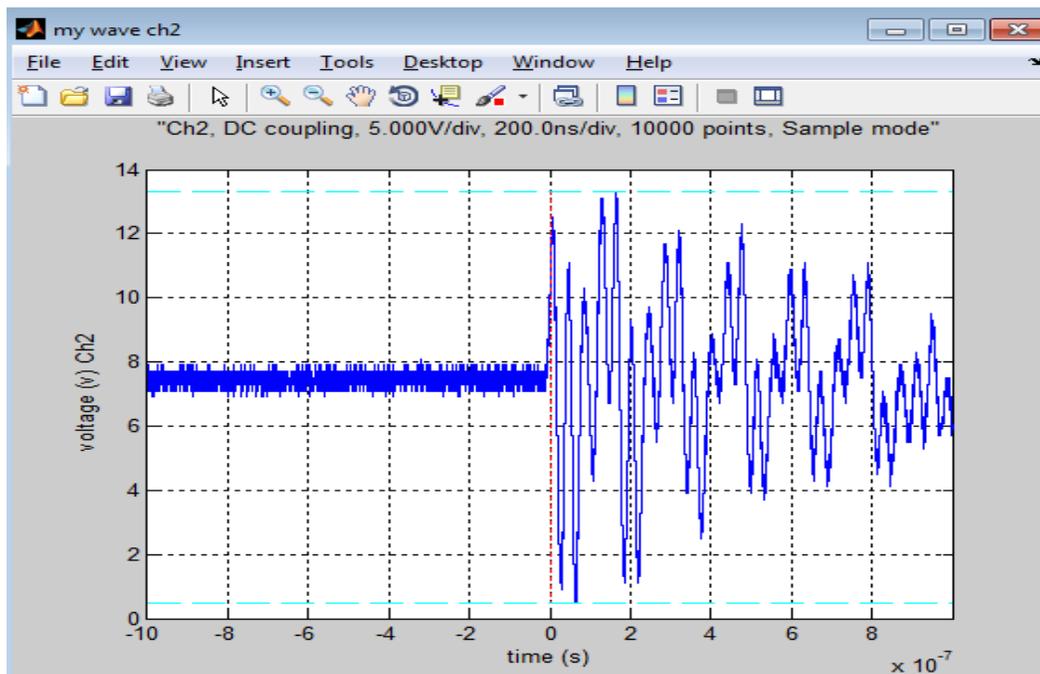
Canal	Atenuación	V/Div	Muestreos
CH1	1 M Ω	5	200
CH2	1 M Ω	5	200
CH3	1 M Ω	5	200
CH4	1 M Ω	5	200

Se debe recordar que no nos referimos a la atenuación al ruido externo que por fábrica tienen los osciloscopios que es de -3 db, sino de la disminución de la amplitud de la señal que realiza el osciloscopio por medio del cable de las antenas y de cada canal del osciloscopio, logrando una compensación, es decir, un ajuste de la entrada de las antenas que equilibra su capacitancia a la del osciloscopio.

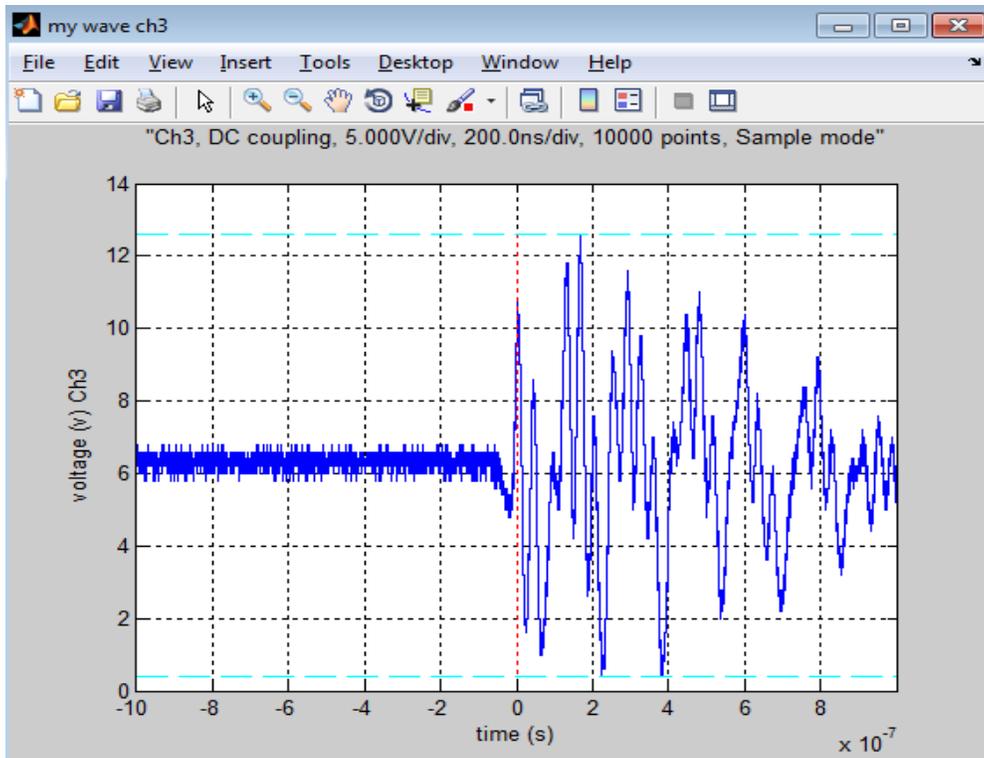
Con estos ajustes, se obtienen las huellas patrón de las cuchillas en operación de apertura y cierre, tanto del bus 1 (Cuchillas A3461), como del bus 2 (Cuchillas 3462), tal como se muestran en las siguientes figuras. Los datos de las cuchillas son los siguientes: cuchillas accionadas por motor con V nominal: 254 V, I Nominal 0.04 A. Frecuencia: 60 Hz.



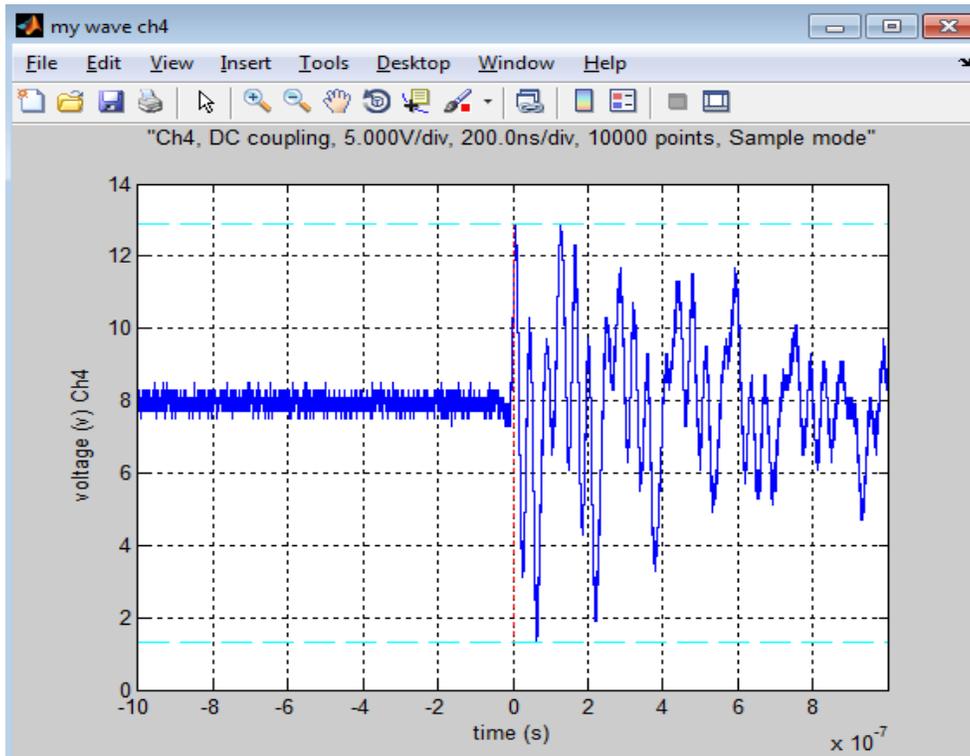
a)



b)



c)



d)

Figura No. 50. Señal de cuchillas A3462 en operación de apertura, a) canal 1; b) canal 2; c) canal 3 y d) canal 4 del osciloscopio.

Como se observa en las figuras anteriores, se tiene una señal oscilante y en forma de flecha. Este tipo de señal es característico de la apertura de cuchillas. Al iniciar la apertura las cuchillas están con carga, lo que se muestra en el inicio de la señal que tiene una amplitud muy grande. Conforme se van separando las cuchillas, la señal va decreciendo, debido a que el campo eléctrico que alimentaba el arco va disminuyendo hasta llegar a la distancia de separación total, mostrada en la punta de flecha de la señal, cuando se extingue el arco por completo.

La Figura 50a) , por ejemplo, muestra la señal captada por la antena 1 la cual está conectada al canal 1 del osciloscopio. Esta señal se sale de la pantalla debido a que la antena estaba más cerca de la cuchilla, lo que genera que la amplitud de la señal sea más grande que el ajuste realizado al osciloscopio, pero dado el diseño del sistema, se guardan todos los datos captados por la antena sin perder la señal.

A diferencia de una señal de cierre de cuchillas, la señal va aumentando conforme las cuchillas se acercan para el cierre. Al ir aumentando el campo eléctrico se va incrementando el arco hasta que se llega al punto de cierre total. Un ejemplo de este tipo de señal se muestra en la Figura No. 51.

Ahora, si observamos bien las imágenes 50a) y 50c) y las comparamos con las imágenes 50b) y 50d), podemos observar que aquellas captan antes las señales ya que se encuentran más cerca del elemento de emisión.

A este fenómeno de retardo de la captura de la señal le denominamos “tiempo de arribo” y nos sirve para identificar hacia qué dirección se encuentra el origen de la descarga, el cual al realizar el programa de localización, se encontraba a 13m de la antena No. 1, al medir se corroboró que ésa era la procedencia a la cuchilla de la fase A del bus 2.

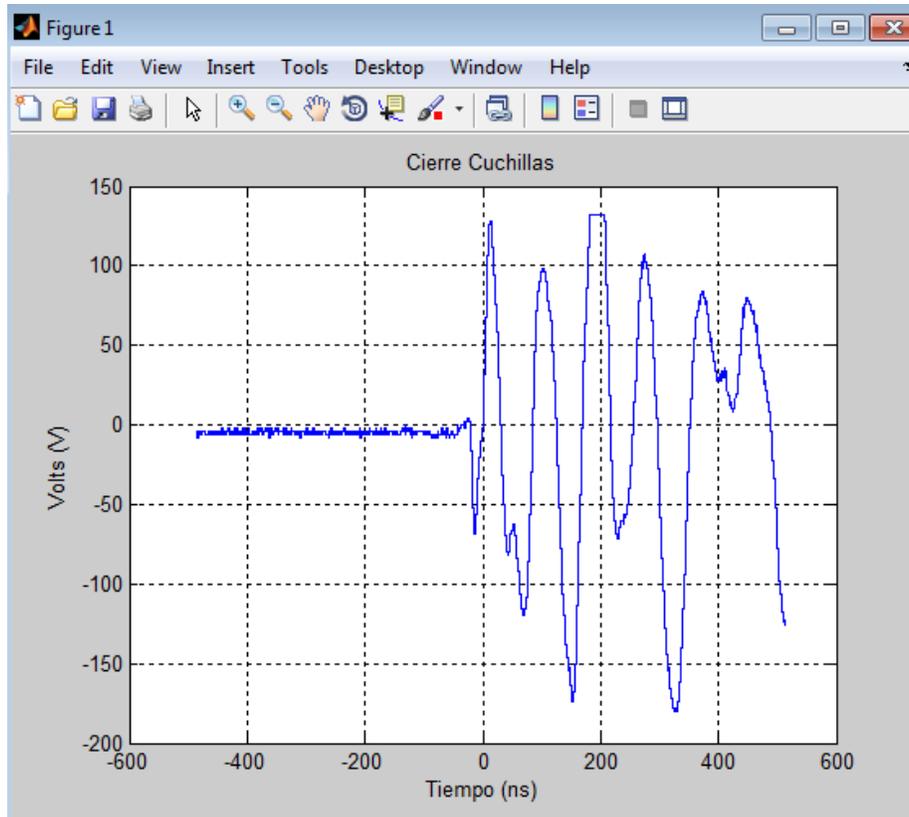
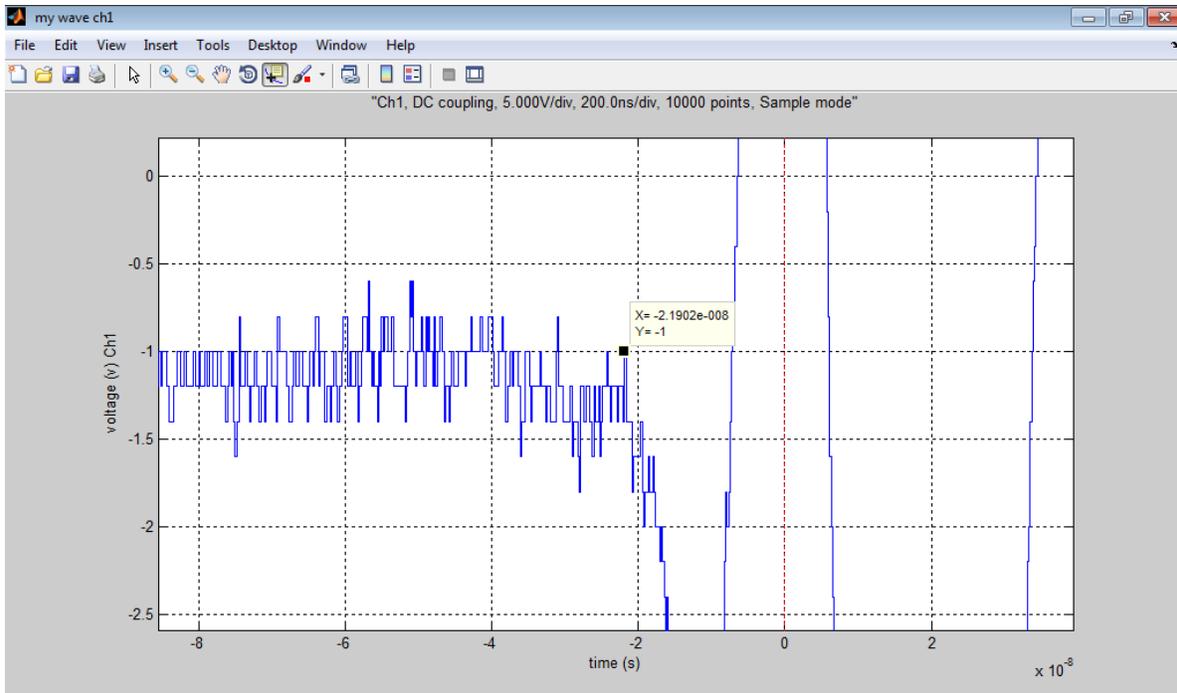


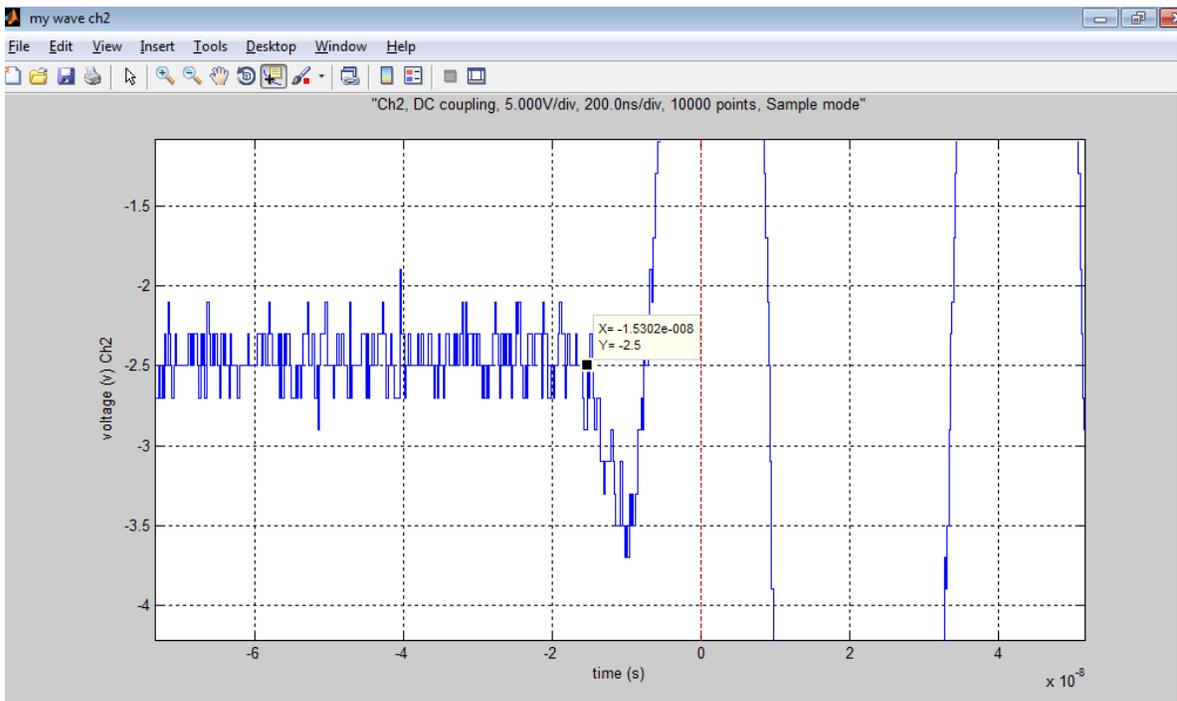
Figura No. 51. Señal de cierre de cuchillas

La localización se realiza de la siguiente manera. El programa manda llamar los datos guardados y muestra las imágenes de las señales guardadas de cada canal. El programa pregunta si se desea continuar, al responder que si nos despliega un dialogo en el que nos pide las coordenadas por antenna.

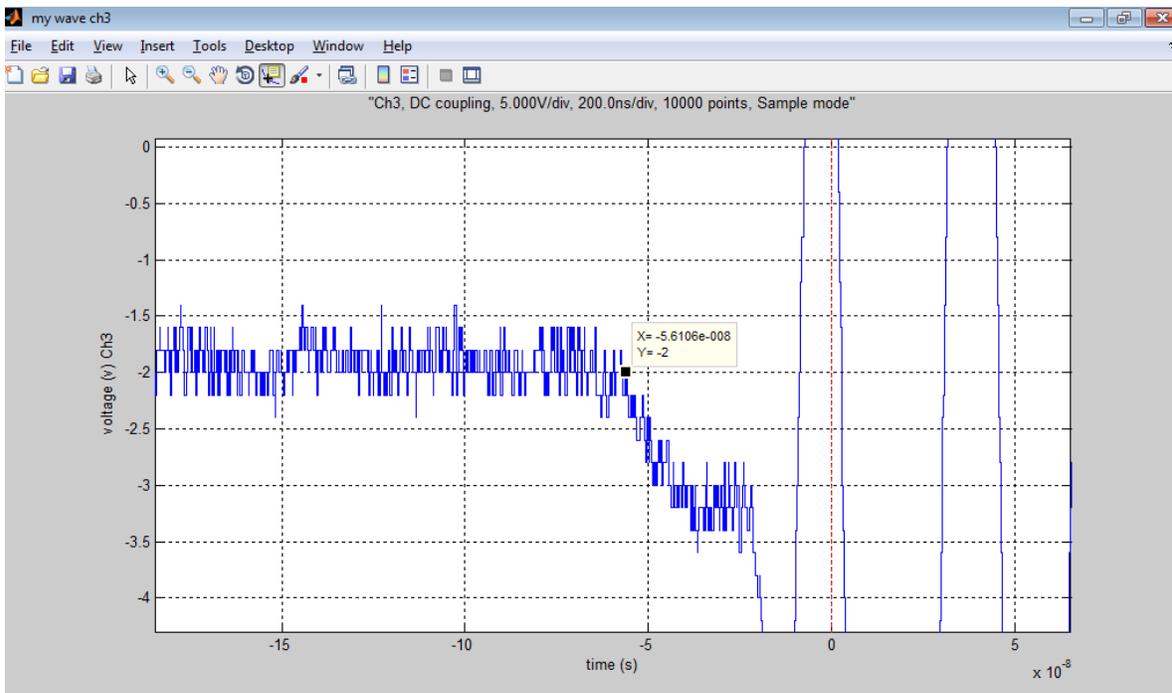
Antes de proporcionar las coordenadas, es necesario analizar primero las imágenes de las señales para obtener los tiempos de arribo de la señal por antenna y por ende, por canal. Los tiempos de arribo por cada canal se muestran a continuación.



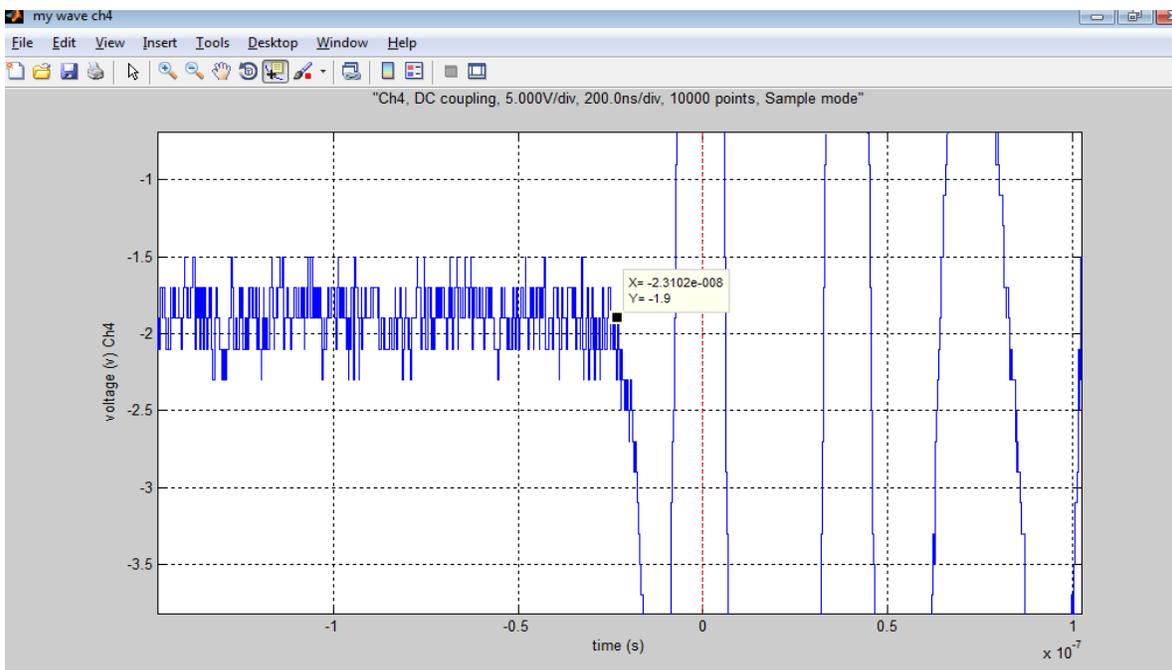
a)



b)



c)



d)

Figura No. 52. Tiempos de arribo por canal tomados para la señal captada de las cuchillas en la SE Puebla II:
a) canal 1; b) canal 2; c) canal 3 y d) canal 4.

Una vez analizadas las señales, se procede a proporcionar las coordenadas de las antenas, así como los tiempos de arribo de dichas señales acomodando los datos de acuerdo a la primera señal de arribo. Esta operación se observa en la siguiente figura, en la cual se muestra la ventana principal de Matlab y se tienen en el Command Window los datos correspondientes.

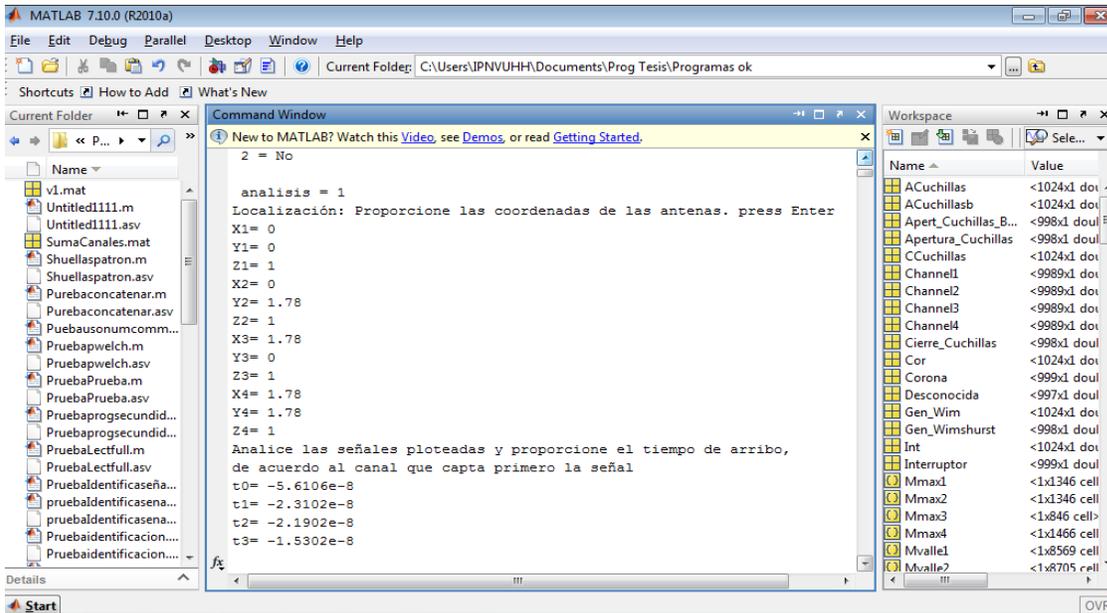


Figura No. 53. Ventana de Matlab para realizar la localización de la descarga.

Como se observa en la figura anterior los datos proporcionados son los siguientes:

Coordenada Antena No. 1 (0, 0).

Coordenada Antena No. 2 (0, 1.78)

Coordenada Antena No. 3 (1.78, 0)

Coordenada Antena No. 4 (1.78, 1.78)

Todas a la misma altura: 1m del piso de la subestación al disco de la antena.

Los tiempos de arribo utilizados se muestran en las siguientes figuras:

$t_0 = 5.6106e-8$

$t_1 = 2.3102e-8$

$t_2 = 2.1902e-8$

$t_3 = 1.5302e-8$

El programa realiza las iteraciones programadas y, se obtiene el resultado mostrado en la figura No. 54.

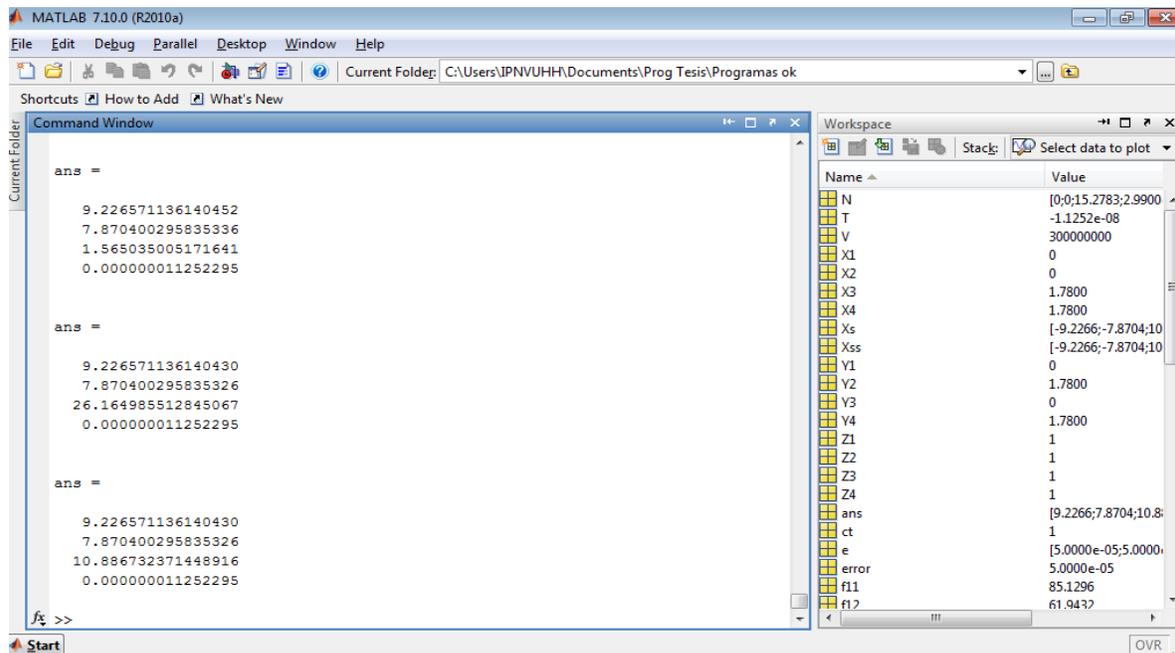


Figura No. 54. Resultado de las iteraciones para localizar la fuente de la descarga captada por las antenas, correspondiente a las cuchillas de 400 kV, SE Puebla II.

Al realizar el cálculo de la distancia

Al considerar la distancia de la Antena No. 1 a la Antena No. 3 se tiene

Por lo que, la nueva diagonal da

La cual, al corroborar, corresponde a la distancia que existía entre la antena No. 1 con la posición de la Cuchilla de fase A. Este fenómeno también fue captado con cámaras fotográficas y de video, contando así con un inicio de base de datos muy completa, ya que se cuenta con evidencia física, evidencia videográfica y fotográfica, que respaldan nuestros descubrimientos. Dichas imágenes se presentan a continuación en las Figuras No. 55 y 56.



Figura No. 55. Cierre de cuchillas A3462 bus 2 fase A

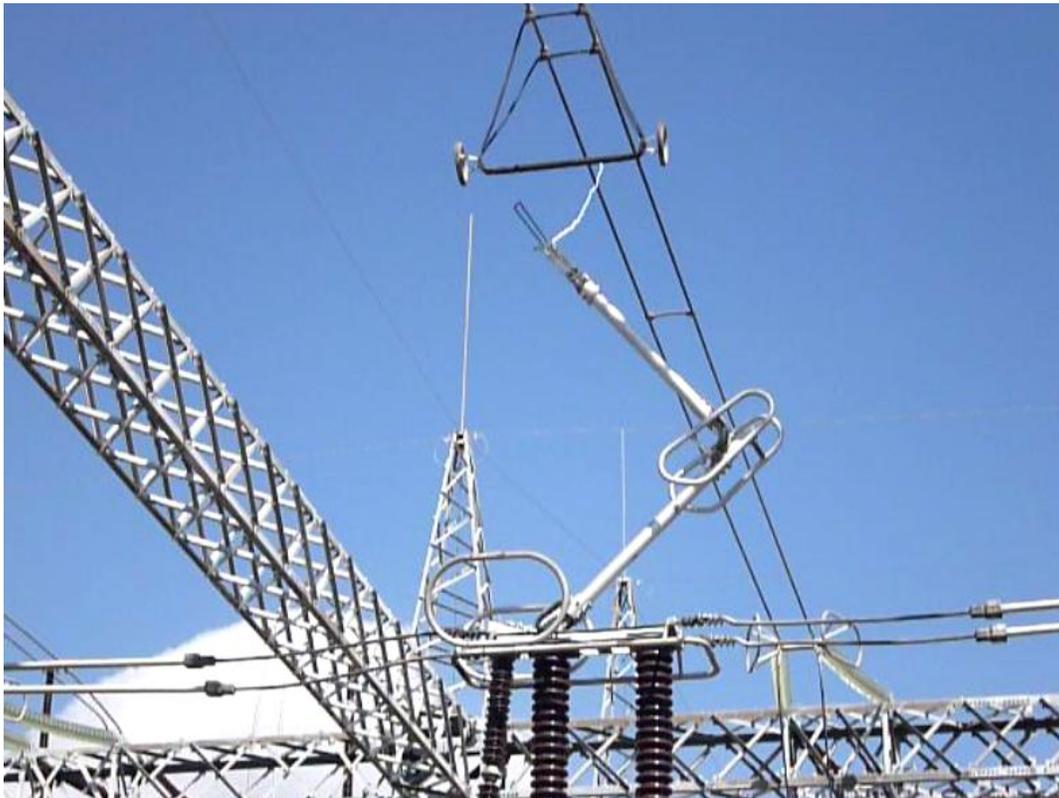


Figura No. 56. Apertura de Cuchillas A3462 bus 2, fase A.

