UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

PROYECTO TÉCNICO CON ENFOQUE INVESTIGATIVO:
APLICACIÓN DE ENSAYOS DISRUPTIVOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL BIL A TRAVÉS DE ESFERAS ESPINTEROMÉTRICAS EN EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Autores:
BYRON SEBASTIÁN TAPIA CÁRDENAS
DIEGO GEOVANNY CRIOLLO TACURI

Tutor:
ING. FLAVIO ALFREDO QUIZHPI PALOMEQUE

CUENCA – ECUADOR
2018

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Byron Sebastián Tapia Cárdenas con documento de identificación número 0104819966 y Diego Geovanny Criollo Tacuri con documento de identificación número 0105021190, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: APLICACIÓN DE ENSAYOS DISRUPTIVOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL BIL A TRAVÉS DE ESFERAS ESPINTEROMÉTRICAS EN EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERO ELÉCTRICO, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio 2018.

Byron Sebastián Tapia Cárdenas
C.I.: 0104819966

Diego Geovanny Criollo Tacuri
C.I.: 0105021190

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: APLICACIÓN DE ENSAYOS DISRUPTIVOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL BIL A TRAVÉS DE ESFERAS ESPINTEROMÉTRICAS EN EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, realizado por Byron Sebastián Tapia Cárdenas y Diego Geovanny Criollo Tacuri, obteniendo el *Proyecto Técnico con Enfoque Investigativo* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio 2018

Ing. Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque

C.I.: 0102257482

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Byron Sebastián Tapia Cárdenas y Diego Geovanny Criollo Tacuri, autores del trabajo de titulación: APLICACIÓN DE ENSAYOS DISRUPTIVOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL BIL A TRAVÉS DE ESFERAS ESPINTEROMÉTRICAS EN EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, certificamos que el total contenido de entre *Proyecto Técnico con Enfoque Investigativo* es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, julio 2018

Byron Sebastián Tapia Cárdenas
C.I.: 0104819966

Diego Geovanny Criollo Tacuri
C.I.: 0105021190

DEDICATORIA

A Dios, a mis padres y hermanos por ser parte fundamental en mi vida, ya que sin ellos este trabajo no hubiese sido posible.

Byron Sebastián Tapia Cárdenas

A Dios por brindarme sabiduría y guiarme en cada momento de mi vida permitiéndome seguir adelante.

A mi madre la Sra. Delia Tacuri; por su optimismo, perseverancia y apoyo incondicional quien me enseño la responsabilidad y la firmeza que uno debe poner a las cosas y metas que uno desee lograr en la vida y por todos aquellos concejos que supieron guiarme en mi camino.

A mi padre el Sr. Alejandro Criollo; quien ha sabido manifestarme su apoyo a lo largo de mi carrera de pregrado.

A mi hermana Alexandra Criollo, por ser ese apoyo sustancial y eficaz en momentos decisivos quien con su carácter y don de espíritu ha sido un ejemplo de responsabilidad demostrándome que todo es posible.

A mi hermano Hendry Criollo, quien con su manera y esfuerzo me ha indicado que de cierta manera todo se debe intentar y por los momentos compartidos y de igual manera a mi familia con quienes he compartido grandes momentos.

Diego Geovanny Criollo Tacuri

AGRADECIMIENTOS

A Dios por la vida y salud, al tutor el Ing. Flavio Quizhpi por su guía y conocimientos puestos en esta presente tesis de pregrado, así como también; a mi familia por el apoyo, a mis compañeros de clase por los grandes momentos, a mis amigos por estar siempre presente y a los profesores que han sido guía a en esta etapa de mi vida.

Byron Sebastián Tapia Cárdenas

Previamente antes de todo quiero comenzar agradeciendo a Dios, por brindarme la sabiduría necesaria la fuerza y salud durante toda la etapa de mi carrera de desarrollo profesional permitiéndome cumplir uno de mis objetivos en mi vida.

Quiero darles las gracias a mis padres, porque supieron brindarme su sustento y apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria permitiéndome culminar este proyecto. A mi hermana Alex por formar parte de esa fortaleza y sustento de espíritu para avanzar firmemente.