Una vez corroborada la distancia, se procedió a tomar la huella patrón de los Transformadores Monofásicos de Potencia en aceite de 400/115/34.5 kV, tipo acorazado DA/FA1/FA2, 75 MVA en sus fases A, B y C, las cuales se muestran en el Apéndice No. 2.

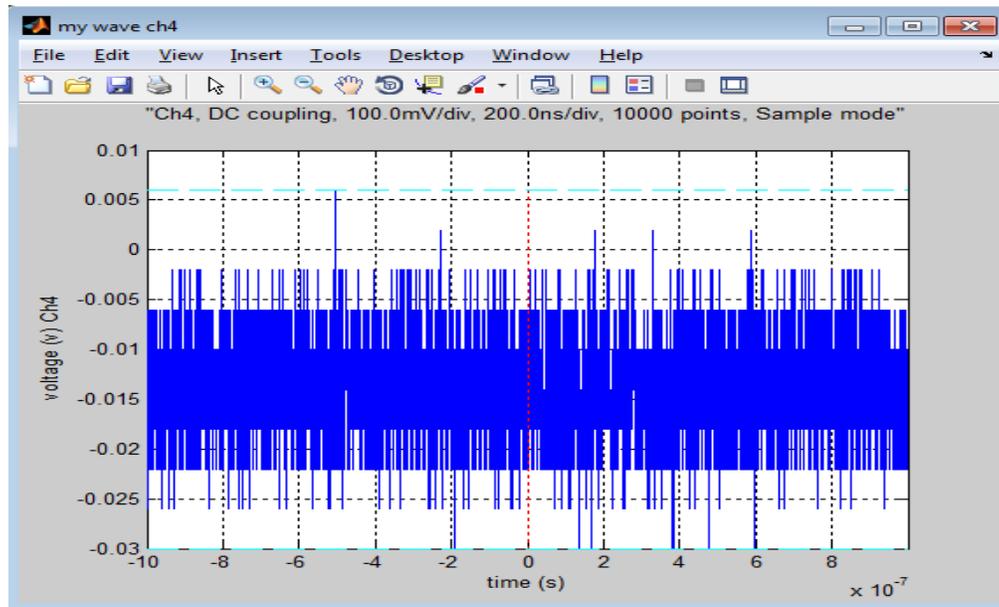
Para adquirir la Huella, se realizan 2 arreglos diferentes, el primero consistió en colocar las antenas a una distancia de 7m del tanque del transformador, espaciando las antenas a 2,40 m una de la otra, tal como se muestra en la Figura No. 57. El segundo arreglo consistió en envolver el transformador con nuestras antenas, es decir, realizamos un arreglo que rodeaba al transformador dejándolo en el medio teniendo a las antenas separadas equidistantemente a 9,40 m entre sí.



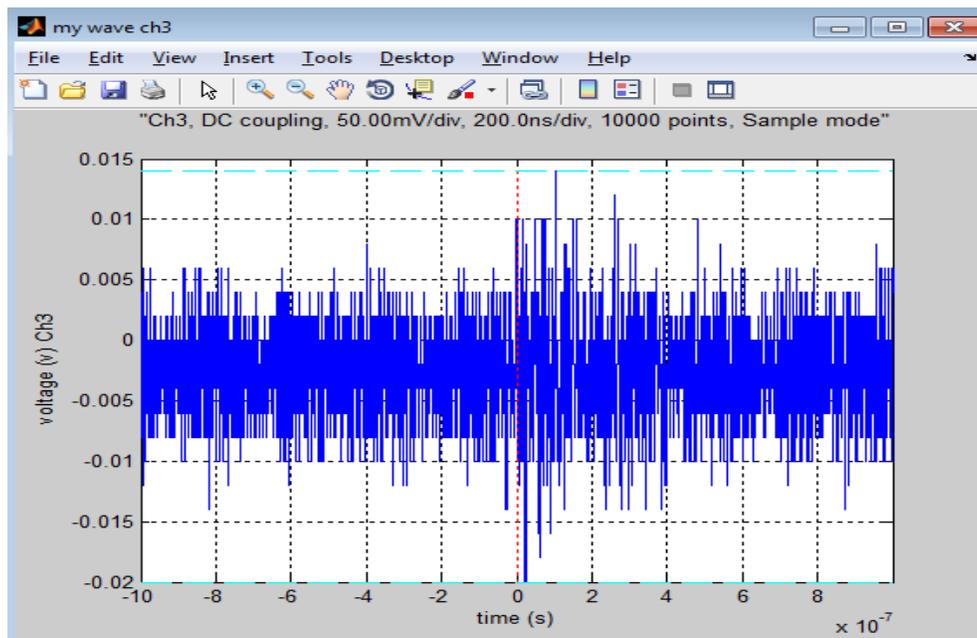
Figura No. 57. Arreglo del sistema para la toma de la huella patrón del Transformador de potencia

Las señales captadas del transformador se muestran en las figuras 58 a) y 58 b), en las cuales se puede observar el comportamiento del transformador en operación nominal; analizando las señales se puede concluir que el transformador trabaja normalmente, sin ninguna presencia de descargas parciales.

Cabe aclarar aquí que, en el caso de los transformadores, del interruptor y en general del equipo embebido en estructuras, las señales captadas no rebotan por las paredes del tanque que las contiene, sino que pueden captarse por las partes externas, las cuales permiten la salida de la onda electromagnética en un rango de frecuencia característico de las descargas parciales, que es de 30 MHz a 1 GHz.



a).



b)

Figura No. 58. Señales de huella patrón del Transformador monofásico de potencia. a) primer toma, b) segunda toma.

Otra aportación más del sistema es el hecho de realizar un descubrimiento en lo que respecta con el comportamiento de los Interruptores de Potencia. Solicitamos al CENACE autorización para entrar de nuevo al área de 400 kV y censar la operación del Interruptor A3460, con el fin de obtener sus huellas patrón tanto en vacío como con carga.

Con el Interruptor de Potencia con inducción, es decir operando el interruptor condición de vacío, se pudo guardar su huella de comportamiento. Esta captura es especial porque no se tiene registrada ninguna huella de este tipo en la literatura, por lo que es algo nuevo el poder observar este comportamiento del interruptor.

La experiencia en planta y la teoría nos menciona que, al operar el Interruptor de Potencia sin carga, no debe existir un arco de una amplitud muy grande, lo cual se comprueba en las siguientes figuras.

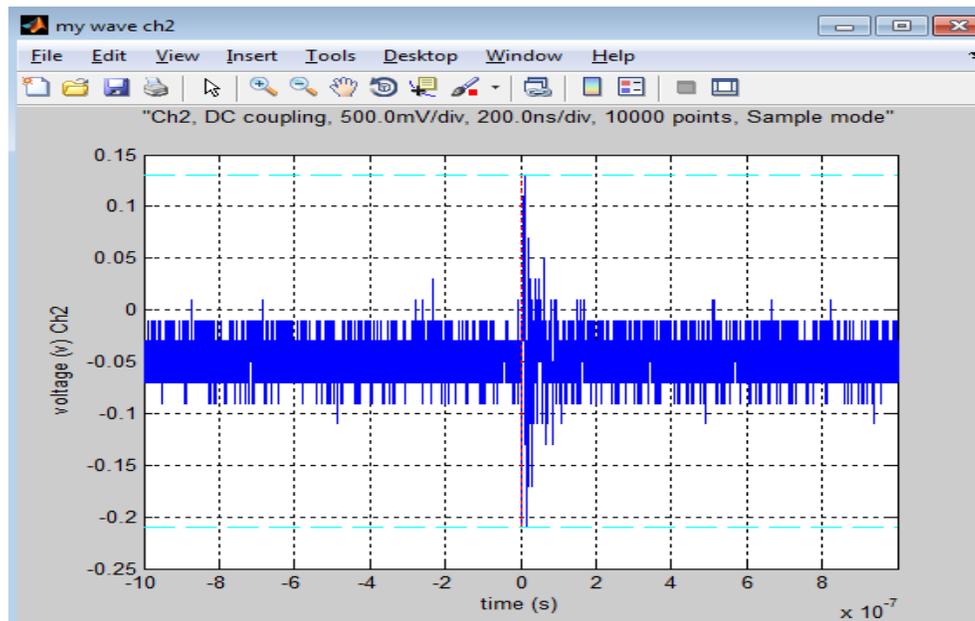


Figura No. 59. Captura de huella patrón de interruptor de potencia en operación cierre en vacío.

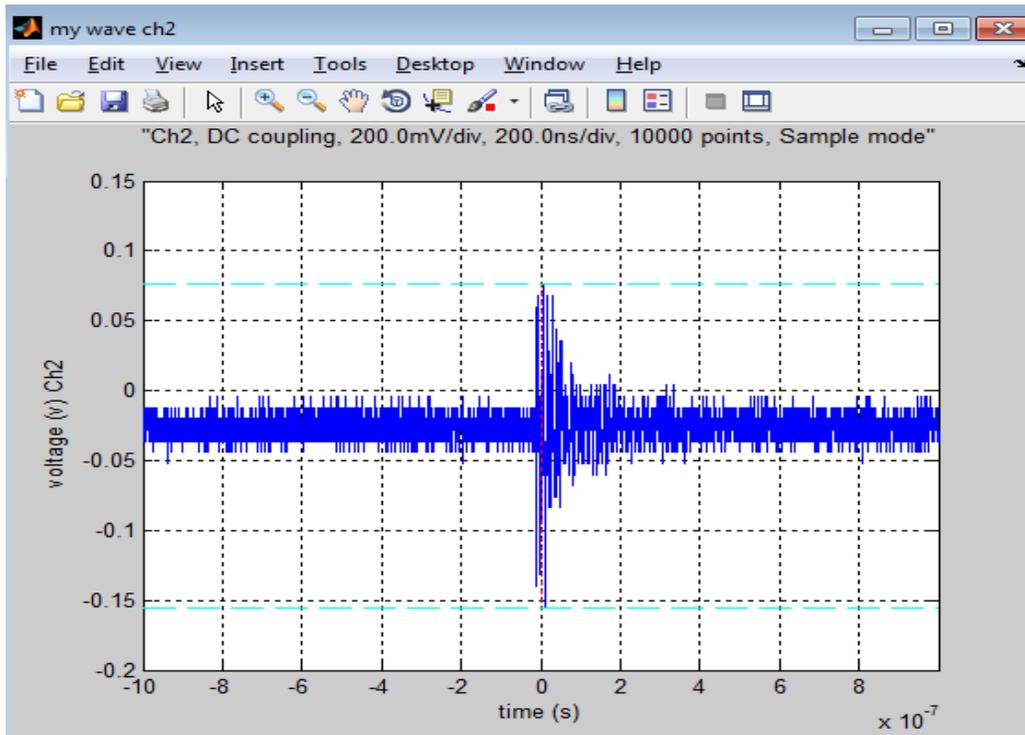


Figura No. 60. Huella Patrón de Interruptor de Potencia en operación de apertura en vacío.

En la Figura No. 59, si se analiza detalladamente, se observa un arco eléctrico de una amplitud considerable para estar operando al vacío, su magnitud es de 140mV, la cual es mayor en comparación con la señal mostrada en la Figura No. 60, que presenta un pico de 50mV en la que se registró la apertura. Con estos datos podemos realizar un análisis más completo sobre el comportamiento del Interruptor de potencia, de acuerdo con lo estipulado en la publicación NEMA No. 107 [20].

Dicho comportamiento sin carga puede ser utilizado para cuando sea necesario realizar mantenimiento al interruptor y, si el arco de apertura y cierre del interruptor sin carga aumenta, entonces algo está pasando en el interior de la cámara de extinción o en las partes móviles del interruptor, lo cual evitará ponerlo en funcionamiento. Como se observa, esta metodología aporta una herramienta más para el estudio de los interruptores de potencia.

Por último, se realiza la captura de la huella patrón del cierre de cuchillas e interruptor con carga. Por tal motivo se prepara al equipo para la captura de la señal de operación del Interruptor de Potencia con carga. Para ello se realizó un nuevo ajuste al osciloscopio, para captar la señal del interruptor, quedando de la siguiente manera.

Tabla No. 9. Ajuste del osciloscopio para captar señal de cierre con carga del Interruptor de potencia de 400 kV.

Canal	Atenuación	V/Div	Muestreo ns
CH1	1 M Ω	10	200
CH2	1 M Ω	10	200
CH3	1 M Ω	10	200
CH4	1 M Ω	10	200

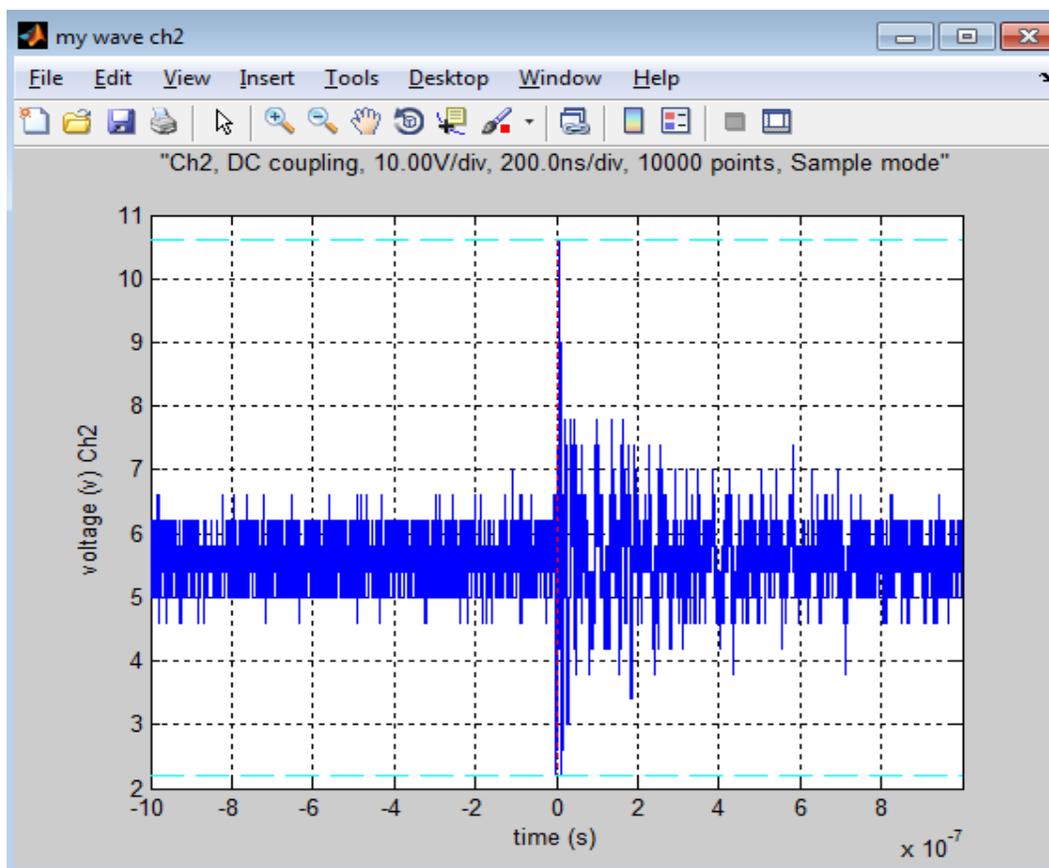


Figura No. 61. Captura de señal del Interruptor de Potencia A3460 en operación cerrado con carga.

Como se observa en la Figura No. 59, y en comparación de las señales mostradas en las Figuras No. 59 y No. 60, la amplitud de la señal de cierre del Interruptor con carga es mucho mayor, del orden de los 10,5 V, considerando una atenuación de $1M\Omega$.

Para nosotros es importante saber estos comportamientos porque en un futuro, cuando se realice de nuevo el monitoreo del interruptor, si la señal captada rebasa este valor, entonces el equipo presenta problemas en su interior.

4.4 Trabajo de campo en la SE Coyoacán.

Este trabajo se realizó el 17 de diciembre del 2011, en el lado de Alta Tensión de la subestación. Se realizó un reconocimiento de la subestación GIS de SF_6 en sus terminales de 230 kV, y se decide colocar las antenas como se muestra en la Figura No. 62, respetando los límites de seguridad y las recomendaciones del personal.

Para lograr la primera captura del ruido de fondo de la subestación y de acuerdo con la experiencia adquirida hasta este momento, se coloca el equipo dentro de la caseta donde se encuentra la GIS y se ajustan los valores del osciloscopio de la siguiente manera:

Tabla No. 10. Primeros ajustes del osciloscopio dentro de la subestación GIS.

Canal	Atenuación	mV/Div	Disparo mV	Muestreo ms
CH1	50 Ω	200	12	20
CH2	50 Ω	200	12	20
CH3	50 Ω	200	12	20
CH4	50 Ω	200	12	20



Figura No. 62. Colocación de las antenas en la caseta del GIS en el lado de 230 kV.

La Figura No. 6, muestra la huella del ruido de fondo de la subestación con las terminales a prueba fuera de línea.

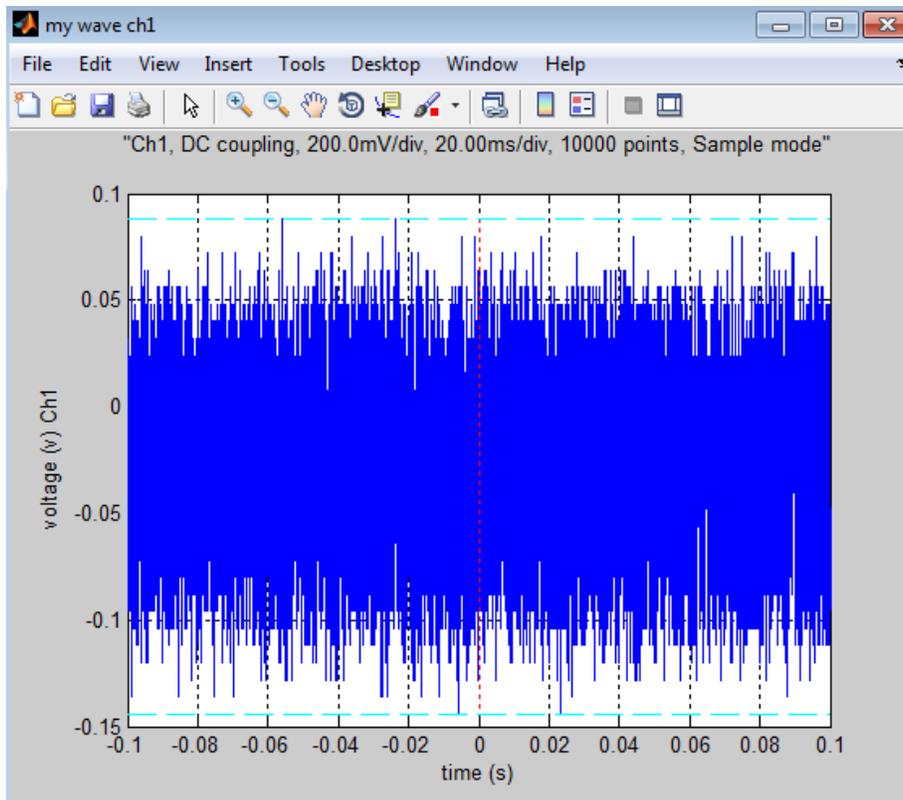


Figura No. 63. Huella del ruido de fondo de la SE Coyoacán con las terminales a prueba desenergizadas.

Se cambió la posición de las antenas, colocándolas fuera de la caseta, con el fin de poder monitorear toda la subestación, tal como se muestra en la Figura No. 64. El ajuste de acuerdo a las dos capturas anteriores, queda de la siguiente manera:

Tabla No. 11. Ajustes del osciloscopio para captura de huella patrón completa de la subestación

Canal	Atenuación	mV/Div	Disparo mV	Muestreo ms
CH1	50 Ω	200	12	200
CH2	50 Ω	200	12	200
CH3	50 Ω	200	12	200
CH4	50 Ω	200	12	200



Figura No. 64. Colocación de las antenas para monitoreo completo de la subestación.

La señal captada, que podemos considerar como la Huella Patrón de la Subestación, se muestra en la siguiente figura.

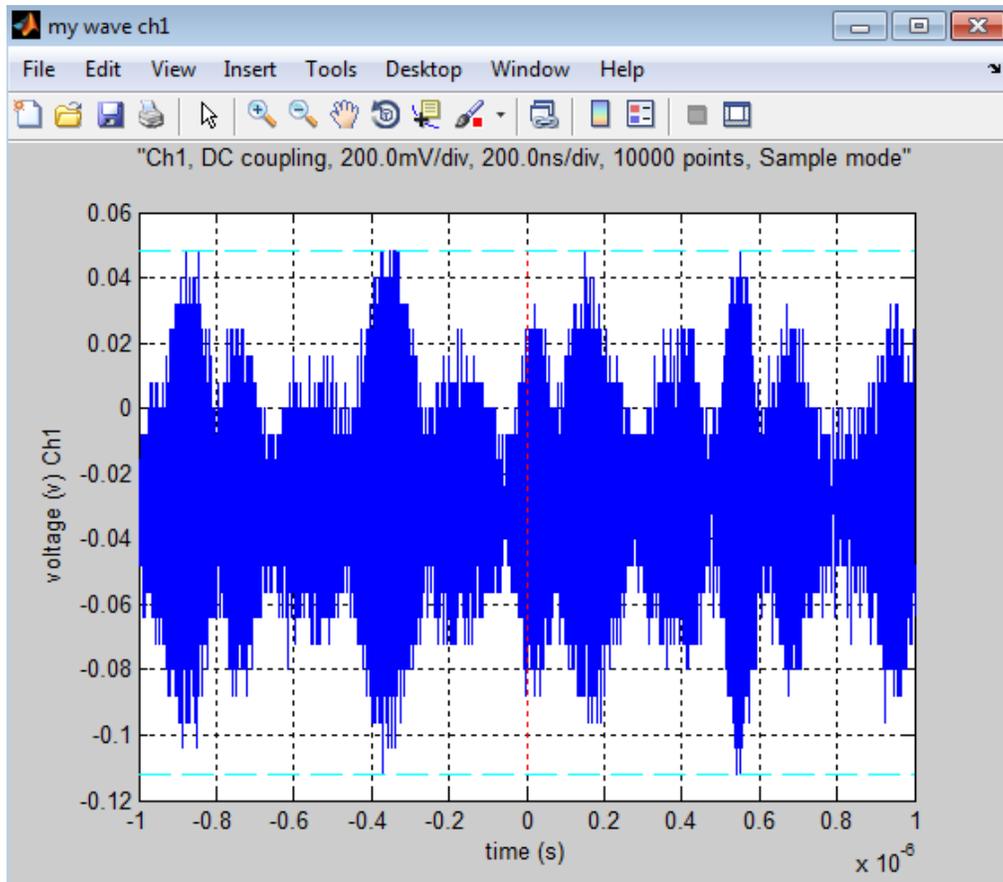


Figura No. 65. Huella del ruido de fondo de la SE Coyoacán con las terminales a prueba desenergizadas.

Al tiempo que se hicieron las capturas de las huellas patrón de la subestación, se realizó una prueba de localización al detectar una señal diferente, ya que se observa que sobrepasa el nivel de la huella patrón. Dicha señal se muestra en la Figura No. 66, en la cual se muestra al mismo tiempo el tiempo de arribo de esa señal.

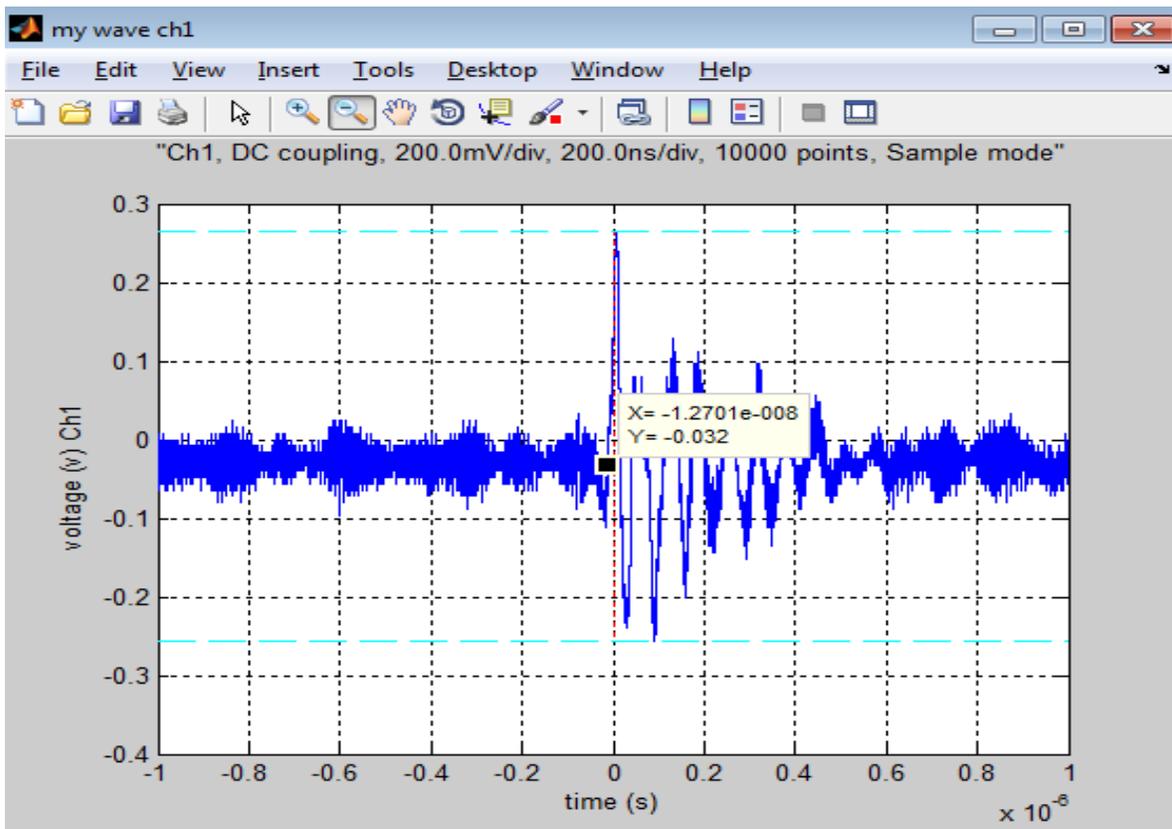


Figura No. 66. Ejemplo de tiempo de arribo. Este tiempo se utilizó para realizar la localización de la descarga parcial desconocida.

Con la señal mostrada en la figura anterior, se realiza una localización, ya que no se sabía la procedencia de la señal. Una vez que se obtuvo el tiempo de arribo por canal, se introducen los datos en el programa, como se muestra en la siguiente figura donde se observa las coordenadas de las antenas y, en la Figura No. 67 los tiempos de arribo utilizados para su localización.

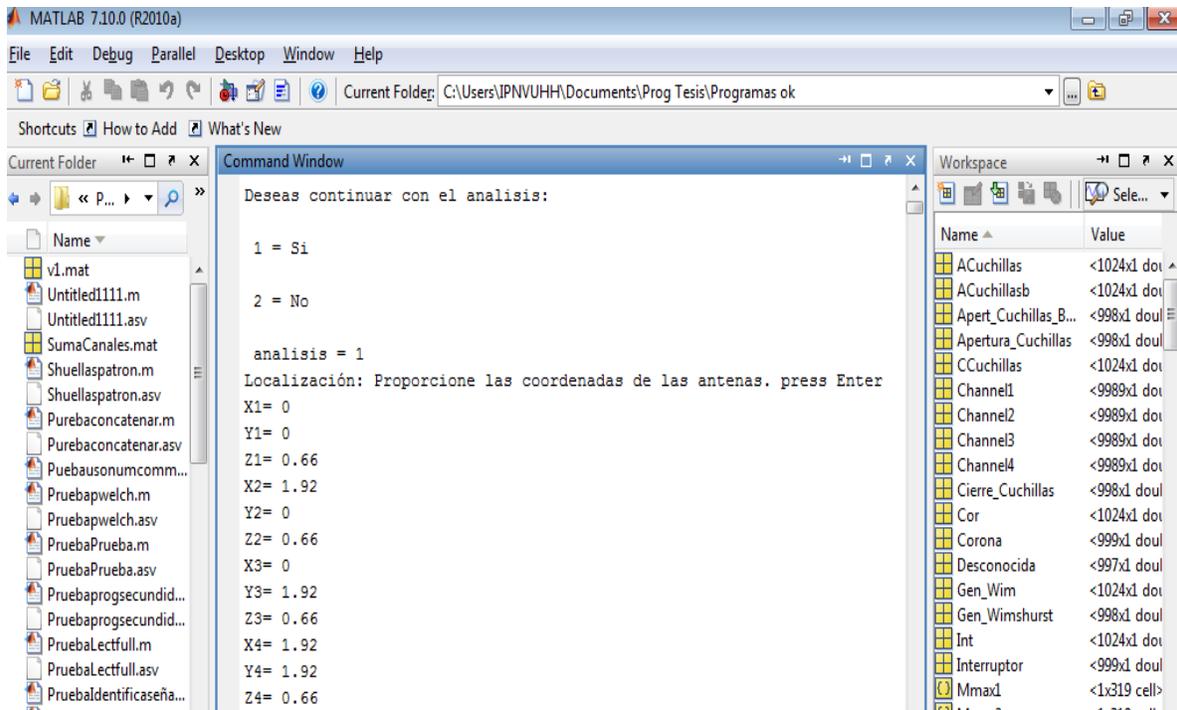


Figura No. 67. Inicio del programa de localización de descargas parciales.

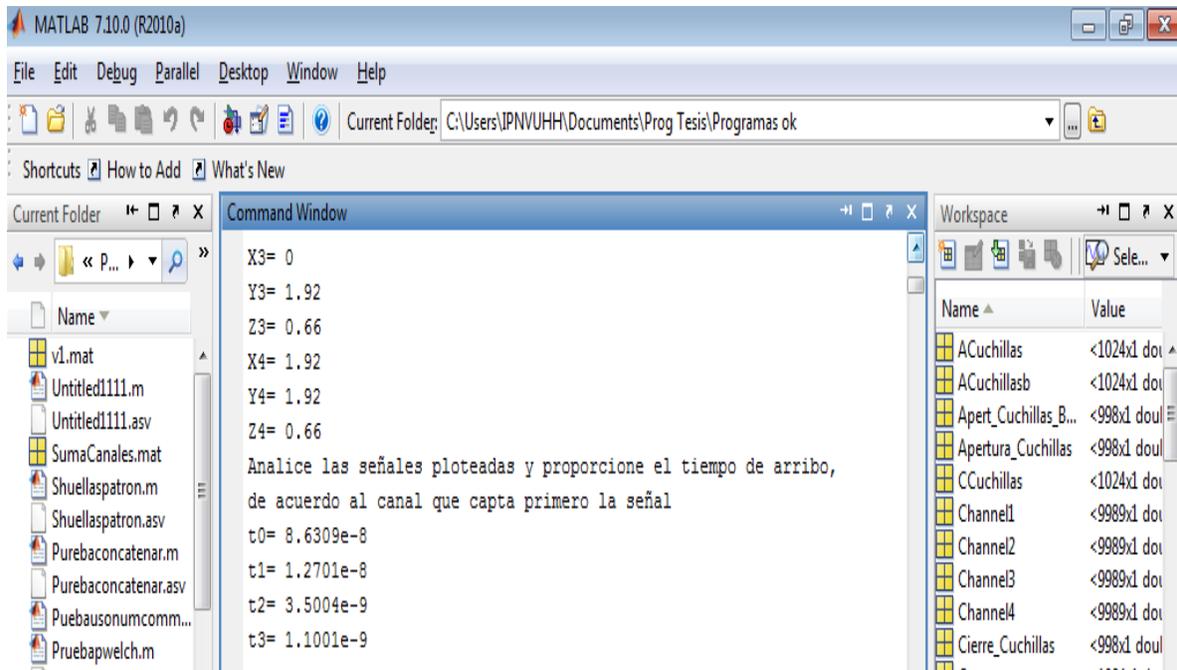


Figura No. 68. Tiempos de arribo de la señal ordenados de acuerdo a cual es captado primero hasta el último.

Una vez proporcionados los datos, el programa arroja una coordenada, tal como se muestra en la siguiente figura. Al corroborar con el personal de la Subestación, y al realizar la medición de acuerdo a la coordenada, se demostró que la señal fue localizada en el punto en el que se realizó la maniobra en el lado de 23 kV, por lo cual se demuestra la funcionalidad del sistema y su eficiencia al detectar y localizar descargas.

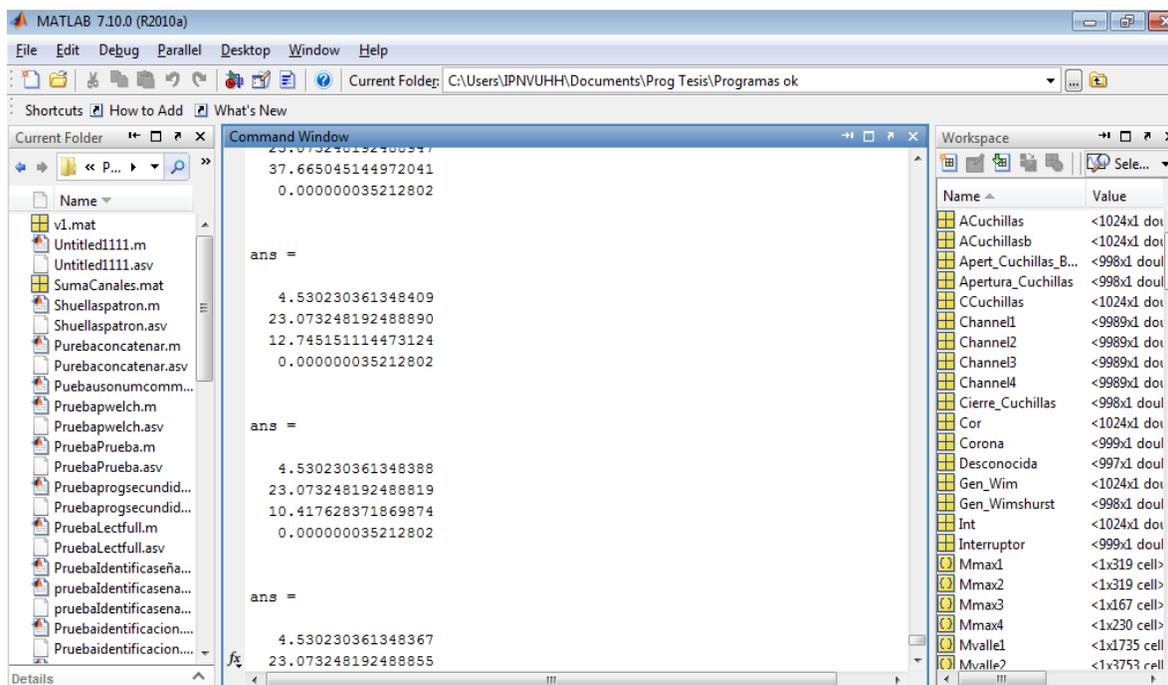


Figura No. 69. Coordenadas de localización de la descarga desconocida, la cual concuerda con la ubicación de las maniobras realizadas en el lado de 23 kV.

Se realizaron capturas de huella patrón de cuchillas y de interruptor de potencia de la subestación encapsulada, dichas señales son mostradas en el Apéndice 2.

4.5 Monitoreo de Transformador con descargas parciales.

La Comisión Federal de Electricidad hizo la solicitud para realizar un monitoreo de descargas parciales a un banco de transformadores que presentó una falla catastrófica en una de sus fases, con el fin de verificar un correcto funcionamiento en el transformador de la fase A Reserva que se muestra en la Figura No. 70. Por cuestiones de seguridad, no me es permitido proporcionar muchos datos, el lugar, ni el nombre del fabricante del equipo, solo puedo proporcionar algunos datos de placa que muestro a continuación.

Tabla No. 12. Datos de placa de Transformador.

Transformador Monofásico 400/230 kV			
Sistema de enfriamiento:	OA/AF/AF	Altura de operación	2000 MSNM
Frecuencia:	60 Hz	Temperatura:	55°C
Potencia:	75 MVA	% Z:	4.996 / 10.585



Figura No.70. Transformador reductor de 400 a 230 kV.

Al iniciar la prueba se detecta una señal que se muestra en la Figura No. 71.

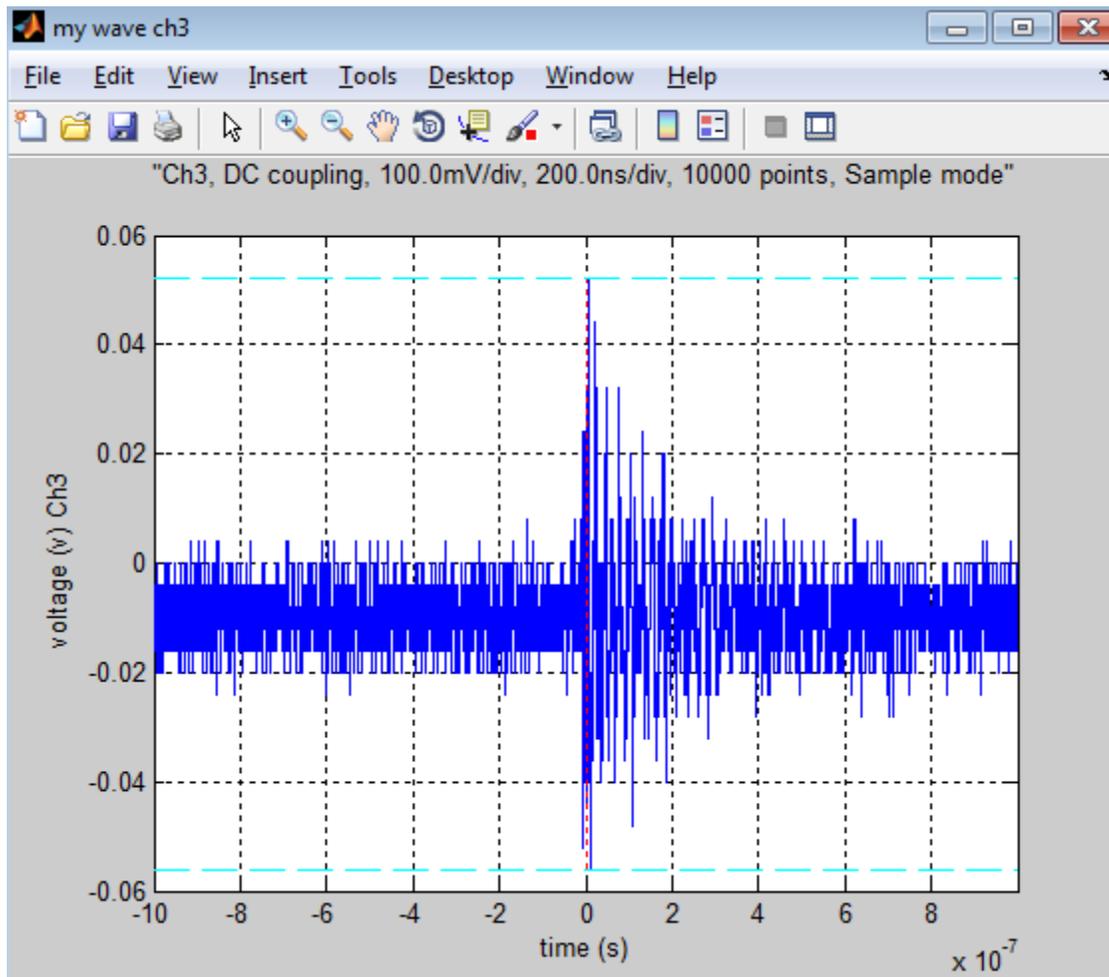


Figura No. 71. Señal emitida por el Transformador.

En la figura se observa que se presenta una señal en forma de espiga, la cual es la forma característica de la presencia de una descarga parcial. Se continuó con el monitoreo y la espiga se siguió presentando, por lo que se le avisó al personal encargado, recomendando un monitoreo constante al equipo. Por parte de la empresa se realizó una cromatografía de gases, la cual arrojó presencia de de Hidrógeno (H_2) por arriba de lo permitido por norma.

De acuerdo con la Norma NMX-J-169, la cantidad permitida de H₂ diluido en el aceite debe ser <100 ppm. Si el gas está por debajo de esta condición, se considera que el equipo trabaja normalmente y no presenta problemas. Si el gas presente es 100<gas<300 ppm, entra en la condición No. 2 en la que se recomienda realizar un monitoreo constante e investigar la causa.

En la cromatografía al Transformador Fase A Reserva, la presencia de H₂ es de 147.82 ppm, por lo que, de acuerdo a la norma entra en la condición 2. Al saber el resultado se hizo la invitación de realizar un nuevo monitoreo del transformador para analizar la evolución de la señal. Las capturas de este nuevo monitoreo se presentan en las Figuras No. 72 y 73.

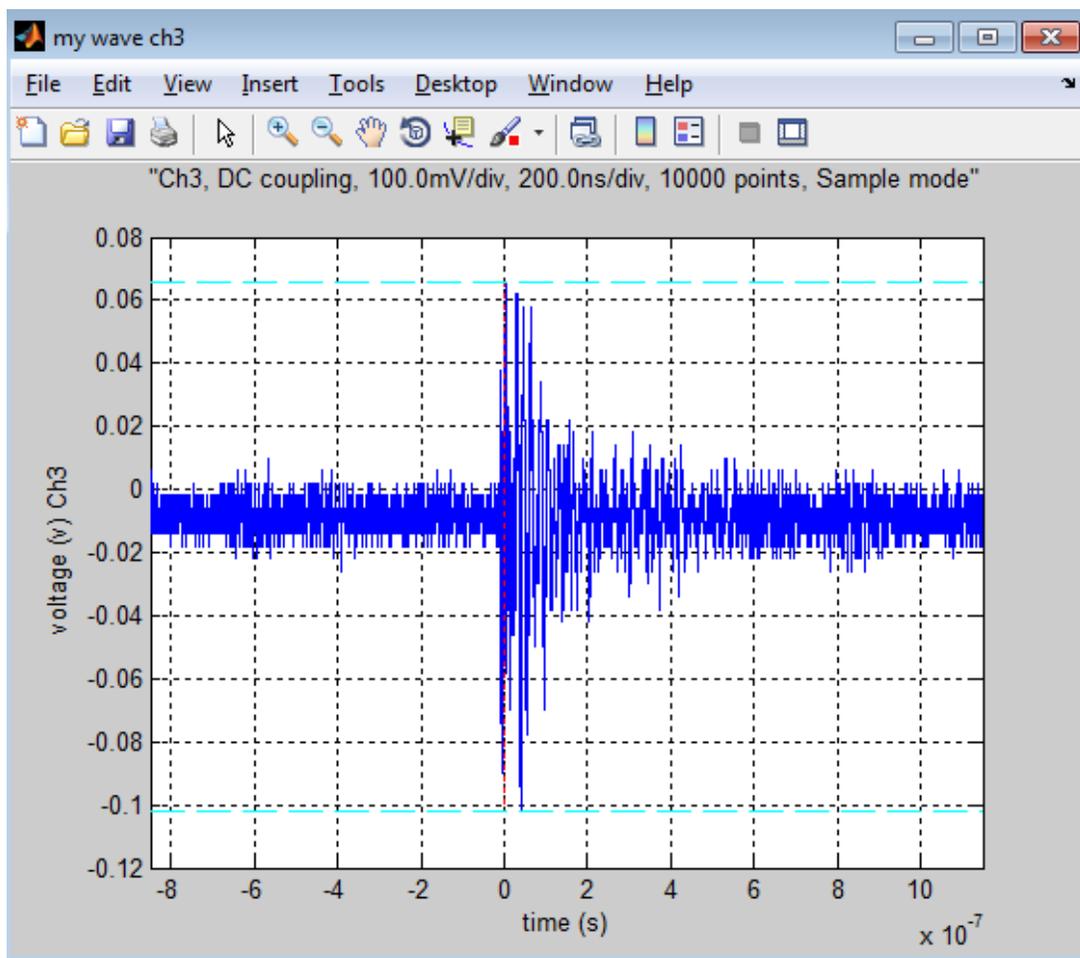


Figura No. 72. Segundo monitoreo al transformador.

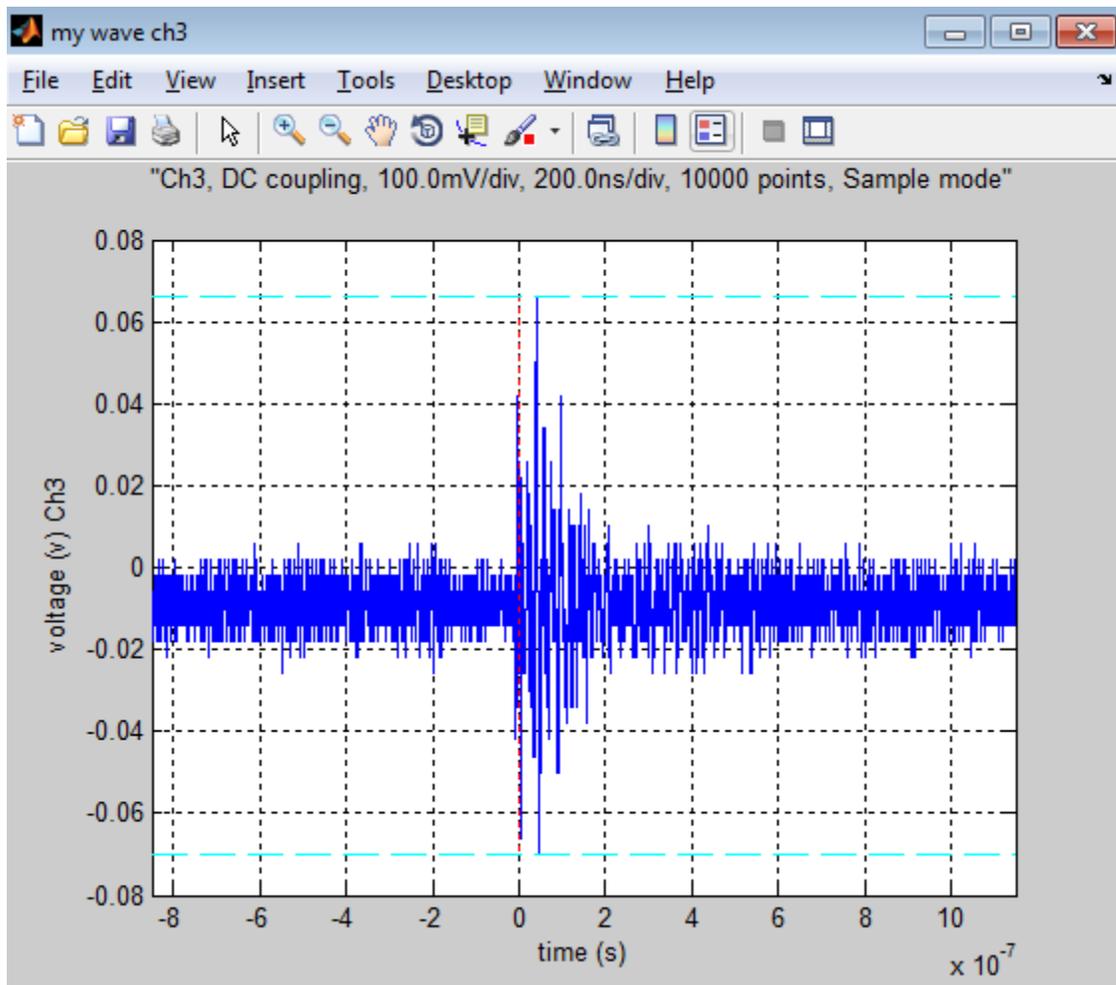


Figura No. 73. Tercer monitoreo del Transformador Fase A Reserva.

En las Figuras 72 y 73 se observa un pequeño incremento de la magnitud de la señal, lo cual nos hace ver que existe una descarga parcial, por lo que se sugirió al personal se tenga en observación el transformador, se le realice una nueva cromatografía y se programe un nuevo monitoreo en 6 meses, para ver la evolución.

Se detecta la presencia constante de la señal, al tiempo que al realizar un monitoreo continuo se veía que en ciertas ocasiones desaparecía y volvía a aparecer con la misma amplitud. Este comportamiento es característico de una descarga corona.

Así mismo la empresa, por medio del Laboratorio de Pruebas y Materiales (LAPEM), realizó una prueba de detección de coronas en las terminales, aisladores y boquillas conectadas al transformador. Dicha prueba fue realizada con una cámara de detección de corona, con patente militar de Estados Unidos, por lo que es información confidencial. Al emitir sus resultados, concluyeron que efectivamente existe la presencia de descargas corona, proporcionando la imagen que se muestra a continuación, en la cual se observan coronas mostradas por las partes más luminosas.

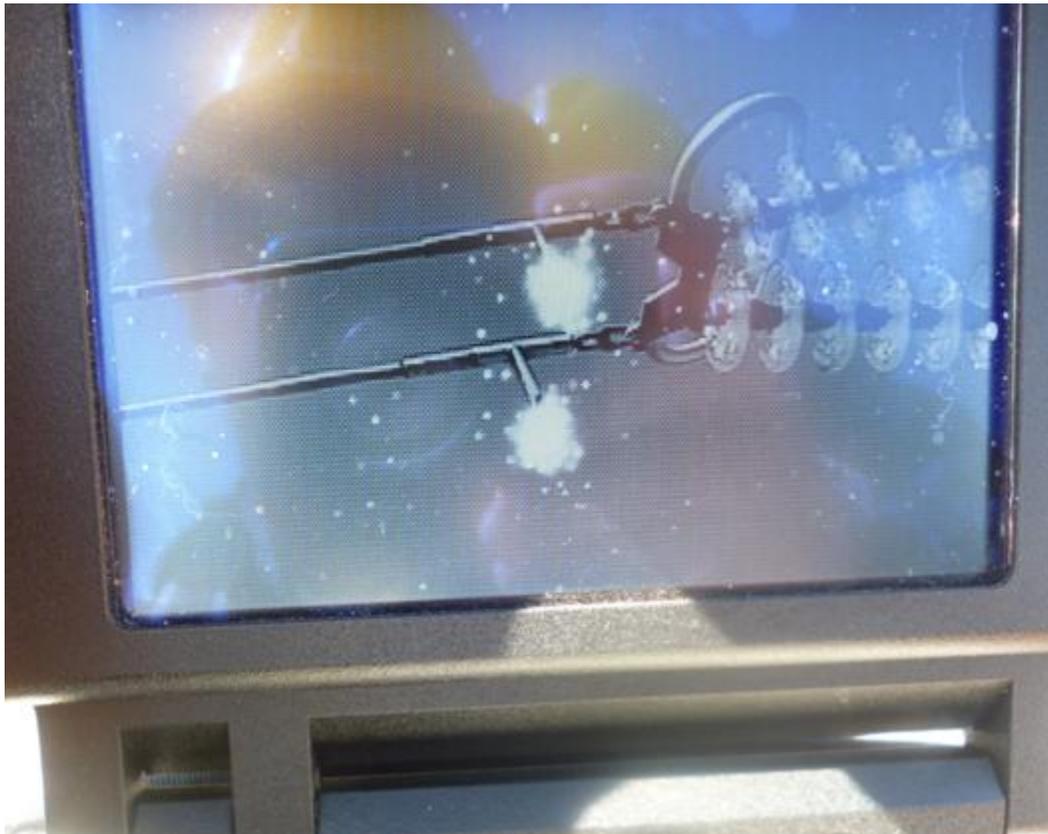


Figura No. 74. Descarga Corona detectada por medio de la Cámara de Coronas en los aisladores del Transformador.

En la siguiente figura se muestra el mismo punto donde se detectó la corona pero tomada con una cámara convencional.

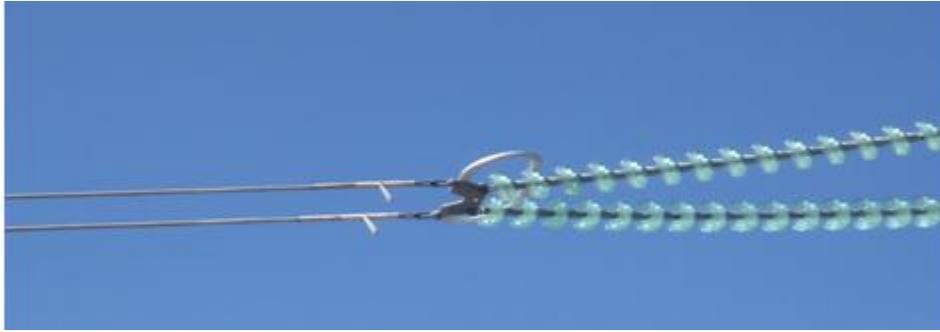


Figura No. 75. Imagen de los Aisladores del Transformador captada sin la cámara corona.

Con lo anterior y con las pruebas realizadas anteriormente se comprueba la existencia de descargas parciales y descarga corona, corroborando nuestro diagnóstico, por lo que se sugirió al personal llevar a cabo un monitoreo del transformador y realizar el mantenimiento correspondiente. Por parte de la empresa se realizará una cromatografía de gases en 6 meses, tiempo en el cual se vigilará el comportamiento del transformador y del banco.

CAPÍTULO 5:

Análisis de las señales.

5.1 Localización de descargas Parciales.

Como se mencionó en el Capítulo 3, la localización de las descargas parciales es de gran importancia para la investigación, ya que, sabiendo las coordenadas de la descarga, es posible determinar qué equipo requiere un monitoreo constante y, en algunos casos, un mantenimiento preventivo, evitando así una falla.

Si por la presencia de una descarga parcial en uno de los equipos primarios como el Interruptor de Potencia o el Transformador, falla una subestación, implicaría que una gran parte de la población se quede sin energía, lo que se traduce en pérdidas económicas. Si por el contrario, se detecta una señal característica de una descarga parcial, se analiza y se realiza la localización, es posible prever este escenario, evitando así un problema mayor.

Se debe recordar que el proceso de la descarga parcial es evolutivo, es decir, en el momento en que se detecta no es posible saber el grado de evolución de la descarga, puede ser que ya se estuviese formando tiempo atrás. Incluso puede resultar que la descarga se iniciara en ése momento. El problema es saber si se va a generar una falla catastrófica, o de si se tiene tiempo suficiente para corregir el problema.

Como se ve, no solo se trata de la captura de las señales, sino de analizarlas y presentar un resultado. Es en este escenario en el que la localización de la descarga juega un papel importante, ya que nos es posible determinar qué equipo presenta problemas, llevarle un seguimiento y, de ser necesario, sustituirlo por uno nuevo.

Se realizaron varias pruebas de localización en las subestaciones Coyoacán, Puebla II y Querétaro. A continuación se muestran algunos análisis de las señales.

Prueba de localización en la SE Puebla II.

Al tener la metodología definida, el reto era ser capaces de detectar una señal y poder localizar su emisión, sin importar la ubicación que se tuvieran de las antenas, la única condición es que las antenas estuviesen equidistantes entre sí, sin tomar ningún punto de referencia ni saber la distancia de las antenas con respecto al Interruptor de potencia ni a las cuchillas, por lo que se realizó el siguiente arreglo.

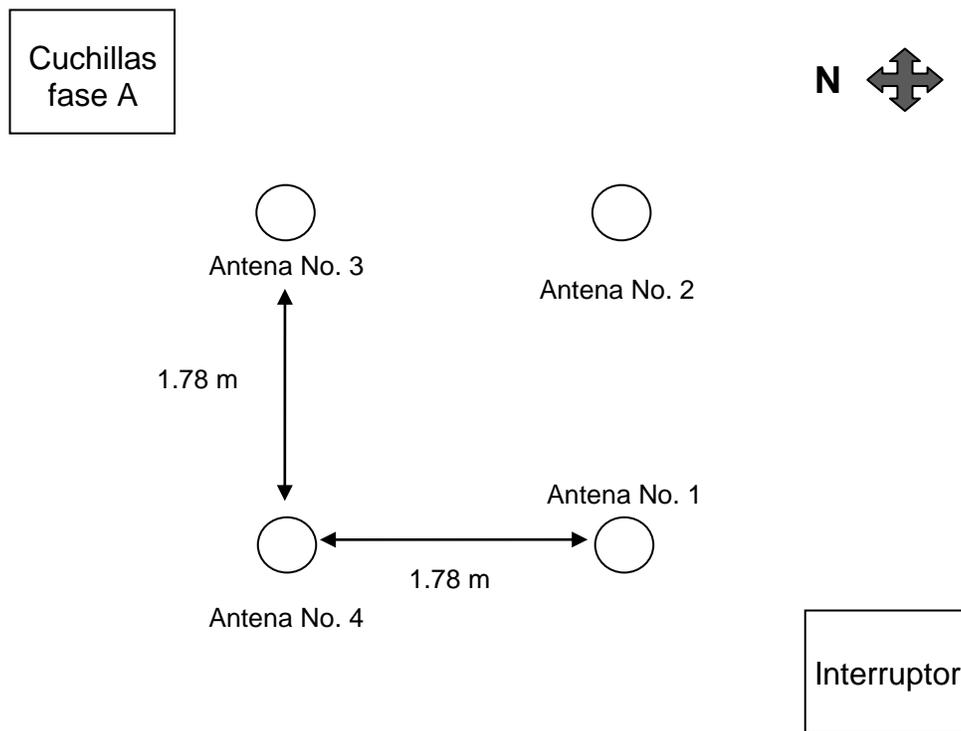


Figura No. 76. Esquema de la distribución de las antenas en la SE Puebla para realizar la localización de las maniobras de apertura – cierre de cuchillas.

Al iniciar la prueba de captura de la maniobra de Apertura – Cierre de cuchillas, se inicia el análisis de las señales. Se comienza por analizar cada uno de los espectros que se tienen y determinar los tiempos de arribo de la señal. Se inicia el programa de localización y el resultado fue, como se mostró en el Capítulo 3 de:

X= 9,22 m.

Y= 7,87 m

Z= 10,88 m

Con estos resultados se realiza la localización en campo, dando exactamente la distancia de la antena No. 3 que fue la primera en captar la señal a las cuchillas. Dicho resultado se representa en la siguiente figura, la cual es un esquema que muestra cómo se interpretaron los resultados.

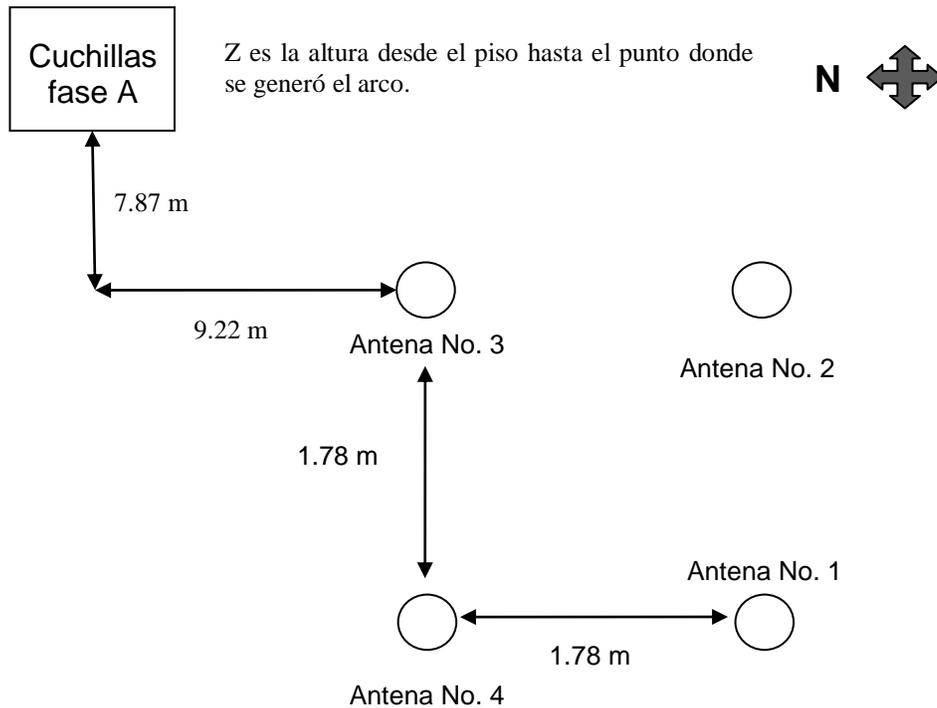


Figura No. 77. Esquema de la localización de la descarga generada por la maniobra de apertura – cierre de cuchillas.

Esta prueba se realizó 5 veces, en las tres cuchillas. Todos los resultados fueron satisfactorios dando solo en la cuchilla de fase C una discrepancia de alrededor 3m de su origen. Con esto se puso a punto el sistema de localización y se comenzó a realizar más capturas para analizar el tiempo de arribo de la señal y localizar la descarga.

Localización en la SE Coyoacán.

Para la localización en Coyoacán se colocaron a las antenas a una distancia de 1.10 m de separación entre ellas, la distribución en la subestación se muestra en la siguiente Figura. El trabajo en Coyoacán era el monitorear toda la subestación para estar atentos a una variación de la señal. Se detecta una señal que sobrepasa nuestro nivel y de ruido de la subestación con un patrón característico de descarga de inmediato se realizó la localización. Mientras se realiza el análisis, se pide informes al personal de la subestación para saber si se realizó alguna maniobra importante. Se nos informa del cierre de cuchillas en el lado de 23 kV.