También de manera particular quiero agradecer al Ing. Flavio Quizhpi, por su supervisión y realización del tema propuesto de principio a fin en el desarrollo del proyecto de titulación.

De igual manera quiero agradecer al Ing. José Aller, por compartir el conocimiento adquirido y solventar las dudas presentadas durante la ejecución del proyecto.

De antemano también quiero agradecer a mi compañero de trabajo Sebastián Tapia por su motivación y dedicación en la elaboración del proyecto de titulación.

Finalmente quiero agradecer a la Universidad Politécnica Salesiana por la formación profesional que ofrece y por el compromiso de instruirme como buen cristiano y honrado ciudadano en todos los ámbitos de desarrollo profesional.

Diego Geovanny Criollo Tacuri

RESUMEN

BIL representa el valor para el ensayo de tipo impulso de rayo o NBI que determina la rigidez dieléctrica de un dispositivo el cual esta expresado en función del valor de cresta de un impulso estándar. La investigación realizada aporta valores en ensayos disruptivos en dispositivos de media tensión a través de esferas espinterométricas construidas, en su etapa electrónica, por los autores, las cuales permiten realizar la descarga tipo rayo. En este documento se presentan las pruebas realizadas a diferentes niveles de tensión y determinando el porcentaje de probabilidad de falla del dispositivo. En este enfoque propuesto cada uno de los dispositivos tendrá su factor de corrección atmosférica para las pruebas de impulso positivo y negativo obteniendo los parámetros y niveles de tensión adecuados para los ensayos aplicados. De esta manera se validó el funcionamiento del circuito electrónico propuesto para las esferas, se realizó los análisis respectivos de los ensayos de acuerdo con el IEEE STD 4 aplicada para este tipo de pruebas.

Palabras Clave: Nivel Básico de Aislamiento, Descarga Parcial, Presión, Ensayos Disruptivos, Esferas Espinterométricas.

ABSTRACT

BIL represents the value for the beam impulse type test or NBI that determines the dielectric strength of a device which is expressed as a function of the peak value of a standard pulse. The research carried out contributes with values in disruptive tests in medium voltage devices through spinterometric spheres constructed, in their electronic stage, by the authors. which allow lightning-type discharge. This document presents the tests carried out at different voltage levels and determines the percentage of failure probability of the device. In this proposed approach, each of the devices will have its atmospheric correction factor for the positive and negative impulse tests, obtaining the parameters and adequate voltage levels for the applied tests. In this way the functioning of the proposed electronic circuit for the spheres was validated, the respective analysis of the tests was carried out according to the IEEE STD 4 applied for this type of tests.

Keywords: Basic Insulation Level, Partial Discharge, Pressure, Disruptive Tests, Spinterometric Spheres.

PREFACIO

En la actualidad el sector eléctrico trata de dar solución a la protección de los equipos eléctricos, para que su funcionamiento sea fiable y cumpla con un periodo de ciclo de vida útil adecuado. Por ello uno de los principales problemas es la degradación del aislamiento en los equipos de potencia, es aquí donde entra el parámetro de nivel básico de aislamiento (NBA o BIL) para impulso tipo rayo.

El planteamiento del presente trabajo surgió por razón de dar solución a la problemática, la cuál es realizar la corrección atmosférica con la aplicación de ensayos disruptivos, para así establecer un valor referencial del nivel básico de aislamiento (NBA o BIL) para elementos de media tensión utilizados en la ciudad de Cuenca, teniendo en cuenta que el lugar para estos ensayos es el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana.

Las esferas espinterométricas están ligadas a los ensayos del BIL o NBA y en la situación anterior a la investigación, las mismas se encuentran dañadas, por eso resulta necesario la construcción de un sistema actualizado para el nuevo funcionamiento de esta. El sistema debe de garantizar un acceso a elementos comunes del mercado y sobre todo actualizados. Garantizando funcionamiento y minimizando costos de materiales.