Figura No. 78. Colocación de las antenas para inicio de maniobras.

La localización se realiza como se muestra en la Figura No. 80. Un ejemplo de adquisición de los tiempos de arribo utilizados para la localización de ésta señal se muestra en la figura No. 79, donde se observa un recuadro en medio de la pantalla con la coordenada en el eje X, que representa el tiempo de la señal.

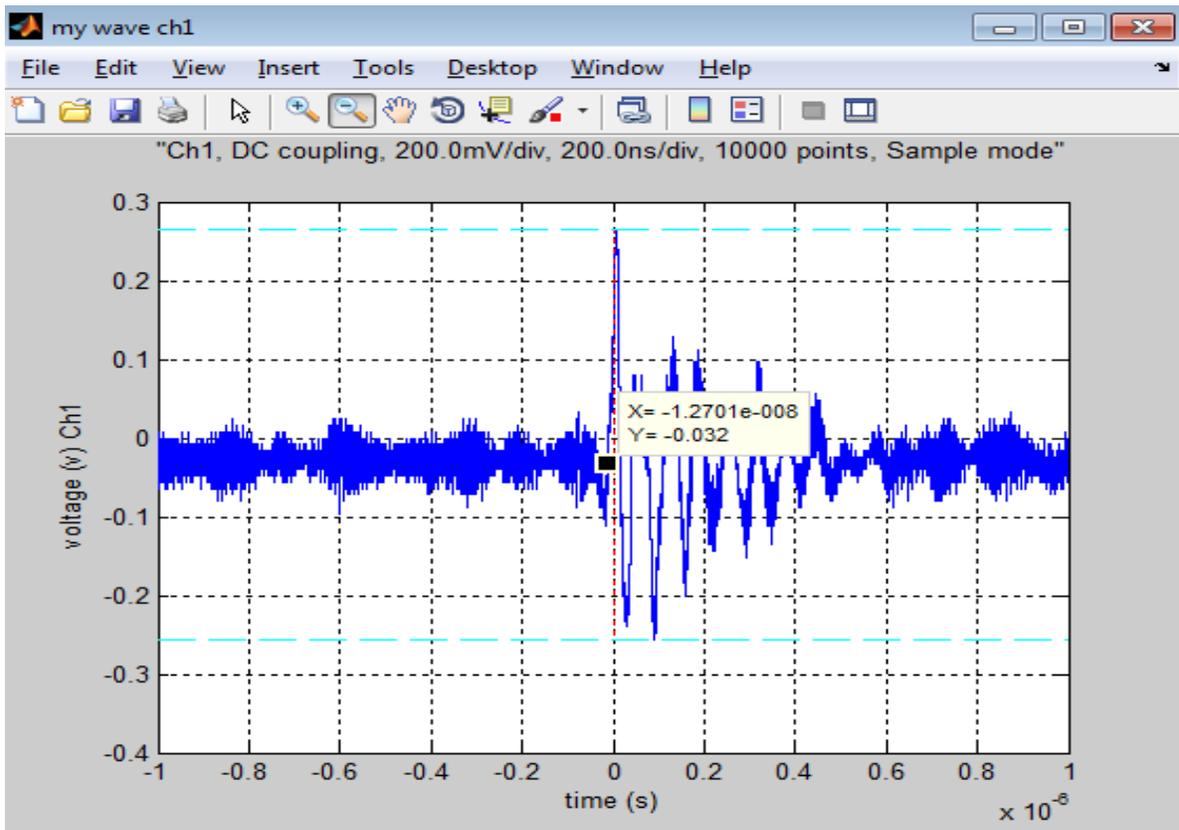


Figura No. 79. Ejemplo de tiempo de arribo. Este tiempo se utilizó para realizar la localización de la descarga parcial desconocida.

Como se explicó en el capítulo 4, la señal tiene la característica de ser en forma de flecha, lo que indica la presencia de una descarga. El patrón de la señal indica que se realizó una operación de cierre, ya que en un inicio, donde se encuentra el recuadro negro, se tiene un pequeño pico que indica el inicio del proceso de ionización de la descarga.

Conforme se van acercando los electrodos se inicia el proceso de pre descarga con la presencia de coronas en los extremos. Cuando el campo interno aumenta, se genera un aumento en los electrones producto de la avalancha electrónica (primer coeficiente de Townsend). Conforme pasa el tiempo, se inicia la producción de *streamers* que son las flámulas o canales ionizados. Por último se produce la descarga completa, la cual está representada por el pico máximo de la Figura 79.

Conforme se van cerrando los contactos, la descarga tiende a disminuir su amplitud debido a que se va perdiendo el campo interno, al tiempo que el medio de extinción de arco, elimina la posibilidad de que la descarga se mantenga constante, a tal punto de que desaparece, como se muestra en la punta de la descarga en 0.6×10^{-6} s.

Una vez teniendo los datos se introducen en el programa, como se muestra en la siguiente figura donde se observa las coordenadas de las antenas y los tiempos de arribo utilizados para su localización.

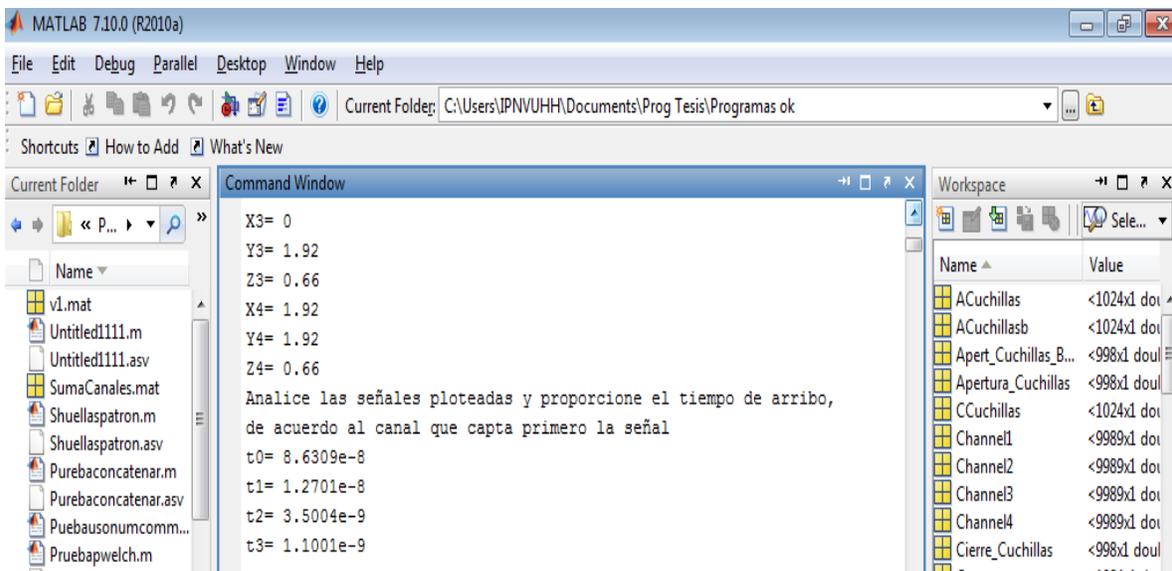


Figura No. 80. Tiempos de arribo y coordenadas de la señal ordenados de acuerdo a cual es captado primero hasta el último.

Una vez proporcionados los datos, el programa arroja una coordenada (4.53, 23.07, 10.41), tal como se muestra en la siguiente figura. Al corroborar con el personal de la Subestación, y al realizar la medición de acuerdo a la coordenada, se demostró que la señal fue localizada en el punto en el que se realizó la maniobra en el lado de 23 kV, por lo cual se demuestra la funcionalidad del sistema y su eficiencia al detectar y localizar descargas.

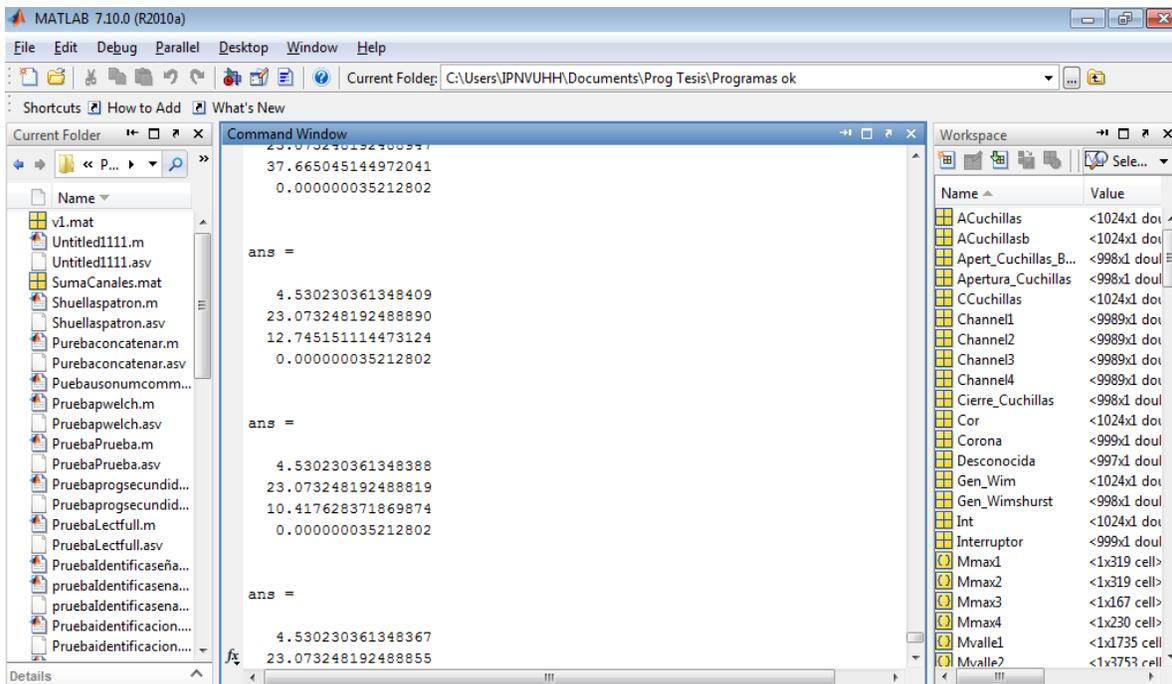


Figura No. 81. Coordenadas de localización de la descarga desconocida, la cual concuerda con la ubicación de las maniobras realizadas en el lado de 23 kV.

Localización en SE Querétaro Potencia.

Un fenómeno interesante pasó al realizar el trabajo de campo en la subestación Querétaro. Al colocar y conectar el equipo, de inmediato se detectó una señal grande característica de las descargas parciales en el Transformador de la Fase B. LA señal captada se muestra en la siguiente figura.

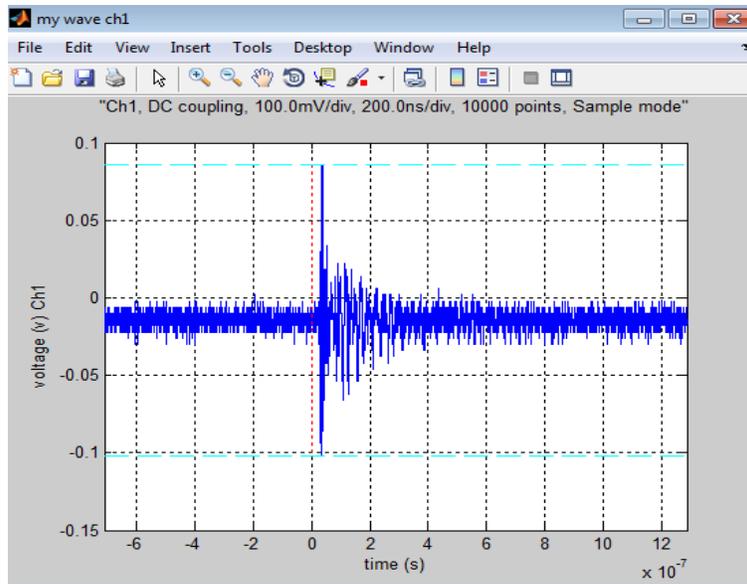


Figura No. 82. Señal de descarga parcial capturada en el transformador de la fase B.

Por la experiencia que se tiene por trabajos realizados previamente en otras subestaciones, ésta señal es característica de la presencia de descargas parciales. Si se observa la figura se puede apreciar un pico de señal de alrededor de 100×10^{-3} V. de inmediato se continuó monitoreando de cerca el banco de transformación, al tiempo que se realizó un análisis de las señales captadas para determinar su localización, es decir, determinar la fuente que generó la descarga. Para determinar su localización se debió tomar en cuenta la ubicación de las antenas con respecto al transformador. Un esquema de la ubicación de las antenas se muestra en la figura No. 83 en donde, la Antena No. 1 es nuestra referencia o coordenada (0, 0), la antena 2 tiene una coordenada de (8.5, 0), la coordenada de la antena 3 es (8.5, 8.1) y la antena 4 de (0,8.1).

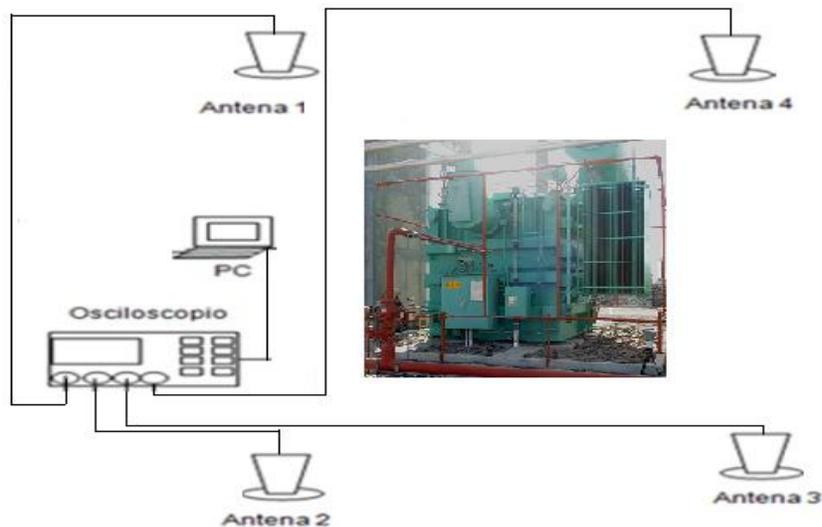


Figura No. 83. Esquema de ubicación de las antenas alrededor del Transformado de la fase B en la Subestación Querétaro Potencia.

De acuerdo con la ubicación de las antenas, la señal emitida por la descarga parcial en el equipo llega a diferente tiempo a las antenas. Este tiempo de arribo, que nosotros denominamos *Tiempo de Retardo*, depende de qué antena se encuentra más cercana a la fuente, de tal modo que la antena que se encuentre más alejada será aquella antena que recibirá por último la señal de la descarga. Las capturas del evento en el TR 2 son analizadas para adquirir su tiempo de arribo, como se muestran a continuación.

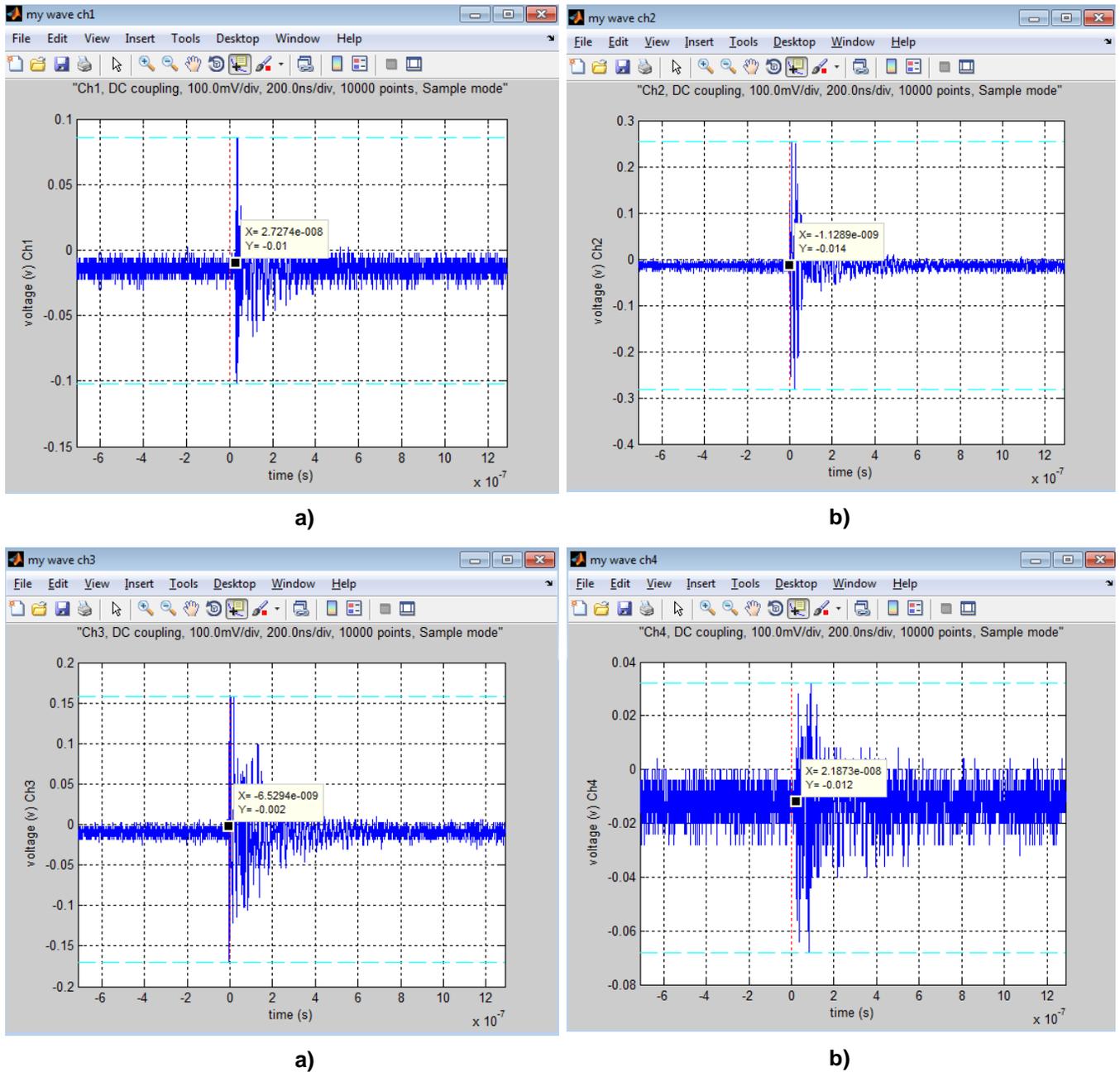


Figura No. 84. Análisis de las señales; a) tiempo de arribo del canal 1 del osciloscopio, tiempo de arribo del canal 2, obtención del tiempo de arribo del canal 3, tiempo de arribo del canal 4.

Se obtienen los siguientes tiempos de arribo: $t_0=2.7274e^{-8}$; $t_1=2.1873e^{-8}$; $t_2=6.5294e^{-9}$; $t_3=1.1289e^{-9}$. Realizando nuestra localización del programa, como se observa en la siguiente figura, da como resultado una coordenada en X= 4.84 m, Y=4,24 m, lo cual concuerda con la ubicación de la boquilla del transformador.

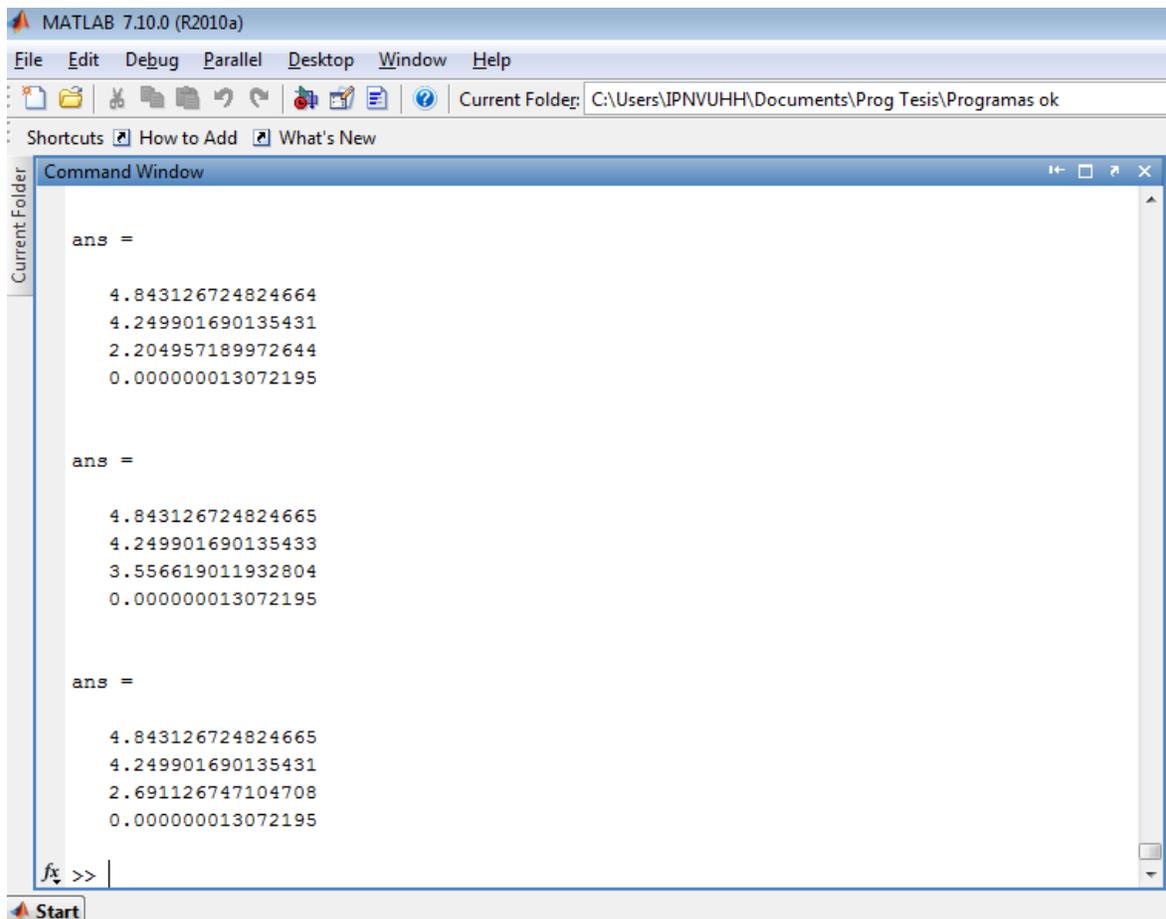
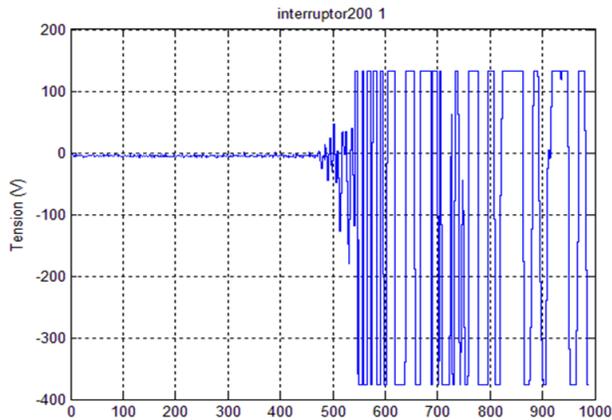


Figura No. 85. Resultado de la localización de la señal. Se observan varias respuestas porque es un programa con iteraciones, cuando se obtiene el resultado eficaz de acuerdo a los parámetros establecidos de error, entonces se arroja el resultado.

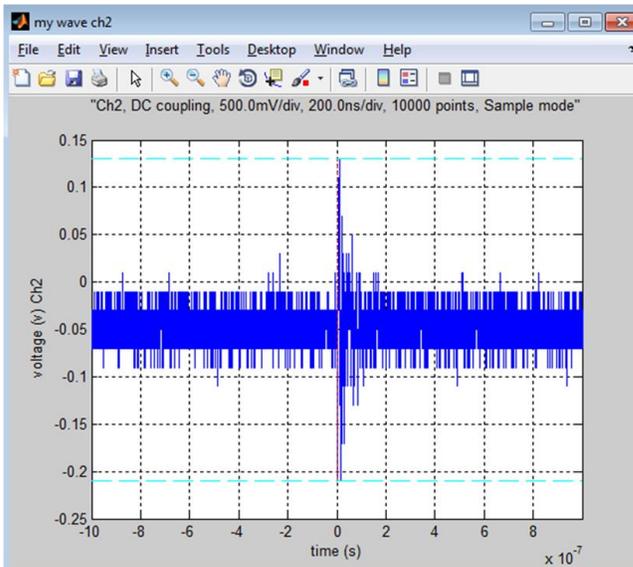
5.2 Análisis de señales.

La experiencia de campo ha sido muy enriquecedora, ya que proporciona la oportunidad de comparar las señales de los equipos primarios en SF₆, tanto en subestaciones encapsuladas como intemperie. Dichas señales serán comparadas a continuación para realizar el análisis correspondiente.

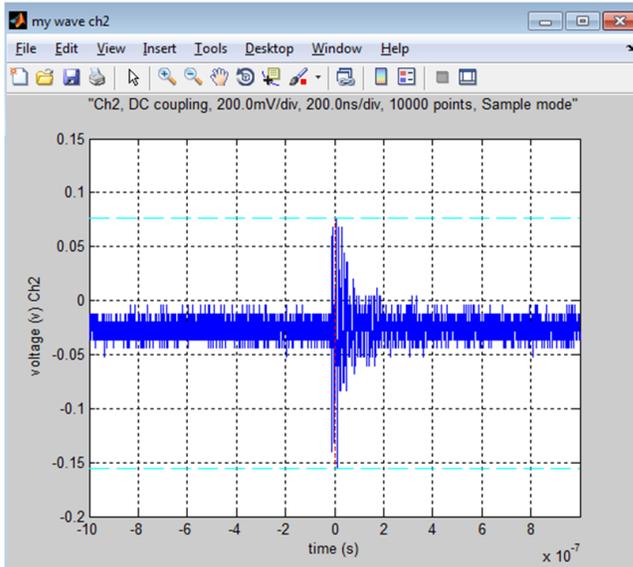
Señales de Interruptor de potencia.



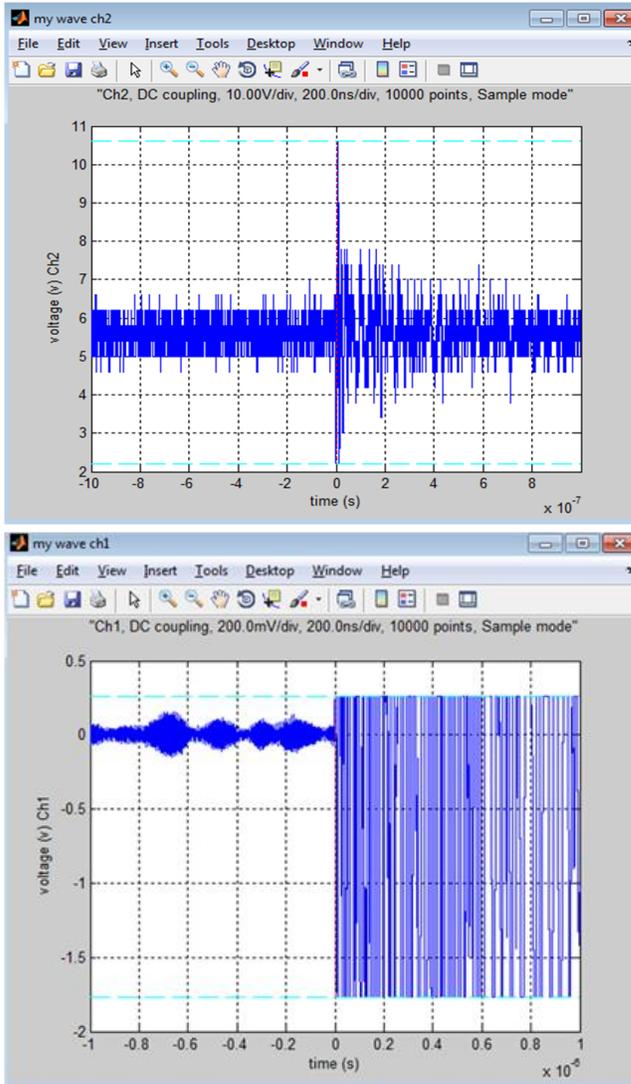
Señal de cierre de Interruptor de potencia en SF₆ de 230 kV con carga, SE Texcoco.



Señal de cierre de Interruptor de potencia en SF₆ de 400 kV sin carga, SE Puebla II.



Señal de apertura de Interruptor de potencia en SF₆ de 400 kV sin carga, SE



Señal de cierre de Interruptor de potencia en SF₆ de 400 kV con carga, SE Puebla II.

Señal de cierre de Interruptor de potencia en SF₆ de 400 kV sin carga, subestación GIS Coyoacán

Figura No. 86. Comparación de las distintas señales de Interruptor de potencia.

Tal como se observa en la figura No. 86, las huellas electromagnéticas del interruptor de Potencia varían de acuerdo a la atenuación de la señal, la tensión de operación, si es apertura y/o cierre, si se trata de una maniobra con o sin carga y las características de la subestación (si es encapsulada o a la intemperie).

En las figuras del interruptor trabajando en vacío (sin carga), se presentan señales de arcos eléctricos diminutos en el interior. Son señales no vistas anteriormente y por lo más interesantes, porque al mismo tiempo que guardamos su comportamiento, nos permite iniciar una nueva investigación sobre el estado de los Interruptores en las Subestaciones.

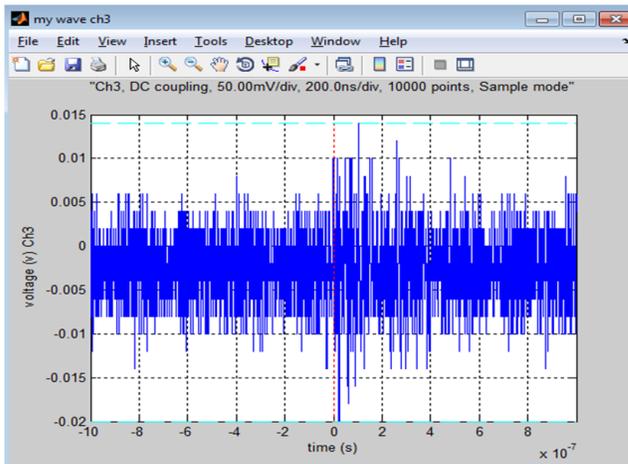
Si se analizan detalladamente la tercer y cuarta señal de la figura anterior, se observa un arco eléctrico de una magnitud considerable para estar operando al vacío, su magnitud es de 140mV, la cual es mayor en comparación con la cuarta señal mostrada en la Figura No. 86, que presenta un pico de 50mV en la que se registró la apertura. Si bien es cierto que los V/Div en ambas figuras son diferentes, eso se debe a la emisión generada por el equipo; en definitiva, se observa que la operación de cierre emite una señal de mayor tamaño y duración que una señal de apertura.

Dicho comportamiento al vacío puede ser utilizado para cuando sea necesario realizar mantenimiento a los equipos y, si el arco de apertura y cierre del interruptor aumenta, entonces algo está pasando en el interior de la cámara de extinción o en las partes móviles del interruptor, lo cual evitará ponerlo en funcionamiento con dichas fallas y prevendrá la pérdida total del equipo y la salida de la subestación por no haberlo captado antes.

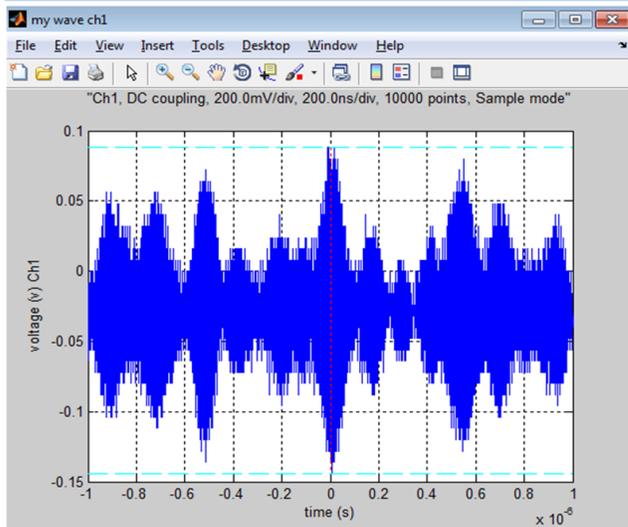
Otro ejemplo de lo anterior se muestra en la última señal de la figura anterior, en la cual se observa la señal captada proveniente del Interruptor de Potencia. Puede observarse que se tenía la señal característica de la Subestación, como se mencionó anteriormente, hasta los 1.3001 ns, tiempo en el cual se tiene una súbita elevación en la amplitud de la señal.

Todas las señales varían en el tiempo de duración y su frecuencia, así como en su magnitud. Si se trata de una operación de cierre, la señal tiende a ser de alta frecuencia porque, conforme se cierran los electrodos, se va aumentando la energía. Si, por el contrario, se trata de una apertura, la señal de la misma será de menor magnitud en comparación con las señales de cierre.

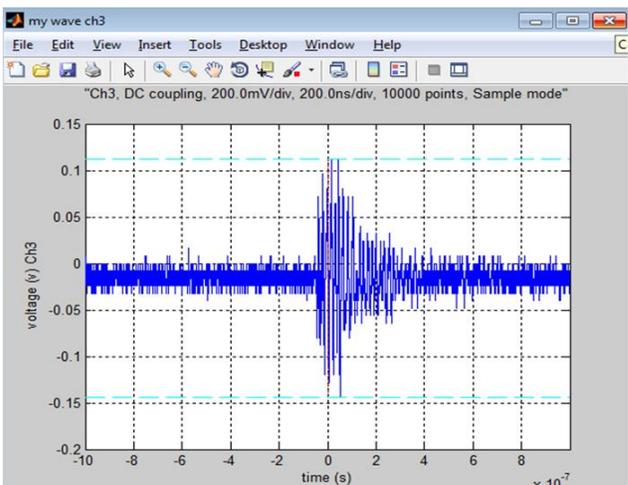
A continuación se presenta las señales de Transformador. Posteriormente, se mostrará el análisis realizado en la SE Querétaro Potencia, debido a la ligera variación de la señal.



Huella electromagnética de Transformador 400/230 kV, subestación Puebla II



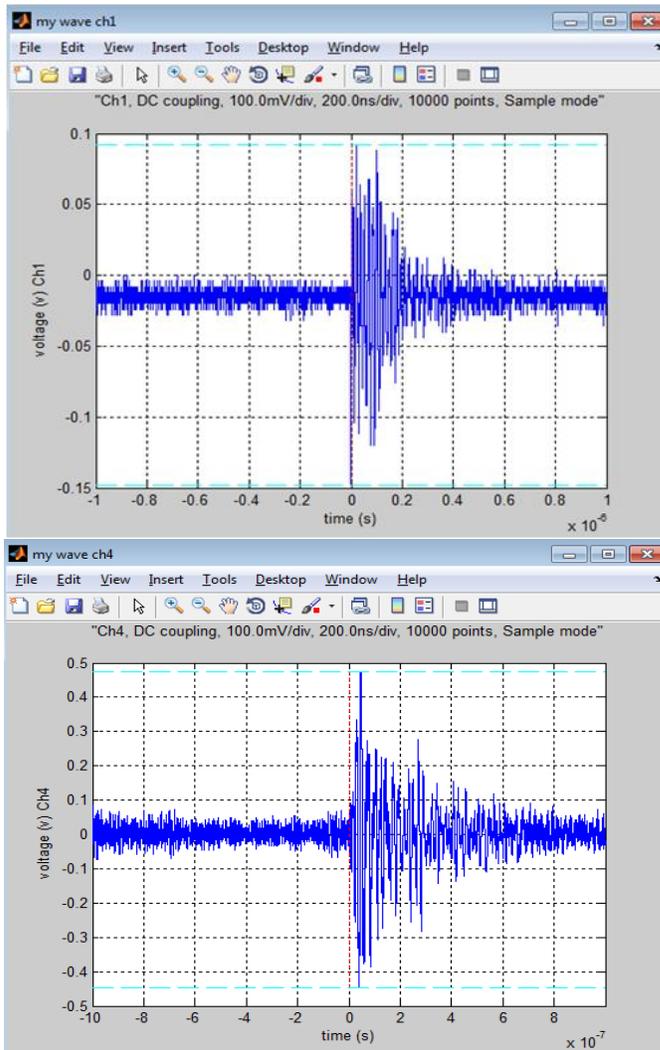
Huella electromagnética de Transformador 230/23 kV, subestación GIS Coyoacán.



Huella electromagnética de Transformador 400/230 kV, subestación Querétaro Potencia.

Figura No. 87. Comparación de las distintas señales de Interruptor de potencia.

En este punto voy a realizar una comparación de señales que se me hace interesante realizar y es con respecto a las señales de presencia de descargas parciales en el interior de un transformador, del cual se habló en la última sección del capítulo 4.



Primer Huella electromagnética de Transformador 400/230 kV, subestación Querétaro Potencia.

Segunda Huella electromagnética de Transformador 400/230 kV, subestación Querétaro Potencia.

Figura No. 88. Comparación de las distintas señales de Interruptor de potencia.

Nuestro mayor interés era el monitoreo del banco de transformador AT2, en especial el transformador No. 4 que es el de reserva. De acuerdo con la cromatografía de gases que se le realizó, el resultado arrojó un valor de 140 ppm de H₂. De acuerdo con la Norma NMX-J-169, el transformador se encuentra en la condición 2, en la que se recomienda un continuo monitoreo para encontrar la razón por la cual se tiene esa cantidad de hidrógeno en su interior.

Sabiendo el resultado de la cromatografía se puso mayor énfasis en el transformador de reserva. La señal captada en dicho transformador se muestra en la primer señal de la figura no. 88., en la cual, se observa una señal con un pico máximo de 90 mV. En lo que respecta a la segunda señal, se observa un incremento de la onda, teniendo su máximo en 490 mV.

Lo anterior indica que el transformador No. 4 del banco AT2 es el que presenta un incremento en su señal. Este resultado, en conjunto con los resultados de la cromatografía de gases nos permite sugerir que se realice un constante monitoreo, de acuerdo a lo sugerido por LAPEM y lo estipulado en las normas correspondientes.

En este capítulo se puede concluir que la detección de las descargas parciales, su localización y análisis fue satisfactoria, la metodología demuestra ser eficaz ya que puede analizarse las señales captadas de una manera más clara, al tiempo que se guardan los datos necesarios para futuros análisis.

Así mismo, como se comprobó en los trabajos de campo de SE Coyoacán y Querétaro Potencia, la metodología descrita en ésta tesis constituyó una herramienta útil para el monitoreo de los equipos e instalaciones de potencia y en la detección de descargas parciales, con lo cual se realiza un monitoreo sobre la evolución de la descarga y, en su caso, realizar un mantenimiento preventivo, evitando que la subestación salga de funcionamiento.

Conclusiones.

Se diseñó, construyó y se puso en operación una metodología para la detección de descargas parciales. Así mismo, se diseñó una comunicación entre el osciloscopio MSO 4104 y la computadora por medio de una conexión USB-USB, permitiendo la captura de las huellas patrón características de los equipos de potencia, al tiempo que se almacena la información, con el fin de crear la base de datos.

Al analizar las señales captadas, se descubre que para obtener la huella patrón de las cuchillas en el lado de alta tensión, es necesario realizar cambios a los ajustes del osciloscopio obtenidos en las pruebas desarrolladas con anterioridad. El ajuste para cuchillas en 400 kV se realiza con una atenuación de $1M\Omega$, 5V/Div y 200ns de tiempo de muestreo.

Para el caso de la señal captada en operación de cierre del Interruptor de Potencia sin carga, se adquiere mejor la señal con un ajuste de 500mV/Div, 200ns de tiempo de muestreo y una atenuación de $1M\Omega$. Para el caso de apertura al vacío, el mejor ajuste es 200mV/div, 200ns y $1M\Omega$ de atenuación. En el caso de operación de cierre con carga, la mejor captura se realizó con $1M\Omega$ de atenuación, 10V/Div y 200ns de tiempo de muestreo.

Se determina al mismo tiempo que para captar señales de las Descarga Corona, es necesario tener un nivel de disparo de 7 V y un tiempo de muestreo de 100 ns. Por lo que queda pendiente obtener la huella de la línea viva y da la torre de transmisión para su futuro análisis.

El estudio de los tiempos de arribo nos permitió poner a prueba el programa de localización de la fuente en la cual se está teniendo la descarga parcial. Al analizar el espectro captado e intentando determinar el tiempo de arribo, se observa que las señales llegan a tiempos diferentes. De acuerdo a la ubicación de las antenas en la subestación y a su conexión en el osciloscopio, es posible determinar la ubicación del equipo que emite las descargas.

Se realizaron pruebas de localización en las SE Puebla II y SE Coyoacán, las cuales arrojaron las coordenadas de la fuente de las señales captadas. Es importante hacer notar que todavía nos falta perfeccionar más el programa, principalmente por la adquisición de los tiempos de arribo. Si los tiempos de arribo son erróneos, el programa no nos dará la localización y, al mismo tiempo, dará unas distancias que no son las correctas.

Se demostró la funcionalidad del programa desarrollado para la comunicación osciloscopio-computadora, logrando el resguardo de los datos de las señales con sus respectivas imágenes sin perder los ajustes del osciloscopio ni combinar las señales, evitando datos falsos. Se enviaron las señales vía internet y fueron analizadas en otra computadora, demostrando que el sistema guarda y envía correctamente las señales captadas por el sistema.

Así mismo, a partir de un sistema establecido [7], se desarrolló una metodología para la obtención de huellas electromagnéticas en equipos e instalaciones de potencia, que ha permitido su aplicación en campo, la cual se explica en el apéndice No. 3

Recomendaciones para trabajos futuros.

Para futuros trabajos sobre el tema se recomienda analizar la manera más eficaz para obtener el punto exacto en el tiempo en el que se inicia la descarga, esto ayudará a obtener una mejor localización, por lo cual, se requerirá un sistema que esté captando las señales en un tiempo determinado, por lo que se recomienda analizar la posibilidad de hacerlo automático y autoejecutable.

Considerar las condiciones climatológicas y los fenómenos físicos en que se encuentran inmersos los equipos, para relacionar cómo son afectados en estas condiciones en su desempeño. Así mismo, se recomienda analizar la creación automática de un reporte de fallas, emitiendo una alerta en el momento en el que se detecte variación en las señales captadas al compararlas con la base de datos.

Bibliografía.

- [1] Natrass David A., “Partial Discharge: The early History of Partial Discharge research”, IEEE Electrical Insulation Magazine, July/August 1993.
- [2] Moore P. J., Portugués I.E., Glover I. A. “A Non-intrusive Partial Discharge Measurement System based on RF Technology”. Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, Toronto, Canada, July 2003.
- [3] Acevedo Javier, “Principios básicos de la detección eléctrica, RFI/EMI y de las descargas parciales”, Congreso Internacional en Alta Tensión y Aislamiento, 23 al 27 de noviembre, Medellín, Colombia, 2009.
- [4] Smith Colin, “Partial Discharge and Insulation failure”, IPEK, Ltd, www.ipek.co.uk, company registration No. 3123703.
- [5] Kuffel E., Zaeng, W. S., ”High Voltage Engineering Fundamentals”, Pergamon Press, UK, 1984.
- [6] CFE, Reporte preliminar del evento ocurrido en la SE Querétaro, Enero 2012.
- [7] <http://www.cfe.gob.mx/QUIENESSOMOS/ESTADISTICAS/Paginas/Estadistica.aspx>
- [8] Torres Peñaloza Diana, “Sistema de localización de descargas parciales”, Tesis de Maestría, IPN, UPIITA, México 2010.
- [9] http://www.ctr.unican.es/asignaturas/instrumentacion_5_IT/GPIB1_04.pdf consultado en Diciembre 2011
- [10] Porfiri Pablo, “Detección, análisis y prevención de fallas en cables subterráneos. Técnicas de Descargas Paciales –Very low frequency- Microscopía digital 3D – Rayos X”. Seminario Internacional de Mantenimiento en Sistemas Eléctricos II SIMSE CIER 2009, Bogotá, Colombia.
- [11] http://patricioconcha.ubb.cl/seminario_descargas_parciales/home.htm consultado en Diciembre 2011
- [12] Watson D. B., L. Ma, “Investigation of impulse spark trajectory in air between hemispherically-ended rod and plane electrode”. IEE proc. Set. Meas. Technol. Vol. 143 No. 2 March, 1996.
- [13] Ramirez Pacheco Carlos, “Radiometric Partial Discharge Characterization”, Tesis Doctoral, Glasgow, 2007.
- [14] Johns A. T., Warne D. F., “Advances in high voltage engineering”, IEE collections, UK, 2004.

- [15] IEC 60270. High Voltage test techniques, Partial Discharge Measurement, March 2001.
- [16] Hau Hernández Victor Uriel, Mendoza Gonzalez Daniel, “Diagnóstico de fallas eléctricas en Interruptores de Potencia mediante el procesamiento digital de imágenes”, Tesis de ingeniería, IPN, ESIME, 2009.
- [17] Holthausen J. P., Vosloo W. L., “High voltage Engineering practice and theory”, <http://www.dbc.wroc.pl/Content/3458/High+Voltage+Engineering.pdf> consultado en Diciembre 2011
- [18] Lazarevich Alison K., “Partial Discharge Detection and Location in High Voltage Transformers using an Optical Acoustic Sensor”, Master Thesis, Blacksburg, Virginia, U.S.A., May 12, 2003.
- [19] IEC standard 60071-1. Insulation co-ordination, Definitions principles and rules.
- [20] IEC standard 60071-2. Insulation co-ordination, Application Guide.
- [21] Hileman Andrew R., “Insulation coordination for power systems”, Markel Dekker, 1999.
- [22] Fink Donald G., Beaty H. Wayne, “Manual de Ingeniería Eléctrica” Tomo1, Decimotercera edición, Mc Graw Hill, México 2008.
- [23] Chambolla Paul Bautista, “Medición de Descargas Parciales: técnicas de alta tensión”, Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica UNAS, Perú.
- [24] Dharm, “Breakdown mechanism of gaseous, liquid and solid material”, High Voltage Engineering, articulo: Dharm N-HIGH\HG1-1.PM5 2. <http://www.newagepublishers.com/samplechapter/000357.pdf> consultado en Diciembre 2011
- [25] Moore P. J., Portugués I., Glover I. A., a Non-Intrusive Partial Discharge Measurement System based on RF Technology.
- [26] Centro de formación Schneider, “Medición del Nivel de Descargas Parciales”, Publicación Técnica Schneider PT-069, Barcelona España, Mayo 2000.
- [27] Prieto García Carlos, “El mantenimiento en las redes de distribución de Energía Eléctrica en Media Tensión”, trabajo de fin de curso de experto universitario en mantenimiento predictivo y diagnosis de fallos, 2006-2007, http://www.aloj.us.es/notas_tecnicas/Mantenimiento_Redes_Distribucion_Energia_Electrica_MT.pdf consultado en Diciembre 2011
- [28] Satish L., Gururaj B. I., “Partial discharge pattern classification using multilayer neural networks”, Journal Article Institution of Electrical Engineers (IEE), September 2010.

- [29] Carvajal Martínez Francisco Antonio, “Diagnostico en línea de motores de gran capacidad mediante la detección de descargas parciales utilizando técnicas de banda ultra ancha (UWB)”, Tesis de Maestría, IPN-ESIME, México, 2003.
- [30] OMICROM, Sistema de medición de descargas parciales MPD 500 para aplicaciones de pruebas rutinarias.
- [31] INDUCOR, Electrical Testing Group, Ensayo de Descargas Parciales en Transformadores, CRE-Bolivia.
- [32] http://www.doble-lemke.eu/en/Products/Partial_Discharge/LDS-6_UHF.html consultado en Agosto 2011
- [33] <http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/624/13/Cap3.pdf> consultado en Agosto 2011
- [34] NMX-J-169-ANCE
- [35] Wilson John, “Partial discharge analysis. Ultrasonic techniques to evaluate Partial Discharge in electric machinery”, SKF reliability systems, San Diego, California, USA, September 2004.
- [36] Moore P. J., Bartlett E. J., Vaughan M., “Investigation into electromagnetic emissions from power system arcs”, Department of Electronic & Electrical Engineering, University of Bath, UK.
- [37] Peter C.J., M. Van Der Wielen, Jeroen Veen, Peter A.A.F. Wouters, E. Fred Steenis, “On-Line partial discharge detection of MV cables with defect localization (PDOL) based on two time Synchronized sensor”, 18th International Conference of Electricity Distribution, Turin, 6-9 June, 2005.
- [38] Zargari Abbas, Blackburn Trevor R., “Application of Optical Fiber Sensor for Partial Discharge Detection in High voltage power equipment”.
- [39] Moore P. J., Bartlett E. J., “Experimental investigation into VHF electromagnetic radiation from power system arcs”, Department of Electronic & Electrical Engineering, University of Bath, UK.
- [40] Shamir Ramli Mohd, “Investigation of circuit breaker switching transients for shunts reactors and shunts capacitors”, Master Thesis, school of engineering systems, faculty of Built environment of engineering, Queensland University of Technology, 2008.
- [41] Moore P. J., “Radiometric Measurement of Circuit Breaker Interpole Switching Times” IEEE Transactions of power delivery, vol. 19(3), July 2004.
- [42] www.elimpus.com consultado en Agosto 2011

- [43] Warren Stutzman L., “Antenna theory and design”, 2nd edition Jhon Wiley & Sons, Co., New York, 1998.
- [44] http://www.mathworks.com/programs/matlab_cd/index.html consultado en Noviembre 2011
- [45] MSO 4000B and DPO 4000B Series digital phosphor oscilloscopes User Manual.
- [46] Tektronix oscilloscope control program forum: www.tek.com/forum consultado en Junio 2011
- [47] www.dropbox.com consultado en Enero 2011
- [48] <http://users.roman.edu/~polikar/WAVELETS/WTtutorial.html> consultado en Octubre 2011
- [49] www.diac.upm.es/acceso_profesores/.../transformadas/.../hadamard.d. consultado en Octubre 2011
- [50] Gonzalez Rafael C., Woods Richard E., “Digital Image Processing”, Third Edition, Pearson education. 2008.
- [51] Johnson Jeremy, Püschel Marcu, “In search of the optimal Walsh Hadamard Transform”, Drexel University and Canegie Mellon University, USA,
- [52] Annamária R. Varkonyi-Kóczy, Multi-sine synthesis and analysis via Walsh-Hadamard Transformation, Department of Measurement and Instrument Engineering, University of Budapest, Hungary.
- [53] <http://www.mathworks.com/products/signal/demos.html?file=/products/demos/shipping/signal/walshhadamarddemo.html> consultado en Octubre 2011
- [54] Petrou Maria, Petrou Costas, “Image Processing. The fundamentals”, second edition, Wiley, 2010
- [55] Bertran Albertí Eduard, “procesado digital de señales fundamentos para comunicaciones y control II”, Ediciones UPC Primera edición, España, 2006.
- [56] Nuñez Domínguez Arturo, “Técnica ultrasónica para la detección y localización de descargas parciales en transformadores de potencia”, Tesis de licenciatura, México DF, 1999.
- [57] Moore P. J., Portugues E., Glover A., “Radiometric location of partial discharge sources on energized High Voltage plant”, IEEE transactions on power delivery, vol. 20, No. 3, July 2005.
- [58] MATLAB licencia 561329, Clave de Cliente: IPN.

Apéndice 1.

A continuación se muestra el código fuente del programa de comunicación con el osciloscopio.

```
nombre=input('Cual es el nombre del archivo: ','s');
folder=nombre;
hoja=1;
% inicio='C:\Users\IPNVUHH\Dropbox\Señales\';
inicio='';
simbol='\';
exc='.xls';
fig='wfmgraph1';
fig2='wfmgraph2';
fig3='wfmgraph3';
fig4='wfmgraph4';
file=strcat(inicio, folder, simbol, folder, exc); %Direccion para
generar el archivo de excel
path=strcat(inicio, folder, simbol, fig); % Dirección para
guardar las figuras
path2=strcat(inicio, folder, simbol, fig2);
path3=strcat(inicio, folder, simbol, fig3);
path4=strcat(inicio, folder, simbol, fig4);
mkdir(inicio, folder); % Comando que me permite la creación
de la carpeta

%% variables
visa_brand = 'tek';
visa_address = '';
buffer = 20 * 1024;

%% Codigo
dpo =
visa(visa_brand,visa_address,'InputBufferSize',buffer,'Output
BufferSize',buffer);
fopen(dpo);

query(dpo, '*idn?;')
query(dpo, '*esr?;')
if ans ~= '0'
    query(dpo, ':allev?;')
end

% Obtención del estado del osciloscopio
head = query(dpo, ':head?;');
head = head(end-1);
```

```

fwrite(dpo, ':head 0;*cls;');
[lrn_str bytes warning] = query(dpo, '*lrn?;');
%save dpo4k_spi.lrn lrn_str -ASCII %doesn't work, numerical
data
fid = fopen('dpo4k_spi.lrn', 'wt');
fprintf(fid,lrn_str, '%s');
fclose(fid);

% % Activación y ploteo de señales % %

% Canal 1 (ch1)
query(dpo, ':data:source ch1::data?;') % fuente antes de wfmo
query(dpo, ':wfmo?;')
query(dpo, ':data?;')
recol = query(dpo, ':hor:recol?;'); % Encuentra longitud

fwrite(dpo, [':data:start 1;stop ' recol(1:end-1) ';']);

% Obtención de información de escala vertical
% Canal 1
yof1 = query(dpo, ':wfmo:yof1?;', '%s', '%E');
ymul1 = query(dpo, ':wfmo:ymul?;', '%s', '%E');
yzel1 = query(dpo, ':wfmo:yzel?;', '%s', '%E');
% Obtención de información de escala horizontal
% Canal 1
nrp1 = query(dpo, ':wfmo:nr_p1?;', '%s', '%E');
xin1 = query(dpo, ':wfmo:xin1?;', '%s', '%E');
xzel1 = query(dpo, ':wfmo:xzel?;', '%s', '%E');

% Obtención de valores en cadena

strArray = java_array('java.lang.String', 1);
strArray(1) = java.lang.String(query(dpo, ':wfmo:wfi?;'));
cellArray = cell(strArray);

% Recopilar información de forma de onda

fwrite(dpo, ':curve?;');
wavel = int8(binblockread(dpo, 'int8'));

% Canal 1
scaled_wavel = (double(wavel)-yof1).*ymul1+yzel1;
scaled_time1 = linspace(xzel1,xzel1+(xin1*nrp1),nrp1);

```

```

%% Creación de figuras
% Canal 1
figure;
wfmgraph1 = stairs(scaled_time1,scaled_wavel);
set(1,'NumberTitle','off','Name','my wave ch1');
title(cellArray);
xlabel('time (s)');
ylabel('voltage (v) Ch1');
% ylim([min(scaled_wave) max(scaled_wave)]);
delete(maxline,minline);
xlim([min(scaled_time1) max(scaled_time1)]);
% Anotación de punto de disparo trigger
trigline1 = line([0 0],[max(scaled_wavel)
min(scaled_wavel)],[0 0],'Color','red','LineStyle',':');
% max
maxline1 = line([min(scaled_time1)
max(scaled_time1)],[max(scaled_wavel) max(scaled_wavel)],[0
0],'Color','cyan','LineStyle','--');
% min
minline1 = line([min(scaled_time1)
max(scaled_time1)],[min(scaled_wavel) min(scaled_wavel)],[0
0],'Color','cyan','LineStyle','--');
% Escala
grid on
saveas(wfmgraph1,path,'fig');
delete(1)

% % % % % Canal 2
query(dpo,':data:source ch2::data?;') % Encuentra la fuente
antes de wfmo
query(dpo,':wfmo?;') % wfmo = wait for more objects
query(dpo,':data?;')
recol = query(dpo,':hor:recol?;'); % Encuentra longitud
fwrite(dpo,[':data:start 2;stop ' recol(1:end-1) ';'']);

% Obtención de informacion de escala vertical
yof1 = query(dpo,':wfmo:yof1?;', '%s', '%E');
ymul1 = query(dpo,':wfmo:ymul?;', '%s', '%E');
yzel1 = query(dpo,':wfmo:yzel?;', '%s', '%E');
% Obtención de informacion de escala horizontal
nrp1 = query(dpo,':wfmo:nr_p1?;', '%s', '%E');
xin1 = query(dpo,':wfmo:xin1?;', '%s', '%E');
xzel1 = query(dpo,':wfmo:xzel?;', '%s', '%E');

strArray = java_array('java.lang.String', 1);
strArray(1) = java.lang.String(query(dpo,':wfmo:wfi?;'));
cellArray2 = cell(strArray);

```

```

% Recopilar información de forma de onda
fwrite(dpo, ':curve?;');
wave1 = int8(binblockread(dpo, 'int8'));

scaled_wave2 = (double(wave1)-yof1).*ymul+yzel;
scaled_time2 = linspace(xzel,xzel+(xin1*nrp1),nrp1);

%% Ploteo de la señal del Canal 2
figure;
wfmgraph2 = stairs(scaled_time2,scaled_wave2);
set(1,'NumberTitle','off','Name','my wave ch2');
title(cellArray2);
xlabel('time (s)');
ylabel('voltage (v) Ch2');
% ylim([min(scaled_wave) max(scaled_wave)]);
delete(maxline,minline);
xlim([min(scaled_time2) max(scaled_time2)]);
% trigger point annotation
trigline2 = line([0 0],[max(scaled_wave2)
min(scaled_wave2)],[0 0],'Color','red','LineStyle',':');
% max
maxline2 = line([min(scaled_time2)
max(scaled_time2)],[max(scaled_wave2) max(scaled_wave2)],[0
0],'Color','cyan','LineStyle','--');
% min
minline2 = line([min(scaled_time2)
max(scaled_time2)],[min(scaled_wave2) min(scaled_wave2)],[0
0],'Color','cyan','LineStyle','--');
% Escala
grid on
saveas(wfmgraph2,path2,'fig');
delete(1)
% % % % % Canal 3 Ch3
query(dpo, ':data:source ch3::data?;') % Encuentra la fuente
antes de wfmo
query(dpo, ':wfmo?;') % wfmo = wait for more objects
query(dpo, ':data?;')
recol = query(dpo, ':hor:recol?;'); % Encuentra longitud
fwrite(dpo,[':data:start 3;stop ' recol(1:end-1) ';']);

% Obtención de información de escala vertical
yof1 = query(dpo, ':wfmo:yof1?;', '%s', '%E');
ymul = query(dpo, ':wfmo:ymul?;', '%s', '%E');
yzel = query(dpo, ':wfmo:yzel?;', '%s', '%E');

```

```

% Obtención de información de escala horizontal
nrp1 = query(dpo, ':wfmo:nr_p1?;', '%s', '%E');
xin1 = query(dpo, ':wfmo:xin1?;', '%s', '%E');
xze1 = query(dpo, ':wfmo:xze1?;', '%s', '%E');

strArray = java_array('java.lang.String', 1);
strArray(1) = java.lang.String(query(dpo, ':wfmo:wfi?;'));
cellArray3 = cell(strArray);

% Recopilar información de forma de onda
fwrite(dpo, ':curve?;');
wave1 = int8(binblockread(dpo, 'int8'));

scaled_wave3 = (double(wave1)-yof1).*ymu1+yzel;
scaled_time3 = linspace(xze1,xze1+(xin1*nrp1),nrp1);

%% Ploteo de la señal del Canal 3
figure;
wfmgraph3 = stairs(scaled_time3,scaled_wave3);
set(1,'NumberTitle','off','Name','my wave ch3');
title(cellArray3);
xlabel('time (s)');
ylabel('voltage (v) Ch3');
% ylim([min(scaled_wave) max(scaled_wave)]);
delete(maxline,minline);
xlim([min(scaled_time3) max(scaled_time3)]);
% trigger point annotation
trigline3 = line([0 0],[max(scaled_wave3)
min(scaled_wave3)],[0 0],'Color','red','LineStyle',':');
% max
maxline3 = line([min(scaled_time3)
max(scaled_time3)],[max(scaled_wave3) max(scaled_wave3)],[0
0],'Color','cyan','LineStyle','--');
% min
minline3 = line([min(scaled_time3)
max(scaled_time3)],[min(scaled_wave3) min(scaled_wave3)],[0
0],'Color','cyan','LineStyle','--');
% Escala
grid on
saveas(wfmgraph3,path3,'fig');
delete(1)

% % % % Canal 4 (ch4)
query(dpo, ':data:source ch4::data?;') % Encuentra la fuente
antes de wfmo
query(dpo, ':wfmo?;') % wfmo = wait for more objects
query(dpo, ':data?;')

```

```

recol = query(dpo, ':hor:recol?;'); % Encuentra longitud
fwrite(dpo, [':data:start 4;stop ' reco1(1:end-1) ';']);

% Obtención de información de escala vertical
yof1 = query(dpo, ':wfmo:yof1?;', '%s', '%E');
ymul1 = query(dpo, ':wfmo:ymul?;', '%s', '%E');
yze1 = query(dpo, ':wfmo:yze1?;', '%s', '%E');
% Obtención de información de escala horizontal
nrp1 = query(dpo, ':wfmo:nr_p1?;', '%s', '%E');
xin1 = query(dpo, ':wfmo:xin1?;', '%s', '%E');
xze1 = query(dpo, ':wfmo:xze1?;', '%s', '%E');

% Obtención de valores en cadena
% detalles4 = query(dpo, ':wfmo:wfi?;');
strArray = java_array('java.lang.String', 1);
strArray(1) = java.lang.String(query(dpo, ':wfmo:wfi?;'));
cellArray4 = cell(strArray);

% Recopilar información de forma de onda
fwrite(dpo, ':curve?;');
wave1 = int8(binblockread(dpo, 'int8'));

scaled_wave4 = (double(wave1)-yof1).*ymul1+yze1;
scaled_time4 = linspace(xze1,xze1+(xin1*nrp1),nrp1);

%% Ploteo de la señal del Canal 4
figure;
wfmgraph4 = stairs(scaled_time4,scaled_wave4);
set(1,'NumberTitle','off','Name','my wave ch4');
title(cellArray4);
xlabel('time (s)');
ylabel('voltage (v) Ch4');
% ylim([min(scaled_wave) max(scaled_wave)]);
delete(maxline,minline);
xlim([min(scaled_time4) max(scaled_time4)]);
% trigger point annotation
trigline4 = line([0 0],[max(scaled_wave4)
min(scaled_wave4)], [0 0], 'Color','red', 'LineStyle',':');
% max
maxline4 = line([min(scaled_time4)
max(scaled_time4)], [max(scaled_wave4) max(scaled_wave4)], [0
0], 'Color','cyan', 'LineStyle','--');
% min
minline4 = line([min(scaled_time4)
max(scaled_time4)], [min(scaled_wave4) min(scaled_wave4)], [0
0], 'Color','cyan', 'LineStyle','--');
% Escala

```



```

if estado4==0
disp('La creacion del archivo ha fallado.');
```

end

```

valo1=trigline1;
[estado5]=xlswrite(file,valo1,hoja,'E2');
```

```

if estado5==0
disp('La creacion del archivo ha fallado.');
```

end

```

valo2=trigline2;
[estado6]=xlswrite(file,valo2,hoja,'F2');
```

```

if estado6==0
disp('La creacion del archivo ha fallado.');
```

end

```

valo3=trigline3;
[estado7]=xlswrite(file,valo3,hoja,'G2');
```

```

if estado7==0
disp('La creacion del archivo ha fallado.');
```

end

```

valo4=trigline4;
[estado8]=xlswrite(file,valo4,hoja,'H2');
```

```

if estado8==0
disp('La creacion del archivo ha fallado.');
```

end

```

valor1=cellArray;
[estado9]=xlswrite(file,valor1,hoja,'I2');
```

```

if estado9==0
disp('La creacion del archivo ha fallado.');
```

end

```

%
valor2=cellArray2;
[estado10]=xlswrite(file,valor2,hoja,'J2');
```

```

if estado10==0
disp('La creacion del archivo ha fallado.');
```

end

```

valor3=cellArray3;
[estado11]=xlswrite(file,valor3,hoja,'K2');

if estado11==0
disp('La creacion del archivo ha fallado.');
```

```

end

valor4=cellArray4;
[estado12]=xlswrite(file,valor4,hoja,'L2');

if estado12==0
disp('La creacion del archivo ha fallado.');
```

```

end

time=scaled_time1';
[estado0]=xlswrite(file,time,hoja,'N2');

if estado0==0
disp('La creacion del archivo ha fallado.');
```

```

end

time2=scaled_time2';
[estadoo2]=xlswrite(file,time2,hoja,'M2');

if estadoo2==0
disp('La creacion del archivo ha fallado.');
```

```

end

time3=scaled_time3';
[estadoo3]=xlswrite(file,time3,hoja,'O2');

if estadoo3==0
disp('La creacion del archivo ha fallado.');
```

```

end

time4=scaled_time4';
[estadoo4]=xlswrite(file,time4,hoja,'P2');

if estadoo4==0
disp('La creacion del archivo ha fallado.');
```

```

end
%% Retorno al dominio del osciloscopio
fwrite(dpo,lrn_str)
if head == '1'
    fwrite(dpo,[':head ' head ';;verb ' verb ';']);
end
delete(instrfindall)

```

Apéndice 2. Huellas electromagnéticas patrón de equipos e instalaciones de potencia.