Las esferas espinterométricas construidas generarán un tren de impulsos que alimentará a un transformador, el mismo eleva la tensión a su salida, de esta manera ioniza el medio, permitiendo romper la resistencia del aire y generando la descarga parcial del circuito. La tensión generada, en forma de impulso será aplicada a los diferentes elementos en ensayo. Se tendrá en cuenta los factores de corrección atmosférica y tensión de impulso positivo normalizadas para el proceso de los distintos ensayos a realizar en los dispositivos de media tensión.

ÍNDICE GENERAL

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR ii

CERTIFICACIÓN iii

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD iv

DEDICATORIA v

AGRADECIMIENTOS vi

RESUMEN vii

ABSTRACT viii

PREFACIO ix

ÍNDICE GENERAL x

ÍNDICE DE FIGURAS xiv

ÍNDICE DE TABLAS xviii

GLOSARIO DE TÉRMINOS xix

INTRODUCCIÓN 1

1. CAPÍTULO 1: Problema 2

1.1. Problema de estudio 2

1.2. Justificación 3

1.3. Beneficiarios 4

1.4. Objetivos 4

1.4.1. Objetivo general 4

1.4.2. Objetivos específicos 4

1.5. Metodología aplicada 4

2. CAPÍTULO 2: Fundamentación teórica 6

2.1. Introducción 6

2.2. Disrupción eléctrica 6

2.3. El gas como un medio aislante 6

2.3.1. Teoría de Townsend 7

2.3.2. Teoría de Streamer 8

2.4. Nivel básico de aislamiento al impulso por rayo (BIL O NBA) 9

2.5. Calibración de los dispositivos de medida de las condiciones atmosféricas al momento del ensayo **10**
2.6. Dispositivo de medición: esfera espinterométrica **10**
2.7. Factores de corrección atmosférica **11**
2.8. Corrección atmosférica **11**
2.8.1. Corrección atmosférica usando el Método 2 12
2.9. Cálculo de humedad relativa a humedad absoluta **14**
2.9.1. Humedad Relativa 14
2.9.2. Humedad Absoluta 14
2.10. Determinación del tamaño de la muestra **15**
2.11. Distribución normal **16**
2.12. Placas de circuito impreso **17**
2.13. Herramientas de diseño PCB **17**
2.14. Estándar IPC-2221 ..... **18**
2.15. Ensamblaje de placas impresas **18**
2.19. Consideraciones técnicas para un diseño **21**
2.19.1. Mecánicas 21
2.19.2. Eléctricas 21
2.19.3. Materiales 23
2.20. Propiedades eléctricas de los materiales **23**
3. CAPÍTULO 3: Metodología **25**
3.1. Diseño de la placa de control **25**
3.1.1. Información general 25
3.1.2. Requerimientos generales de los espinterómetros 25
3.1.3. Funcionamiento de la placa de control 26
3.2. Etapas de la placa de control **26**
3.2.1. Fuente de alimentación 27
3.2.2. Circuito de protección 27
3.2.3. Generador de pulsos 27
3.2.4. Interruptor 28
3.2.5. Bobina de encendido 28
3.2.5.1. Multiplicador de tensión 28
3.2.5.2. Esquema del multiplicador de tensión 28
3.2.6. Salida de alto voltaje 29
3.3. Esquema del circuito de control **29**
3.3.1. Circuito monoestable 30