Huellas patrón de los equipos de la subestación Texcoco.

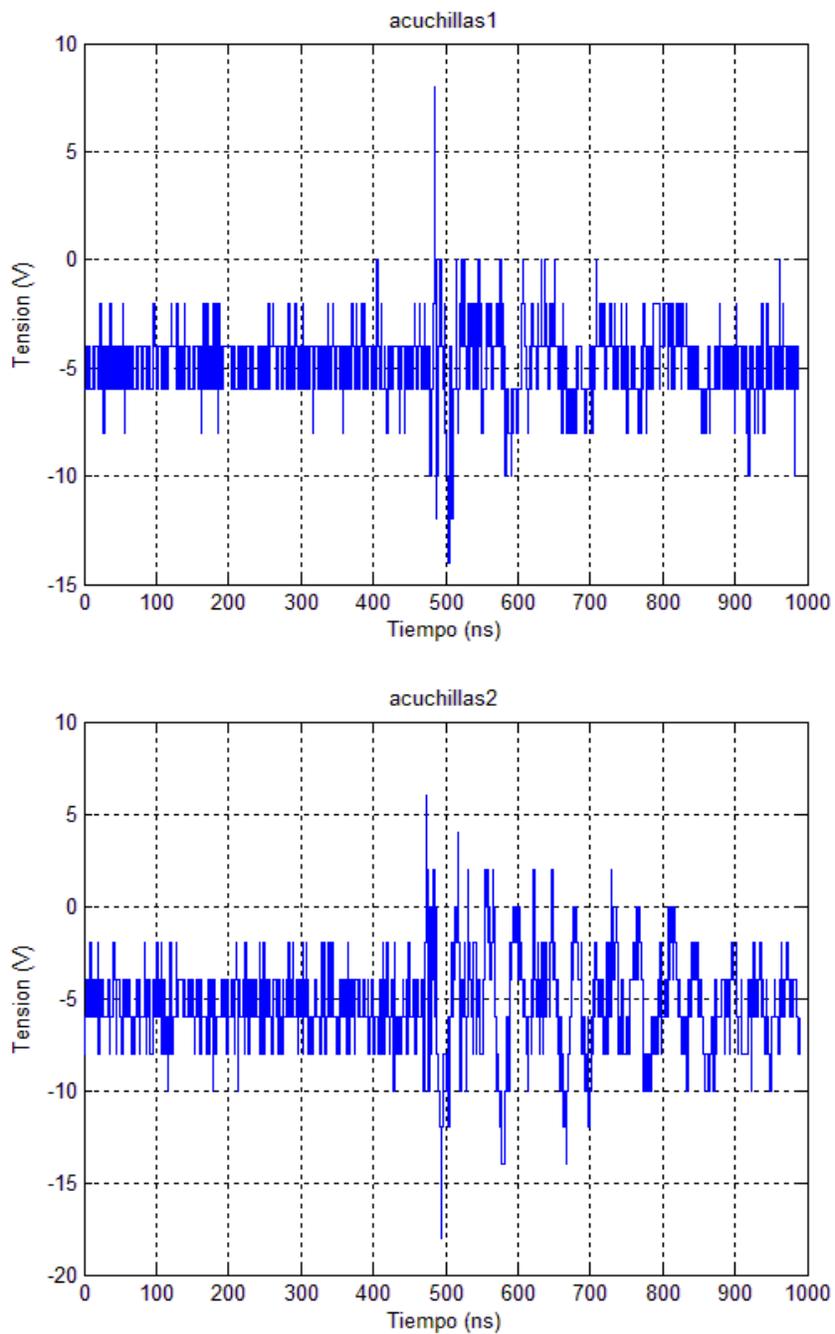


Figura No. 89. Huella Patrón de Cuchillas de 230 kV, ubicadas en la línea Texcoco-Zocac Puebla, en la SE Texcoco, en operación de Cierre con carga.

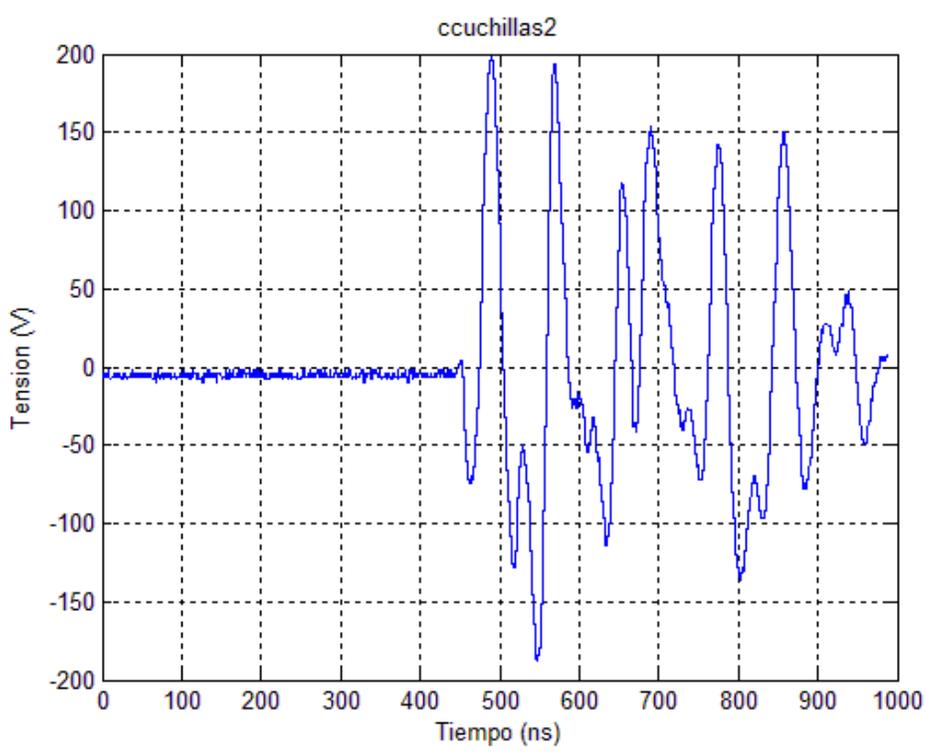
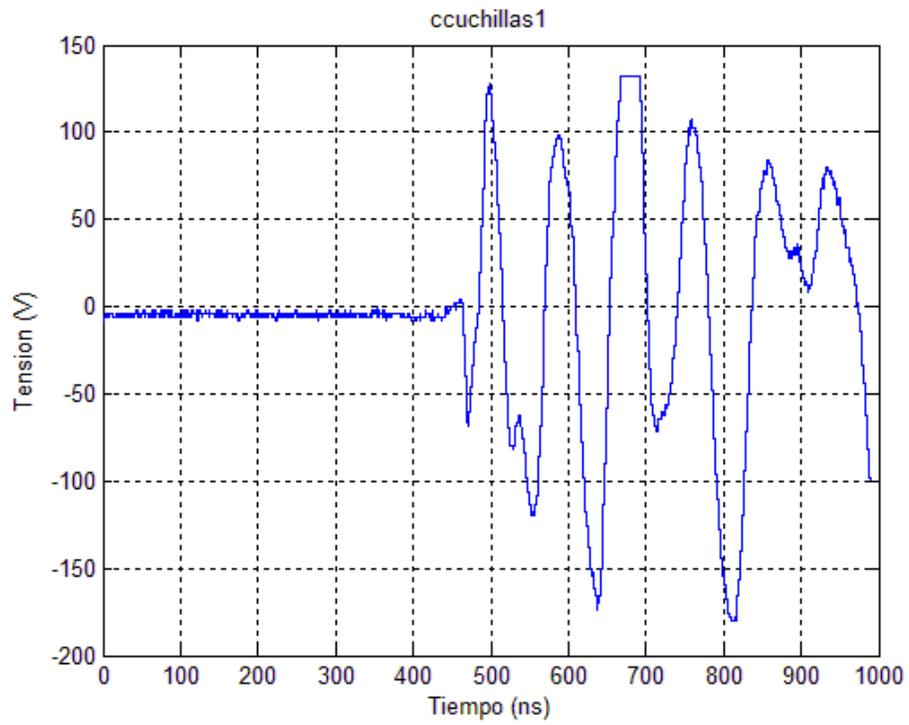


Figura No. 90. Huella Patrón de Cuchillas de 230 kV, ubicadas en la línea Texcoco-Zocac Puebla, en la SE Texcoco, en operación de Cierre con carga.

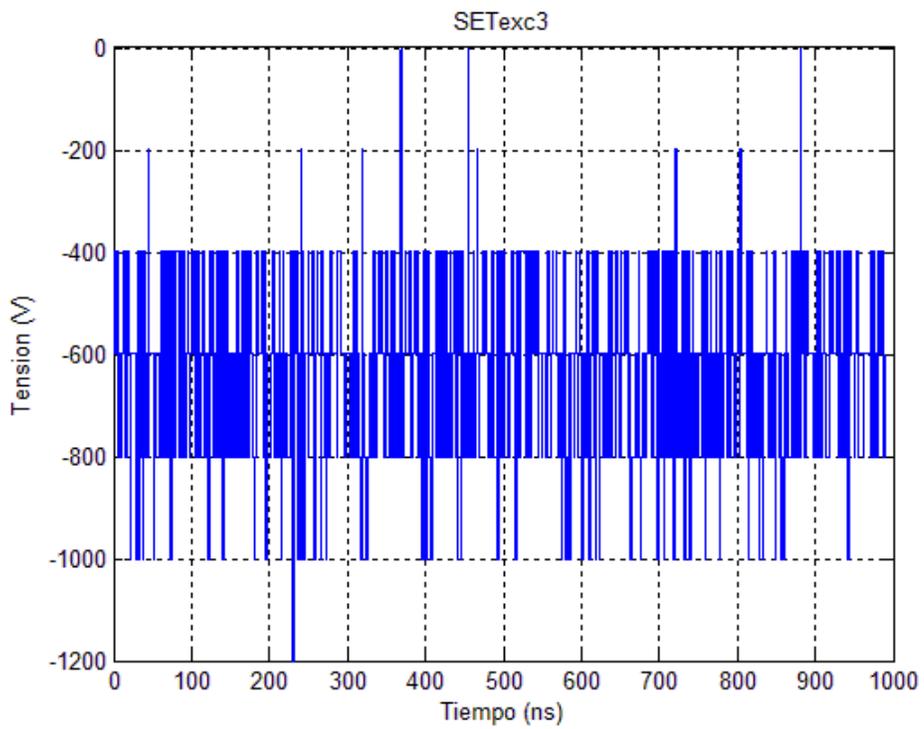
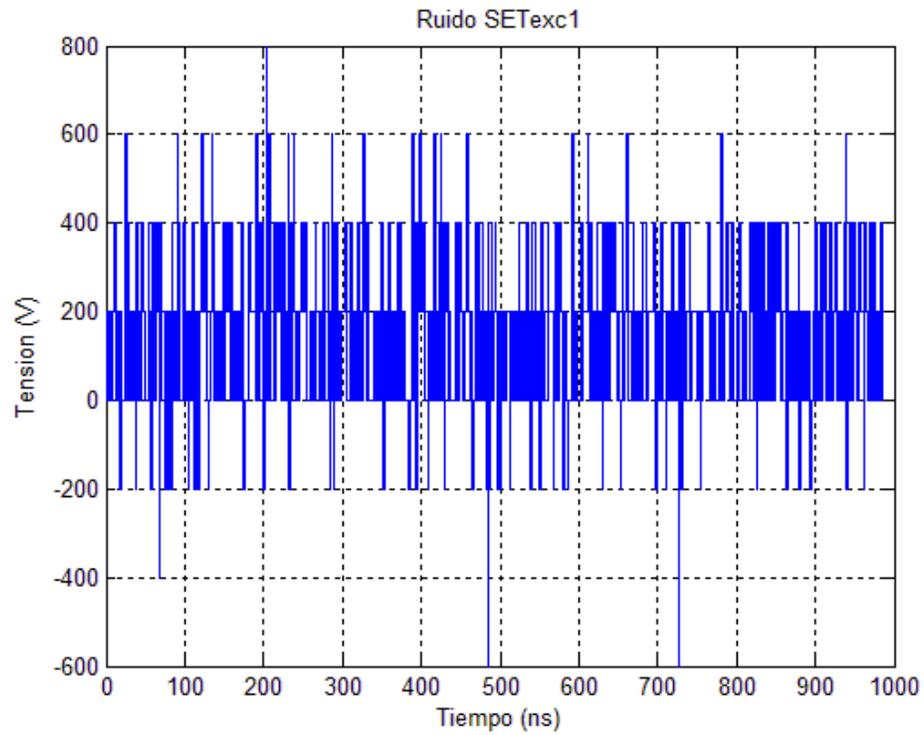


Figura No. 91. Huella del ruido de fondo de la Subestación Texcoco en el lado de 230 kV.

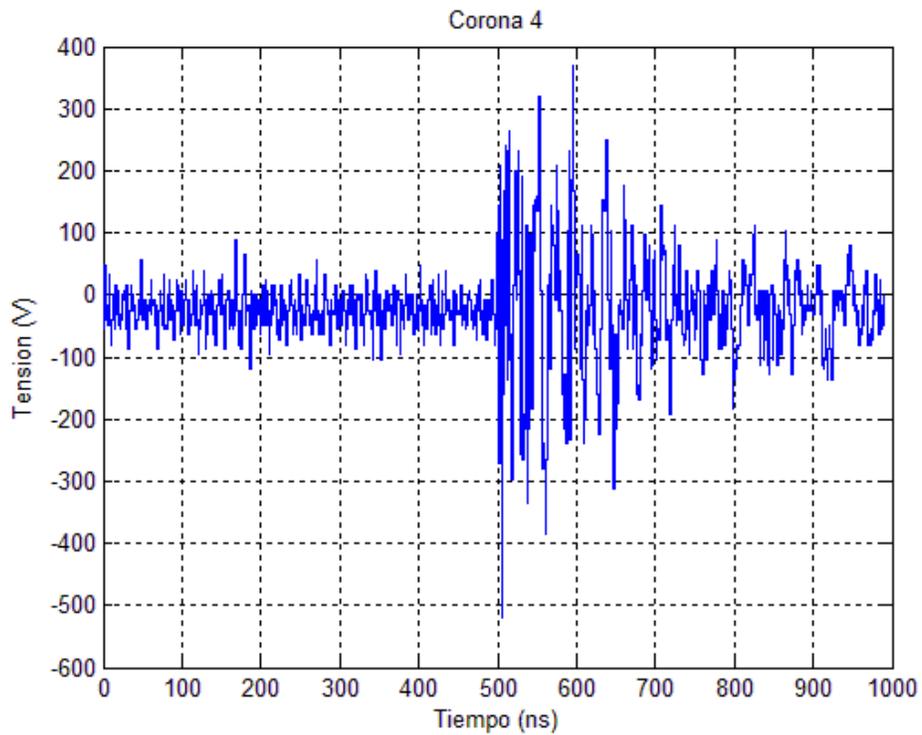
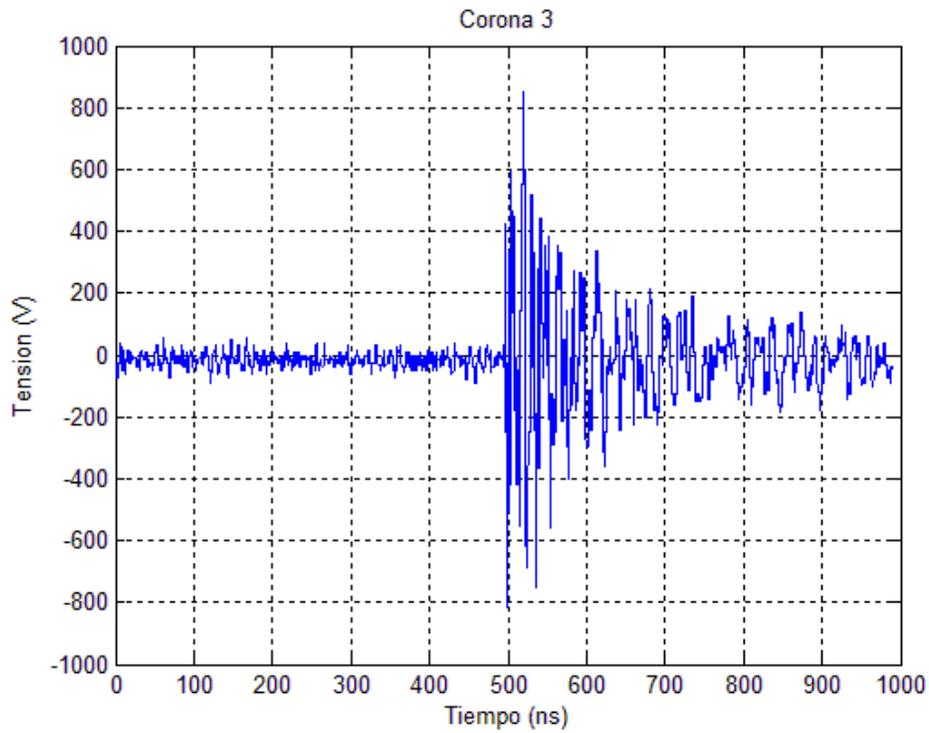


Figura No. 92. Huella Patrón Corona en buses, ubicados en la línea Texcoco-Zocac Puebla, en la SE Texcoco.

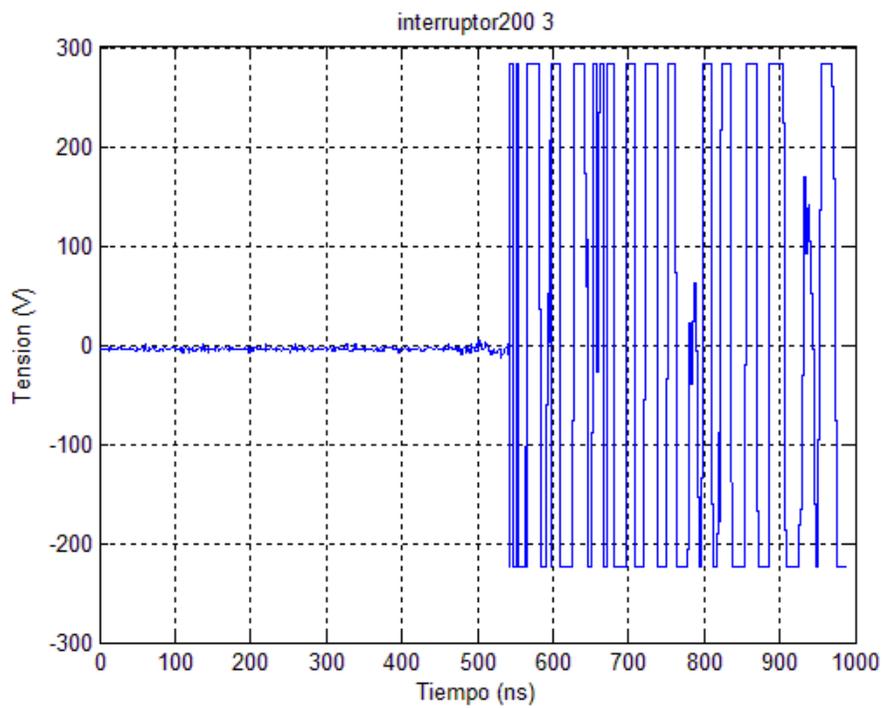
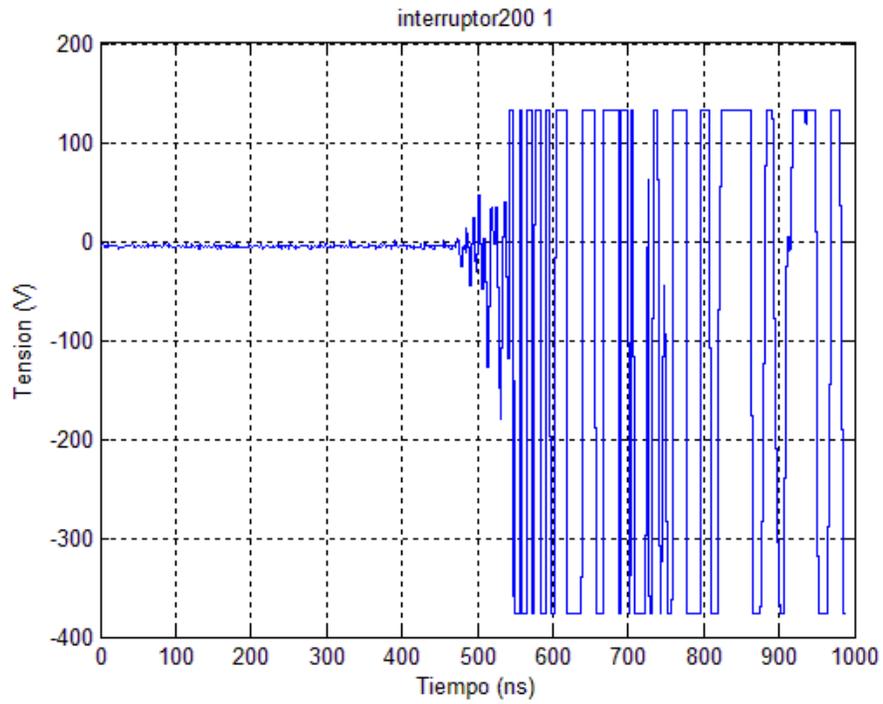


Figura No. 93 Huella Patrón de Interruptor de Potencia de 230 kV, ubicado en la línea Texcoco-Zocac Puebla, en la SE Texcoco, en operación de Cierre con carga.

Huellas patrón en los equipos de potencia de 400 kV, SE Puebla II.

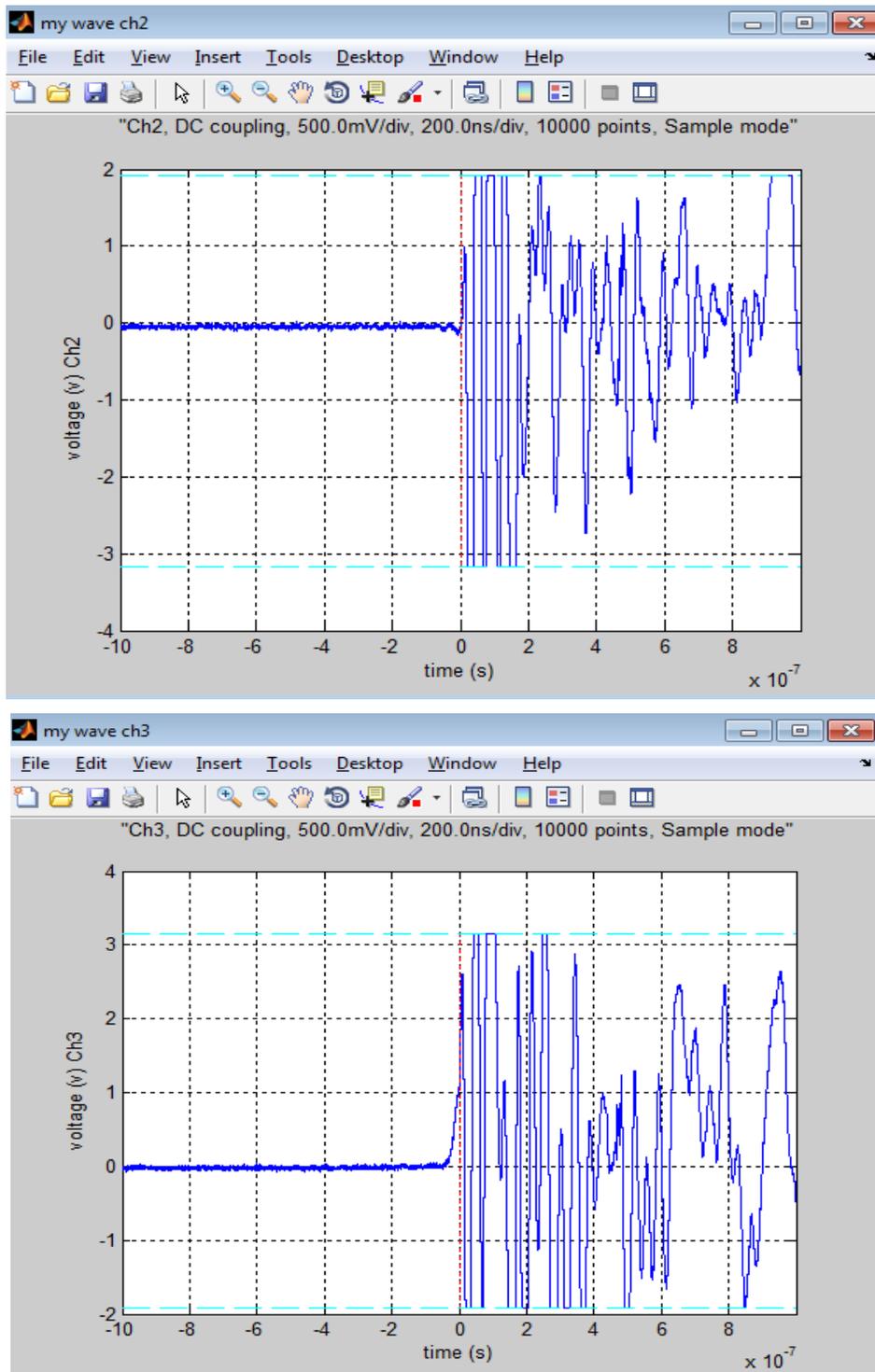


Figura No. 94. Huella Patrón de Cuchillas de 400 kV, ubicadas en la línea A3460, en la SE Puebla II, en operación de Apertura sin carga.

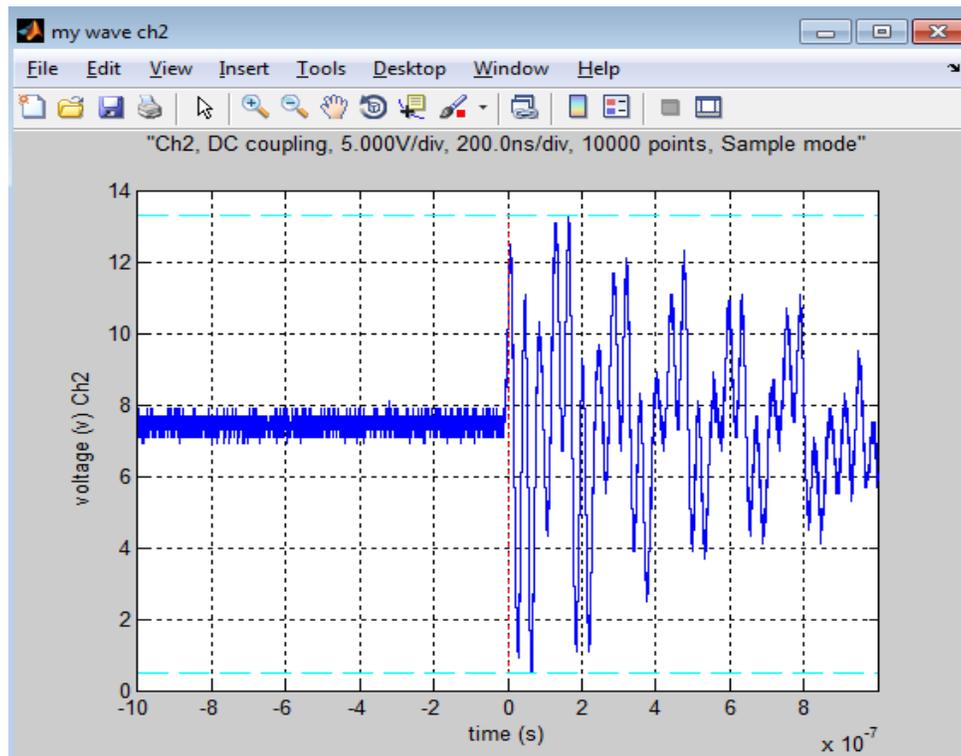
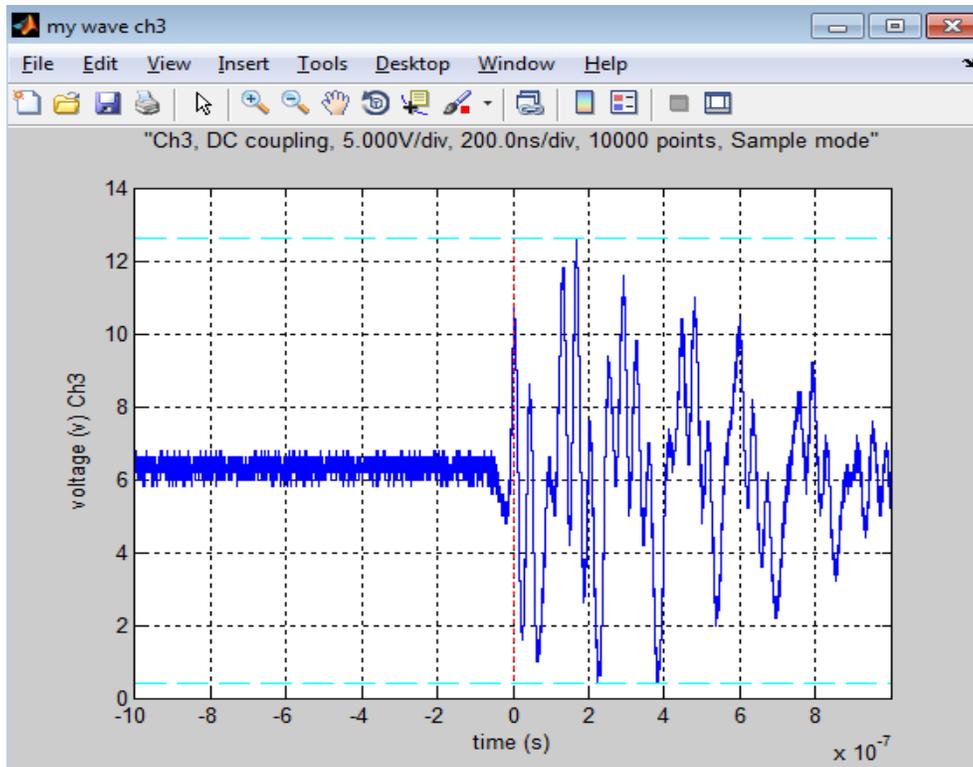


Figura No. 95. Huella Patrón de Cuchillas de 400 kV, ubicado en la línea A3460, en la SE Puebla II, en operación de Apertura con carga.

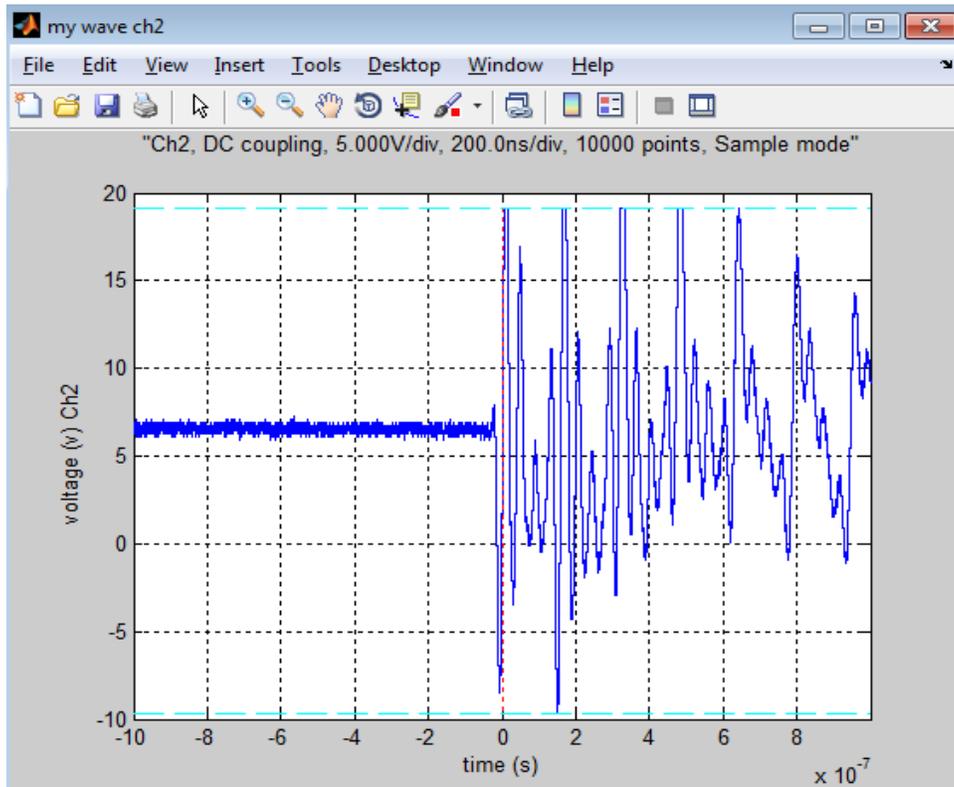
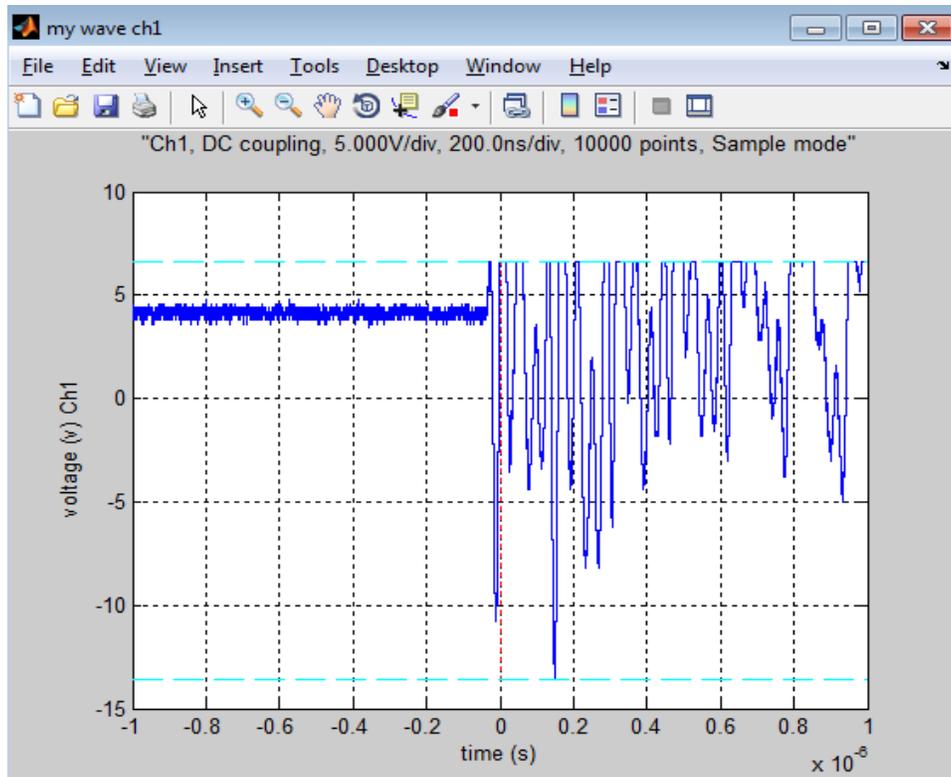


Figura No. 96. Huella Patrón de Cuchillas de 400 kV, ubicado en la línea A3460, en la SE Puebla II, en operación de Cierre con carga.

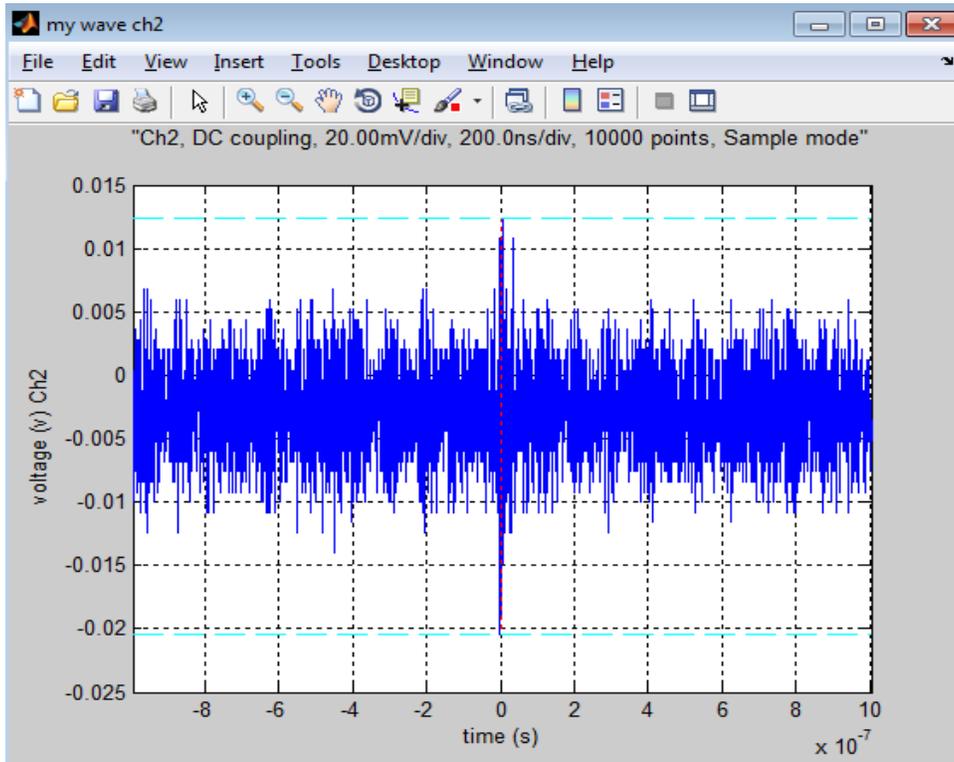
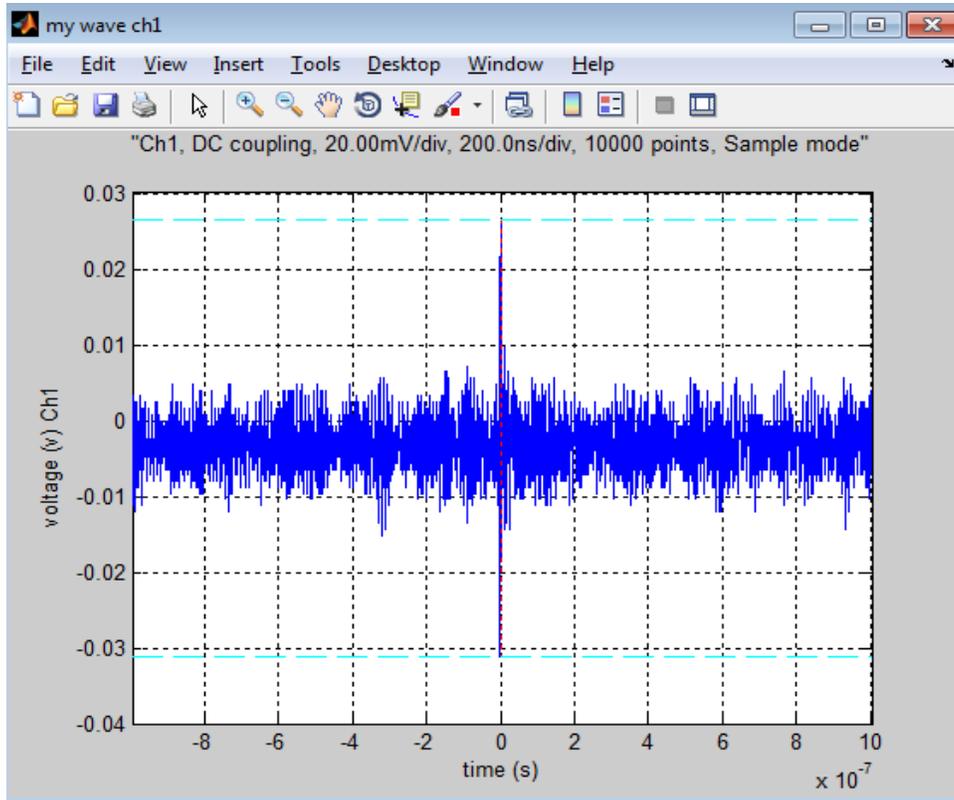


Figura No. 97. Huella del ruido de fondo de la Subestación Puebla II del área de 400 kV.

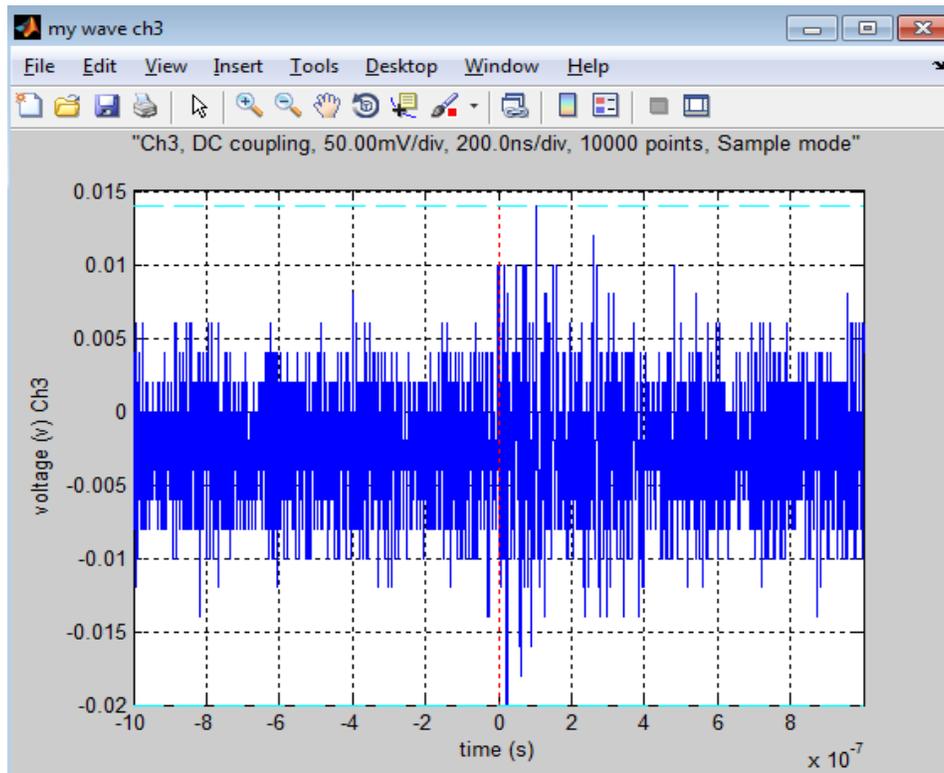
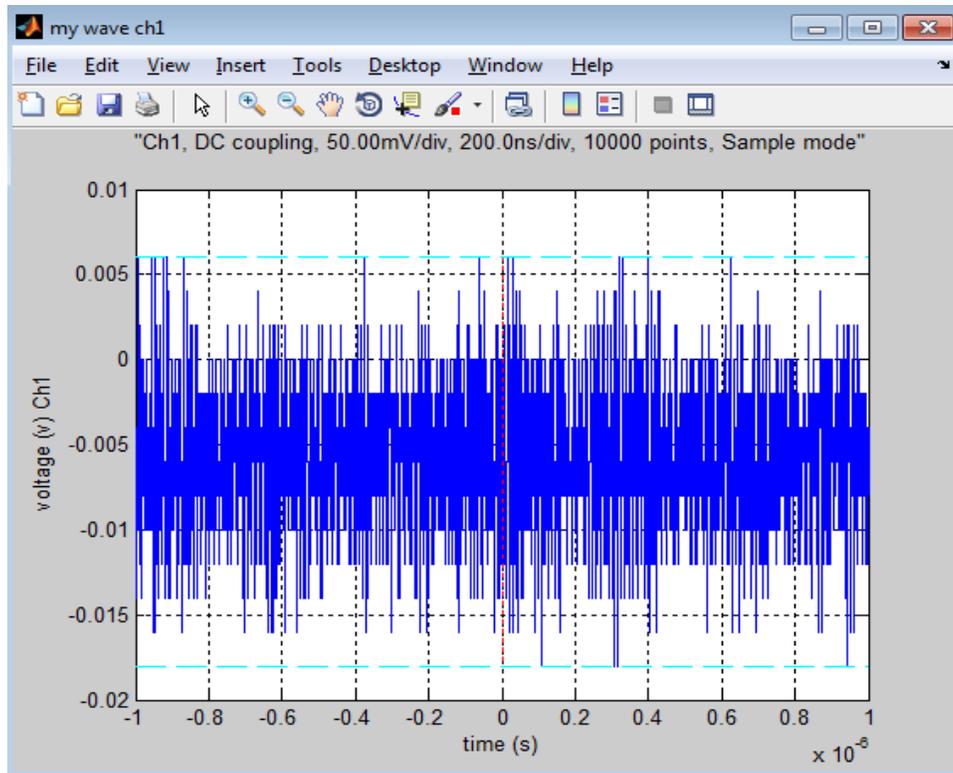


Figura No. 98. Huella Patrón del Transformador de 400/230 kV, ubicado en el banco de Transformadores de la SE Puebla II, en operación Nominal.

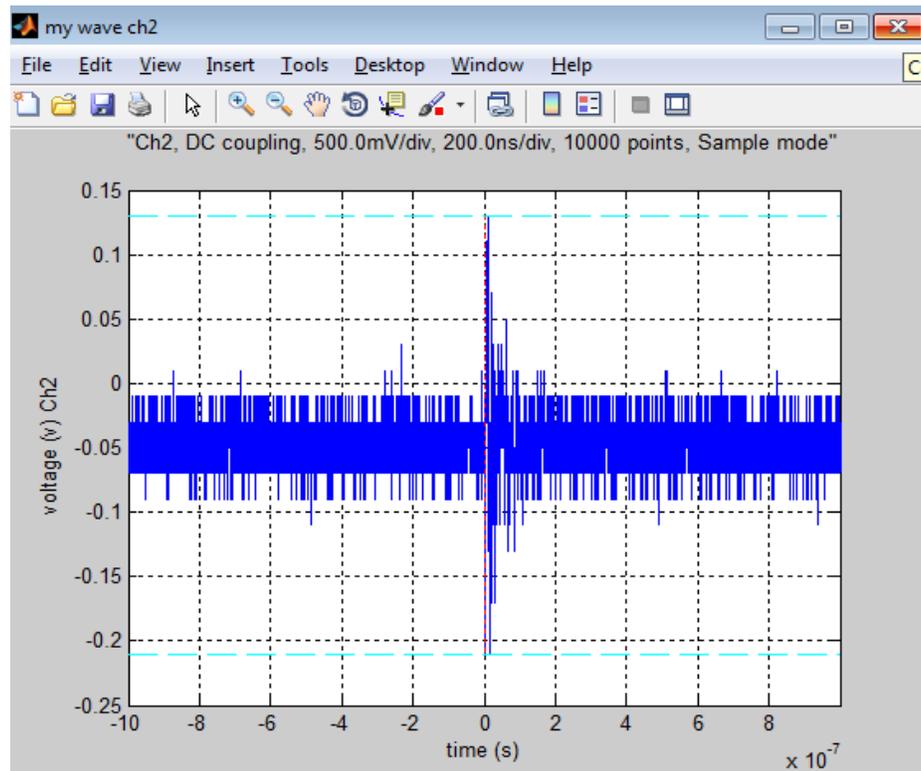
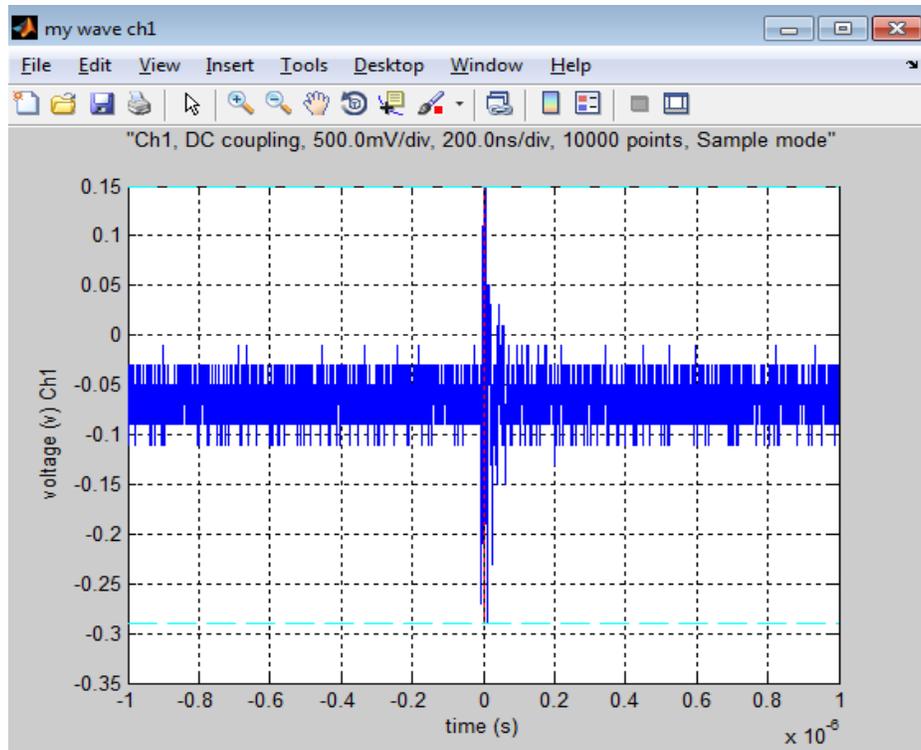


Figura No. 99. Huella Patrón del Interruptor de Potencia de 400 kV, ubicado en línea A3460 de la SE Puebla II, en operación cierre al vacío (sin Carga).

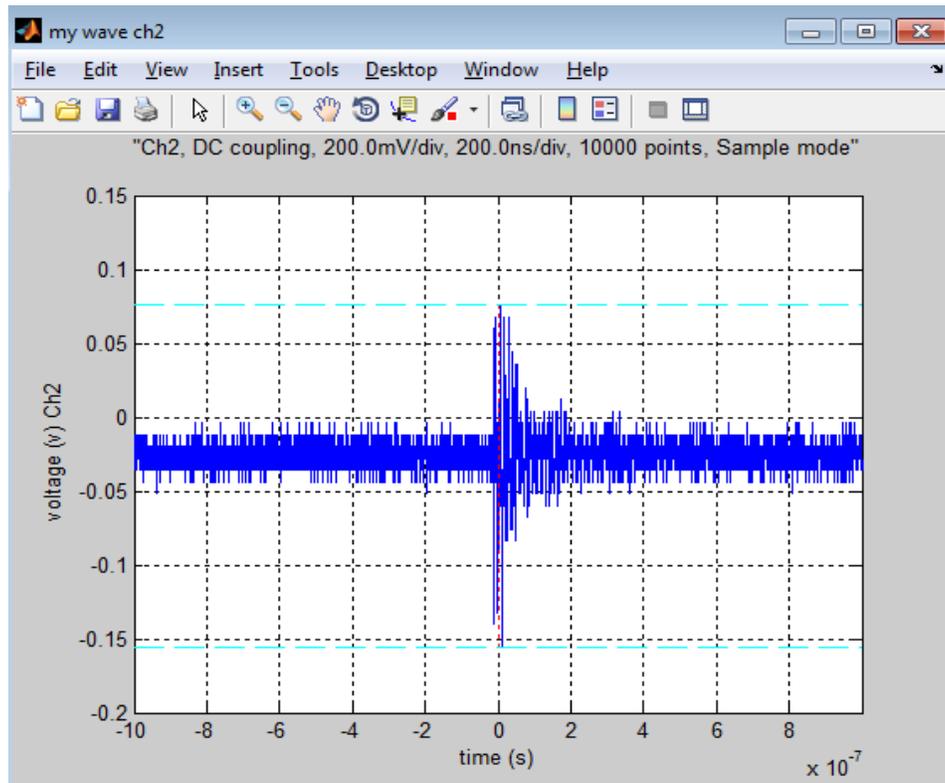
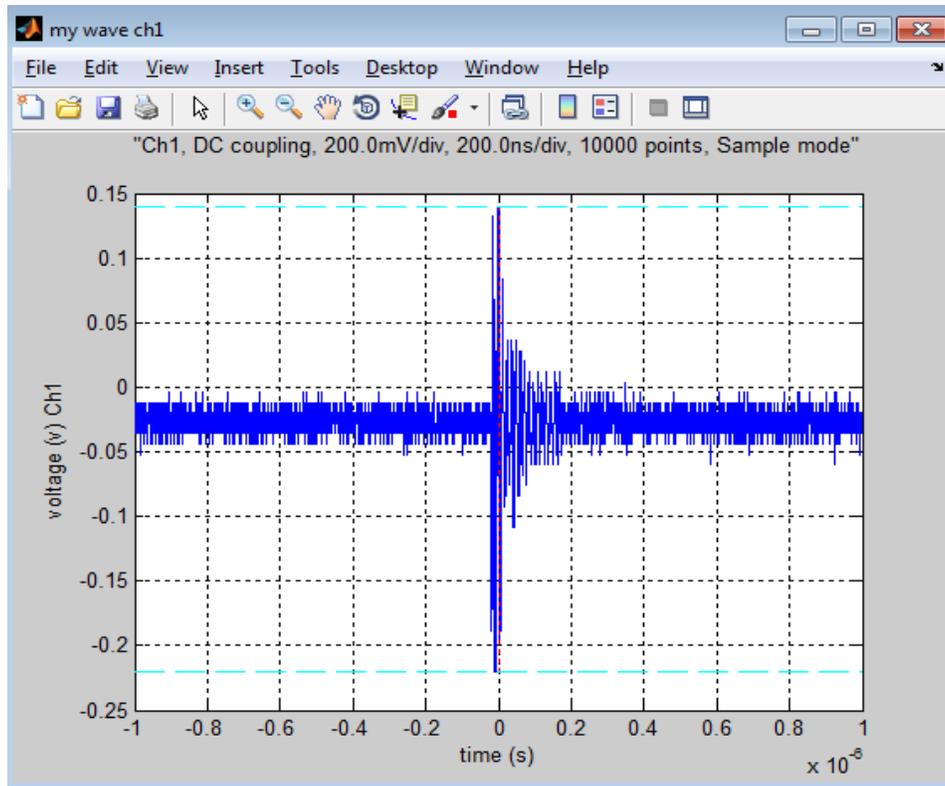


Figura No. 100. Huella Patrón del Interruptor de Potencia de 400 kV, ubicado en línea A3460 de la SE Puebla II, en operación apertura al vacío (sin Carga).

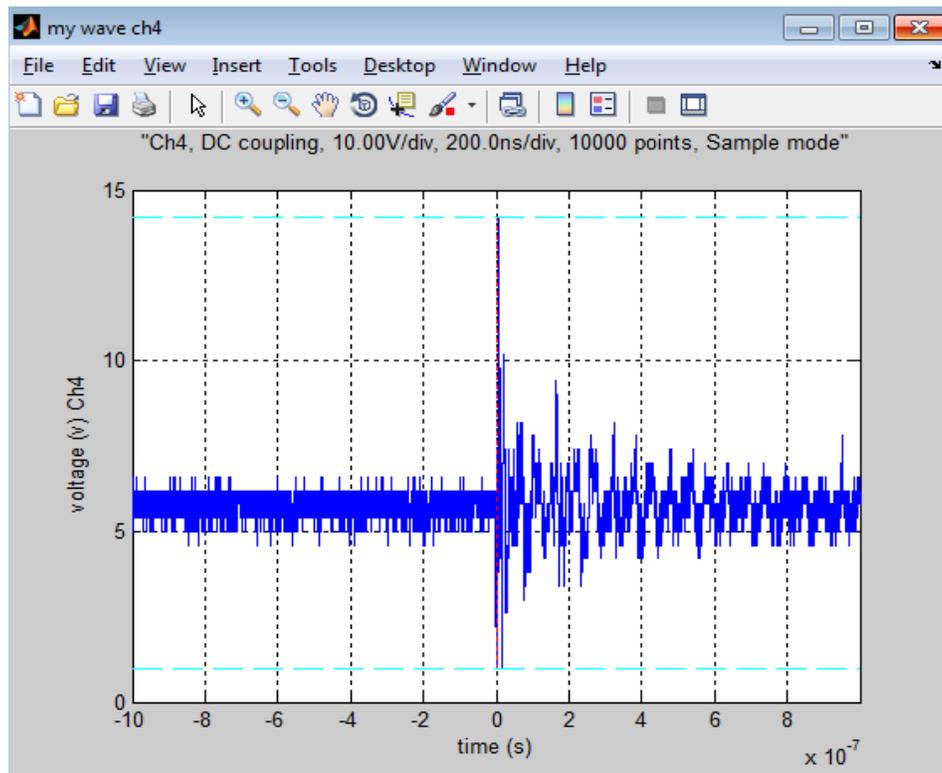
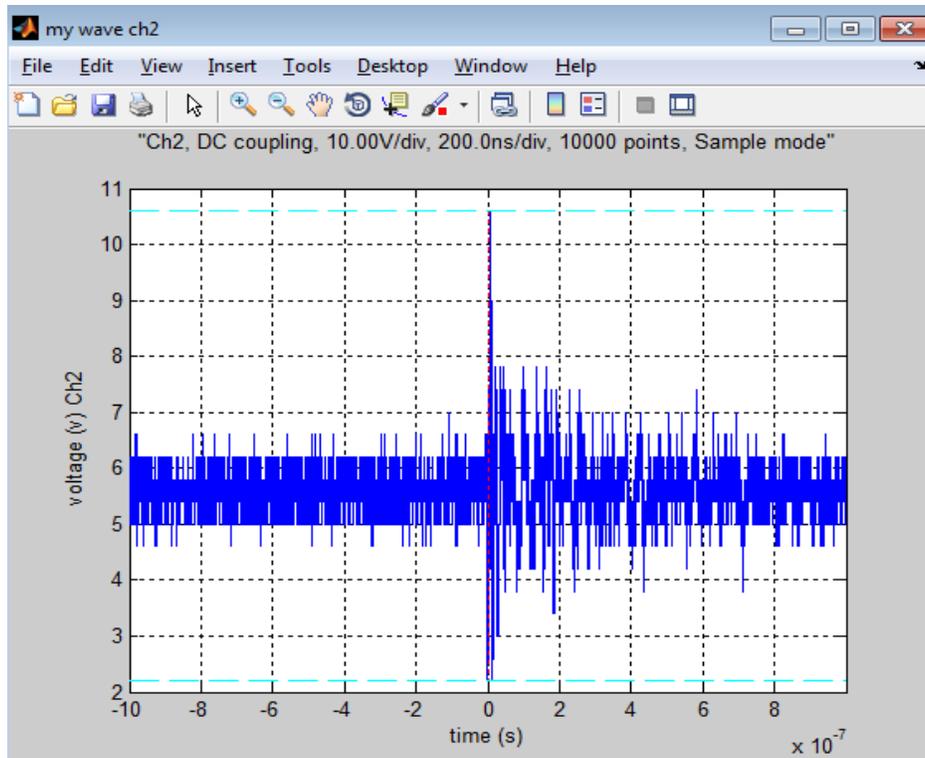


Figura No. 101. Huella Patrón del Interruptor de Potencia de 400 kV, ubicado en línea A3460 de la SE Puebla II, en operación cierre con Carga.

Huellas patrón de los equipos de potencia de 230 kV, SE Coyoacán.

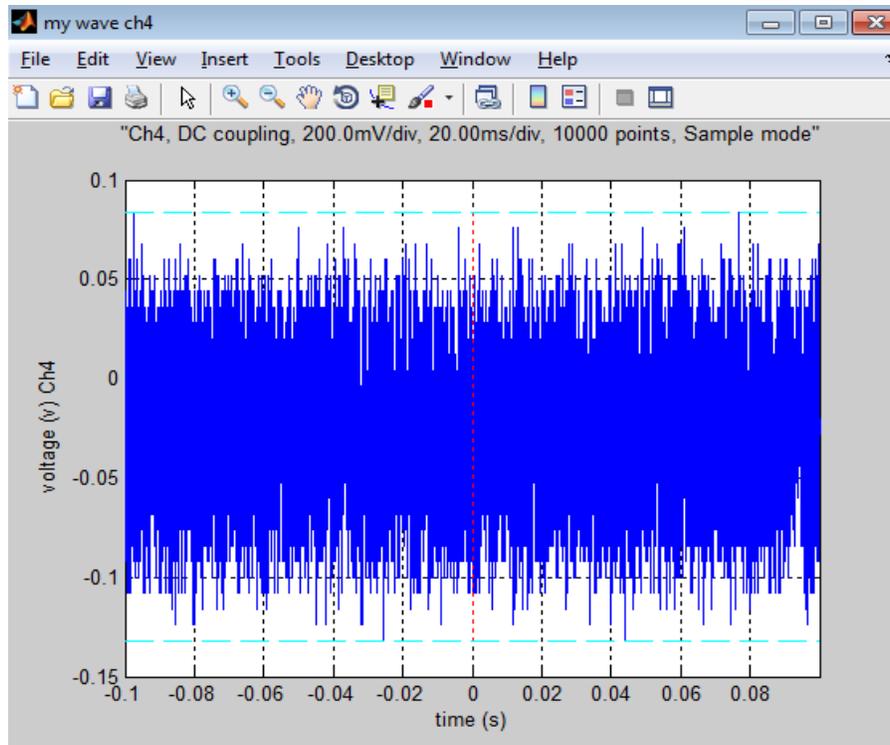
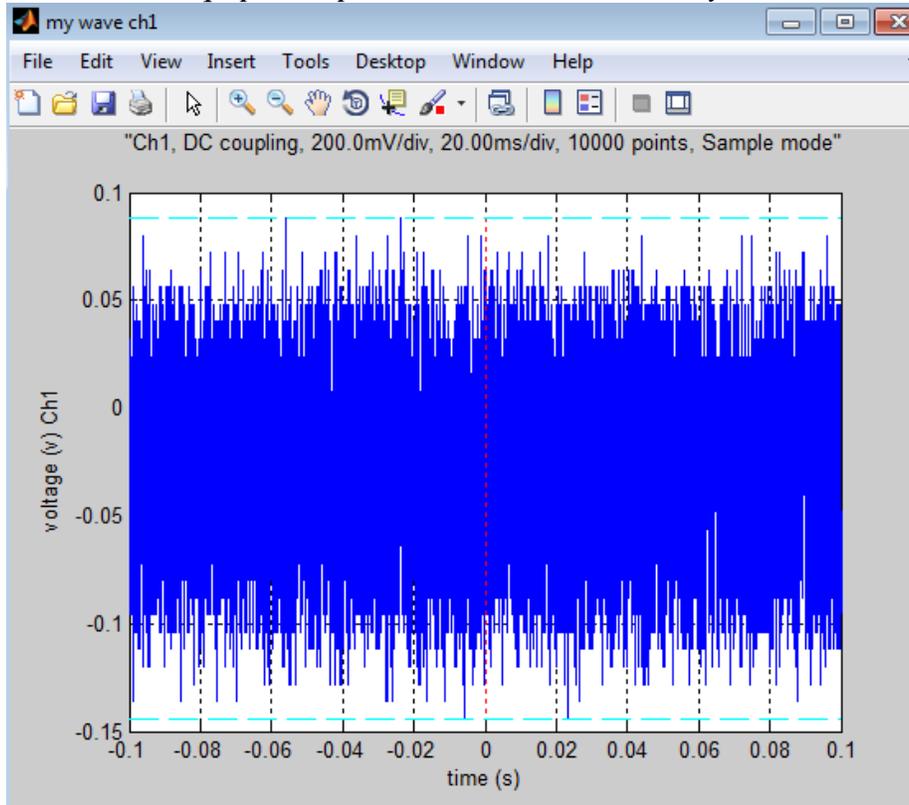


Figura No. 102. Huella del ruido de fondo dentro de la caseta de la SE Coyoacán con las terminales a prueba desenergizadas.

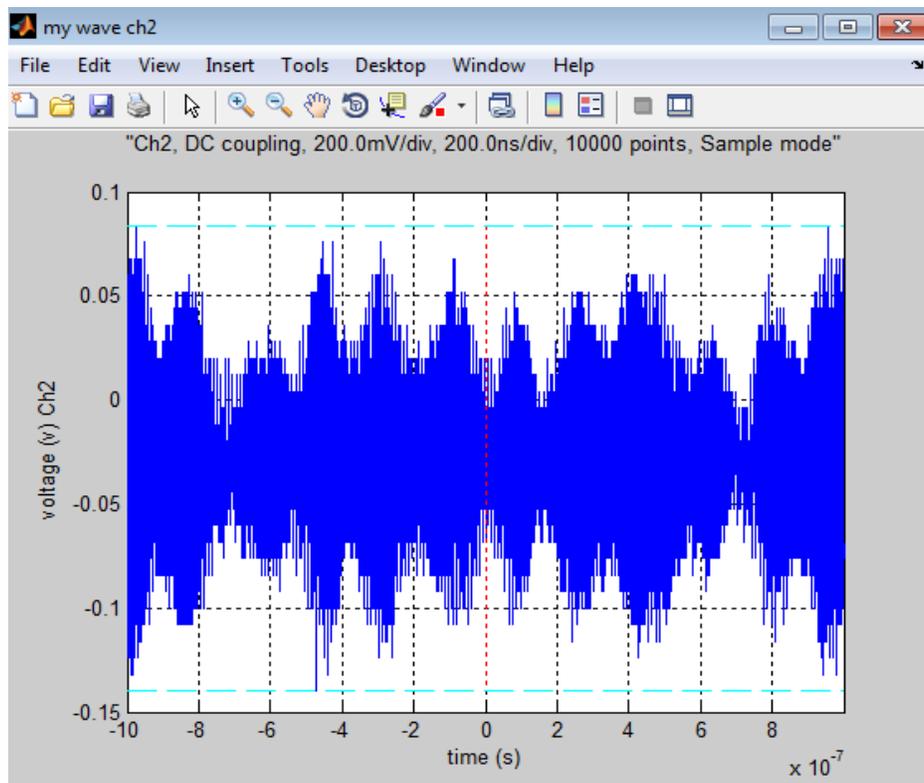
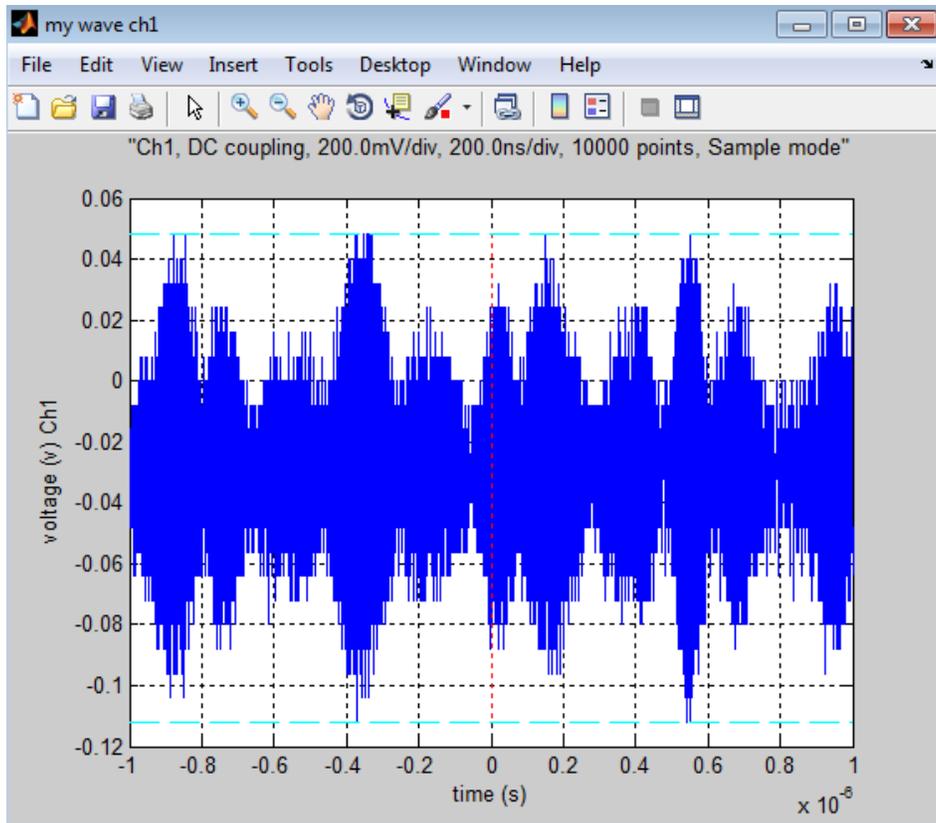


Figura No. 103. Huella del ruido de fondo fuera de la caseta de la Subestación en el lado de 230 kV.

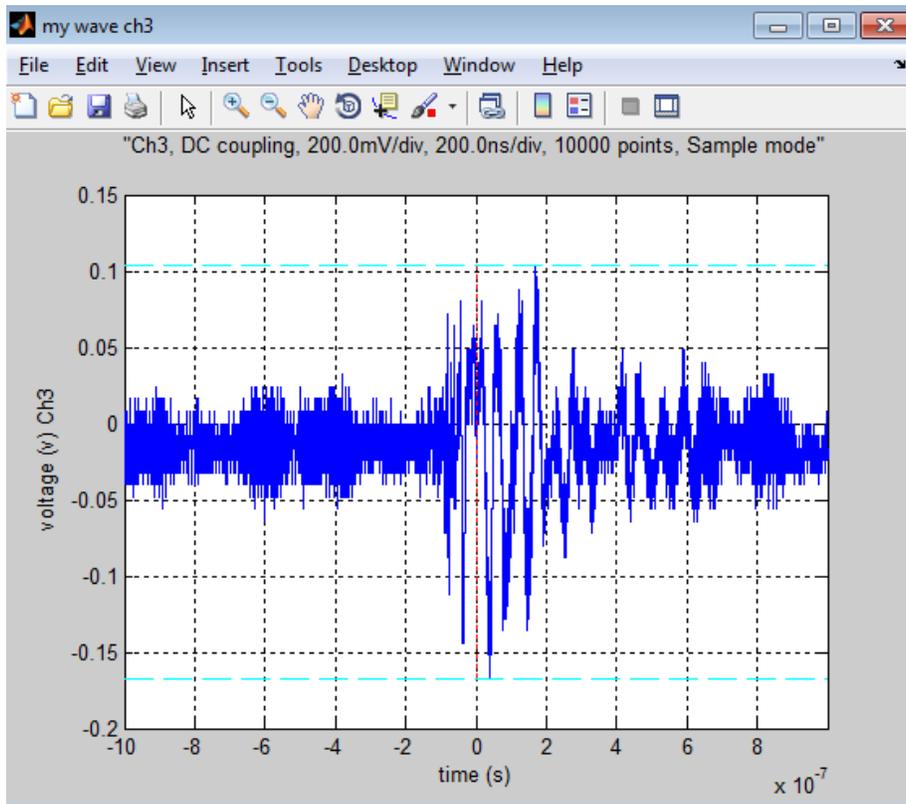
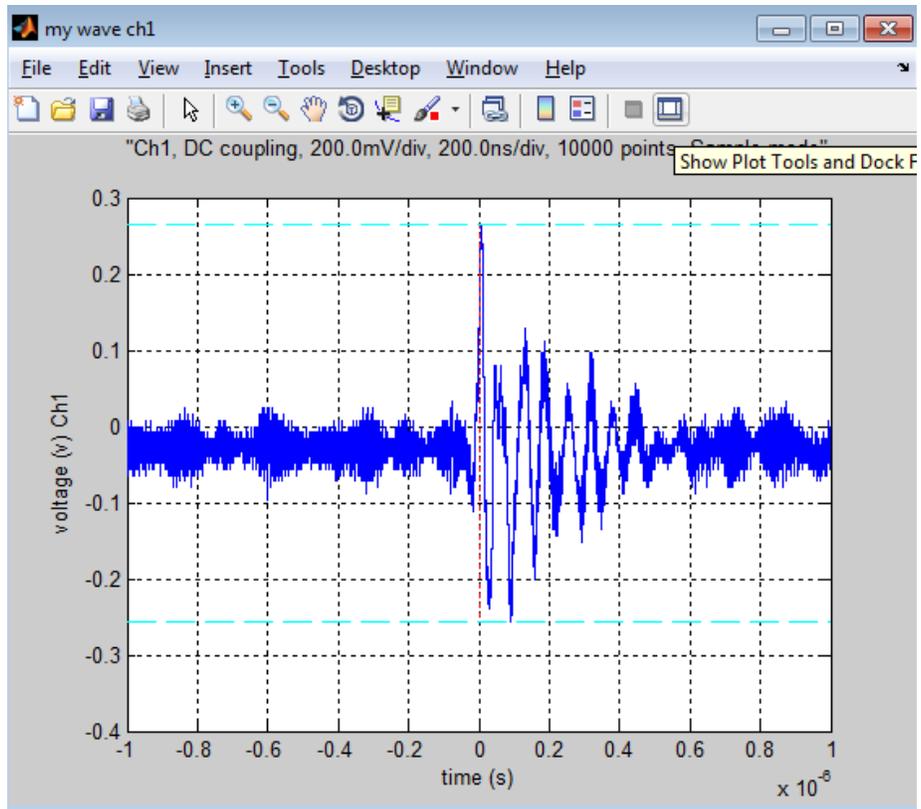


Figura No. 104. Huella Patrón de maniobras con cuchillas de la subestación en el lado de 23 kV.

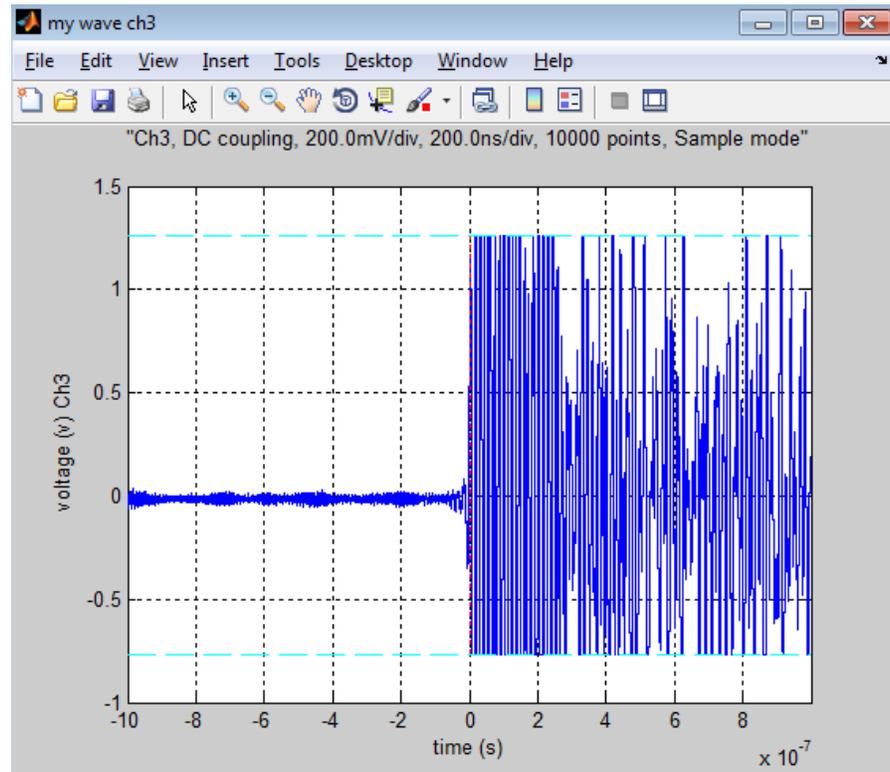
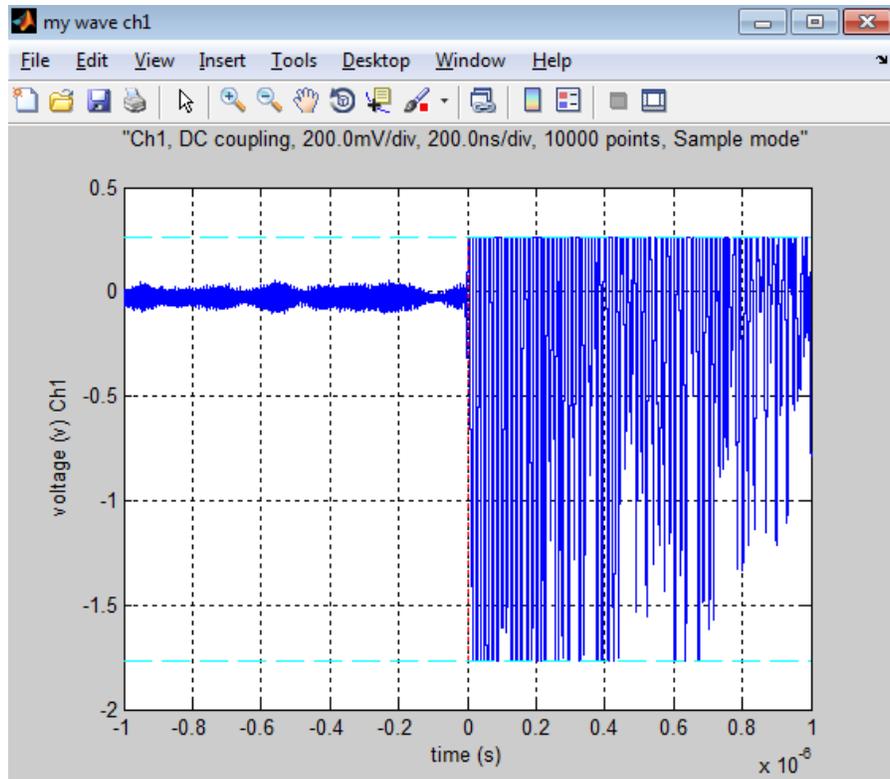


Figura No. 105. Huella patrón de Cuchillas en subestación GIS en el lado de 230 kV.

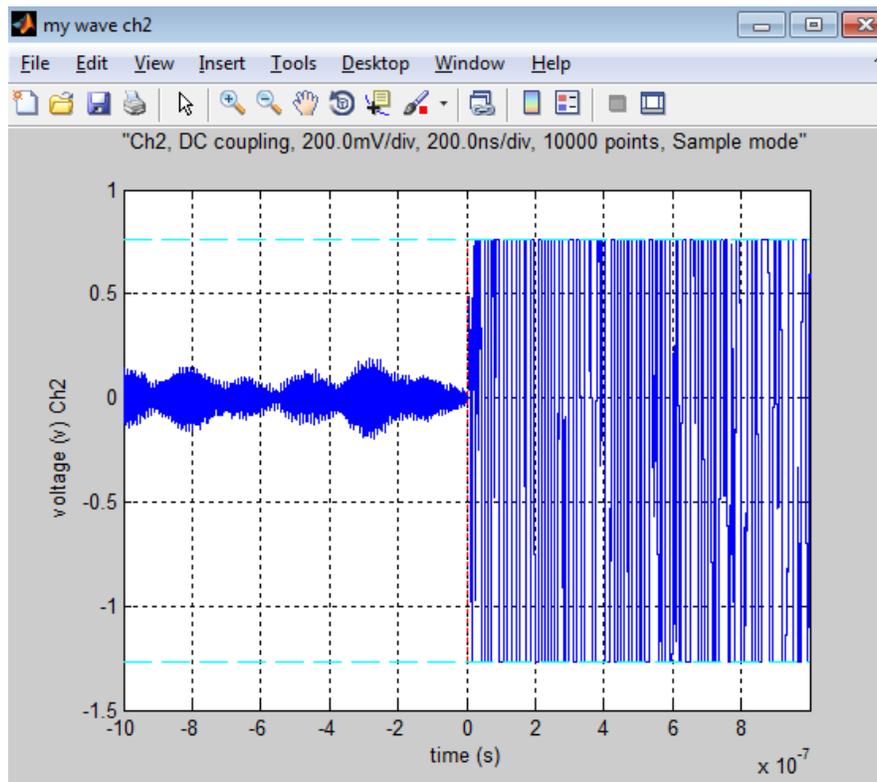
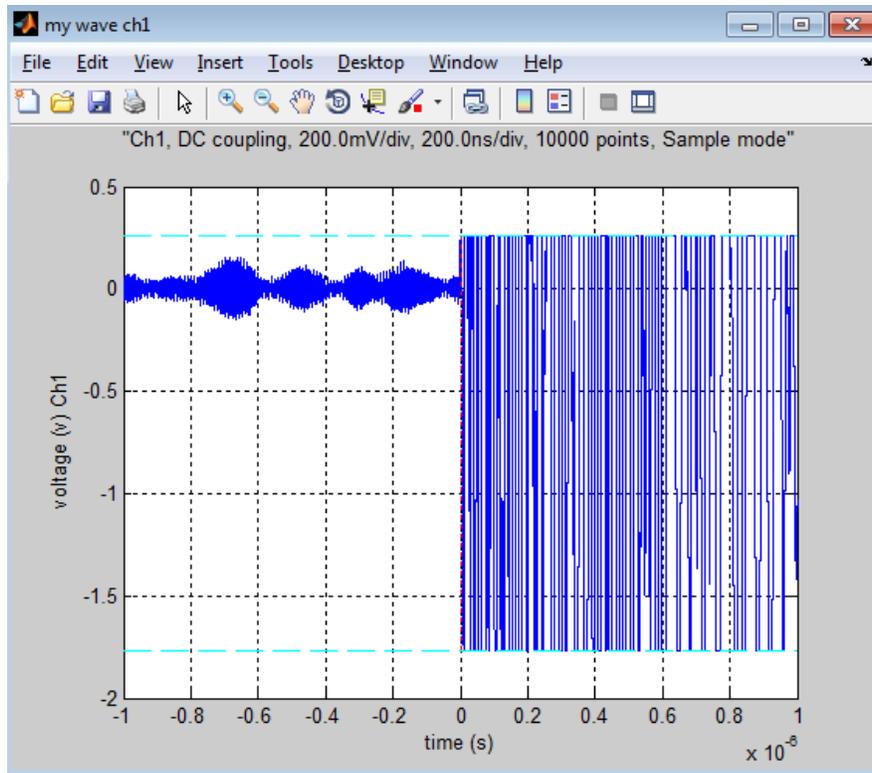


Figura No 106. Huella patrón de Interruptor de Potencia en Subestación GIS en el lado de 230 kV.

Anexo 3.

Metodología para la obtención de huellas electromagnéticas de equipos e instalaciones de potencia.

1. Debe instalarse Matlab R10, instalar DropBox y dar de alta la carpeta a compartir aceptando a los usuarios con permisos para ver las señales que se agreguen a dicha carpeta. Debe instalarse el programa OpenChoice Desktop, que viene con todos los osciloscopio, con el fin de tener la dirección del puerto USB en donde se conecte el osciloscopio.
2. El sistema está conformado por 4 antenas discono las cuales serán conectadas al osciloscopio MSO 4104 de Tektronix de 1 GHz de ancho de banda y 5 Gs/s de cuatro canales, por medio de un cable de comunicación USB-USB. Es importante utilizar este modelo de osciloscopio ya que el programa fue diseñado para el mismo, si es necesario utilizar un nuevo osciloscopio, se debe consultar la página de Tektronix y de Matlab para adquirir el driver correspondiente y anexarlo en la carpeta de Matlab\Drivers.
3. Se debe tener la dirección del puerto USB al momento de conectar el osciloscopio a la computadora para que el programa de comunicación denominado PruebaCapturaguardado pueda tener acceso a él, dicha dirección debe agregarse a la variable visa_address cambiando la ya existente por la nueva dirección.
4. Es imperativo que la distancia entre las antenas sea equidistante, esto para evitar errores en el momento de localizar las señales. Así mismo, debe considerarse la posición de las antenas y su ubicación con respecto a él (los) equipo(s) a obtener su huella electromagnética, anotando las coordenadas de su ubicación teniendo como referencia la antena No. 1, siempre respetando los límites de seguridad marcados en la subestación y respetando las distancias dieléctricas.

5. Sin importar la circunstancia, las antenas deben conectarse a los puertos de entrada del osciloscopio de acuerdo a su numeración; así, la antena No. 1 deberá conectarse al canal 1 del osciloscopio, la antena No. 2 al canal 2 y así sucesivamente.
6. Muy importante es conectar a Tierra el osciloscopio, así como asegurarse que la computadora y el cable de alimentación del osciloscopio estén conectados a una alimentación aterrizada.
7. Antes de iniciar las capturas, en el programa PruebaCapturaguardado se debe colocar la dirección en la cual se va a guardar las huellas electromagnéticas en la variable inicio. Si es necesario enviar las señales al mismo tiempo en que se capturan la dirección debe ser la siguiente: 'C:\Users\Dropbox\Señales\'. Esta dirección se genera al instalar DropBox, solo debe crearse una nueva carpeta llamada Señales, que es la que se va a compartir y en donde se iniciará la base de datos. Si no es necesario el envío, se puede proponer otra dirección, resguardando los datos en una carpeta de la computadora hasta el momento en que se necesite.
8. De acuerdo al equipo y al nivel de tensión de la subestación, seleccione los ajustes que deberá realizar en cada canal del osciloscopio. Para ello, puede auxiliarse en la siguiente tabla.

Tabla No. 13. Selección de tiempos de arribo para ajustes del osciloscopio.

Subestación en 230 kV				
Equipo.	Atenuación.	V/Div.	Tiempo de muestreo (ns).	Nivel de disparo.
Ruido de la Subestación	50 Ω	5	2	7 V
Cuchillas	50 Ω	50	100	7 V
Interruptor de Potencia	1 M Ω	100	100	12 V

Subestación en 400 kV				
Equipo.	Atenuación.		Tiempo de muestreo (ns).	Nivel de disparo.
Ruido de la Subestación	50 Ω	500 mV/Div	20	7 V
Cuchillas	1 M Ω	5 V/Div	200	9 V
Interruptor operando en vacío	50 Ω	500 mV/Div	200	7 V
Interruptor con caga	1 M Ω	10 V/Div	200	12 V
Subestación encapsulada en SF₆				
Equipo.	Atenuación.		Tiempo de muestreo (ns).	Nivel de disparo.
Ruido de la subestación	50 Ω	200 mV/Div	20	12 mV
Cuchillas	50 Ω	200 mV/Div	200	112 mV
Interruptor	1 M Ω	200 mV/Div	200	112 mV

9. Al momento de dar inicio al programa, en el *Command Windows* le pedirá el nombre del archivo, proporcione un nombre y oprima *Enter*. Espere mientras el sistema guarda las señales.
10. Cuando el sistema termine de guardar las señales, se podrá realizar otra captura, repitiendo los pasos 8 y 9, proporcionando otro nombre de archivo.
11. Si se necesita realizar una localización, acceda a las figuras de las señales y realice el análisis para determinar el tiempo de arribo de las señales por canal. Abra el programa *Nvalocalizacion*, en la variable *Path* proporcione la dirección del archivo a leer, y proporcione las coordenadas de las antenas. Corra el programa y siga las instrucciones.

12. Al terminar el programa Nvalocalizacion, imprima la pantalla y guárdela en un archivo de *paint*, o si se prefiere, solo escriba aparte el resultado de las coordenadas. Verifique las distancias obtenidas partiendo siempre desde la antena No. 1. Considere a la antena No. 1 como su origen, observando hacia la antena No. 2 como su eje X y hacia la antena No. 4 como su eje Y.

13. Es importante recordar que, mientras se realiza uno de los programas, no puede correrse otro, debe esperarse a que se termine una aplicación para utilizar otra.

Anexo 4.

Programa de localización de descargas parciales.

```
clc; clear all; close all;

% Localización de las antenas.
error = 5e-5; % Error máximo permitido.
s = 0;
e = [5e-5;5e-5;5e-5;5e-5];

% Habilitar si se van a tener diferentes distancias, en caso contrario
dejar comentado y colocar las coordenadas en Distancias Fijas.
% % input('Localización: Proporcione las coordenadas de las antenas.
press Enter');
% % % X1=input('X1= ');
% % % Y1=input('Y1= ');
% % % Z1=input('Z1= ');
% % % X2=input('X2= ');
% % % Y2=input('Y2= ');
% % % Z2=input('Z2= ');
% % % X3=input('X3= ');
% % % Y3=input('Y3= ');
% % % Z3=input('Z3= ');
% % % X4=input('X4= ');
% % % Y4=input('Y4= ');
% % % Z4=input('Z4= ');

% Distancias Fijas
X1=0;
Y1=0;
Z1=1;
X2=0;
Y2=1.78;
Z2=1;
X3=1.78;
Y3=0;
Z3=1;
X4=1.78;
Y4=1.78;
Z4=1;

% % Tiempos de arribo
disp('Analice las señales ploteadas y proporcione el tiempo de arribo,
');
disp('de acuerdo al canal que capta primero la señal');
t0=input('t0= ');
t1=input('t1= ');
t2=input('t2= ');
t3=input('t3= ');
```

```

t01=abs(t1-t0);
t02=abs(t2-t0);
t03=abs(t3-t0);

V = 3*10^8;           % Velocidad de propagación de la onda electromagnética
h = (X1+X2+X3+X4)/6; % Coordenadas (Valores iniciales) arbitrarios
(para la esfera)
k = (Y1+Y2+Y3+Y4)/6;
j = (Z1+Z2+Z3+Z4)/6;
format long;
N(1:4,1)=0;
T = 2*t01;           % Tiempo arbitrario inicial.
Xs = [h;k;j;T];
ct=1;
i=0;
while i<38 %antes 200 o 100
    h=Xs(1,1); k=Xs(2,1);j=Xs(3,1);T=Xs(4,1);
    f11=(h-X1)^2; f12=(k-Y1)^2; f13=(j-Z1)^2; f14=(V^2)*(T^2);
    f141=(V^2)*T;
    f21=(h-X2)^2; f22=(k-Y2)^2; f23=(j-Z2)^2; f24=(V^2)*(T+t01)^2;
    f241=(V^2)*(T+t01);
    f31=(h-X3)^2; f32=(k-Y3)^2; f33=(j-Z3)^2; f34=(V^2)*(T+t02)^2;
    f341=(V^2)*(T+t02);
    f41=(h-X4)^2; f42=(k-Y4)^2; f43=(j-Z4)^2; f44=(V^2)*(T+t03)^2;
    f441=(V^2)*(T+t03);
    format long; fxs=[f11+f12+f13-f14;f21+f22+f23-f24;f31+f32+f33-f34;
        f41+f42+f43-f44];
    format long; f2xs=[2*(h-X1) 2*(k-Y1) 2*(j-Z1) -2*f141;
        2*(h-X2) 2*(k-Y2) 2*(j-Z2) -2*f241;
        2*(h-X3) 2*(k-Y3) 2*(j-Z3) -2*f341;
        2*(h-X4) 2*(k-Y4) 2*(j-Z4) -2*f441];
    % N=inv(f2xs)*fxs;
    N=(f2xs)\fxs;
    Xss=Xs-N;
    Xs=Xss;
    abs(Xs)
    if (max(abs(N))<5e-5)
        break
    end
    i = i+1;
end

```