3.4. Diseño electrónico de la placa de control 30
3.4.1. Esquema de diseño del circuito electrónico 31
3.4.2. Diseño PCB de la tarjeta de circuito electrónico 32
3.4.3. Elementos de la PCB 34
3.5. Diseño funcional 35
3.5.1. Descripción y diseño funcional de la placa electrónica 35
3.6. Comportamiento de señales de la placa electrónica 39
3.7. Medidas de seguridad 42
4. CAPÍTULO 4: Análisis de resultados 44
4.1. Introducción 44
4.2. Elemento 1: Descargador o pararrayos tipo polimérico de óxido de Zn, clase 3 tipo hevy duty, con módulo de desconexión, 18 kV / 10 kA. 45
4.2.1. Medición de tensión de impulso tipo rayo 45
4.2.1.1. Equipo 45
4.2.1.2. Configuración de prueba 46
4.2.1.3. Proceso 47
4.2.2. Parámetros iniciales 48
4.2.2.1. Condiciones atmosféricas estándar 49
4.2.2.2. Condiciones atmosféricas de prueba 49
4.2.2.3. Cálculo de humedad relativa a humedad absoluta 49
4.2.2.4. Corrección atmosférica 49
4.2.3. Determinación del tamaño de la muestra 50
4.2.4. Muestras obtenidas 51
4.2.5. Cálculo para la distribución normal o Gauss 55
4.2.6. Gráfica de la distribución normal 59
4.2.7. Graficas de resultados del impulso tipo rayo 62
4.3. Elementos usados en la corrección atmosférica 63
4.3.1. Graficas de los elementos seleccionados en las pruebas 64
4.3.2. Gráfica de la distribución normal 66
4.3.3. Figuras de impulso tipo rayo 71
4.3.3.1. Elemento 1 71
4.3.3.2. Elemento 2 72
4.3.3.2.1. Positivo 72
4.3.3.2.2. Negativo 73
4.3.3.3. Elemento 3 74
4.3.3.3.1. Positivo 74
4.3.3.3.2. Negativo 75

4.3.3.4. Elemento 4 76
4.3.3.4.1. Positivo 76
4.3.3.4.2. Negativo 77
4.3.3.5. Elemento 5 79

5. Conclusiones 81

6. Recomendaciones 83

7. Bibliografía 84

8. Anexos 85

8.1. Anexo A: Carga digital de archivos, de las mediciones realizadas (2.045 elementos) 85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Efecto Townsend..... 7
Figura 2 Curva corriente - tensión de una descarga eléctrica..... 8
Figura 3 Factor de corrección de humedad k en función de la humedad absoluta..... 13
Figura 4 Valor de los exponentes m y n para la corrección de la densidad del aire y w para las correcciones de la humedad, en función de la distancia de la descarga disruptiva. 14
Figura 5 Distribución normal: curva característica. 17
Figura 6 Área libre de los componentes vista lateral..... 20
Figura 7 Área libre de tierra para piezas altas. 20
Figura 8 Prueba de sondeo para pines. 21
Figura 9 Diagrama de bloques del circuito de accionamiento..... 26
Figura 10 Esquema del multiplicador de tensión DC 3-6V a 400kV..... 29
Figura 11 Esquema de la placa de control..... 29
Figura 12 Detalle de las dimensiones de la placa electrónica. 31
Figura 13 Detalle de las dimensiones del espacio esférico. 31
Figura 14 Diseño del circuito electrónico implementado..... 32
Figura 15 Diseño PCB de la tarjeta electrónica..... 33
Figura 16 Diseño frontal de la placa electrónica A. 33
Figura 17 Diseño posterior de la placa electrónica B..... 34
Figura 18 Diseño funcional de la placa de control. 36
Figura 19 Diseño funcional de la placa de dispositivos. 36
Figura 20 Parte frontal de la placa electrónica diseñada A. 37
Figura 21 Parte posterior de la placa electrónica diseñada B..... 37
Figura 22 Placa de control implementada en la esfera espinterométrica. 38
Figura 23 Placas de dispositivos implementada en la esfera espinterométrica. 38
Figura 24 Esfera espinterométrica armada con sus componentes principales..... 39
Figura 25 Señal de ingreso en los bornes X3 - 1,2 de la placa electrónica. 40
Figura 26 Señal de salida constante del chip de circuito integrado..... 40
Figura 27 Señal de salida múltiple del chip de circuito integrado..... 41
Figura 28 Señal de salida constante de la placa electrónica..... 41
Figura 29 Múltiple señal de salida del chip de circuito integrado..... 42
Figura 30 Elemento 1. 45

Figura 31 Montaje experimental para la generación de tensiones de impulso tipo rayo.47
Figura 32 Circuito armado para el elemento 1. 48
Figura 33 Gráfica de la distribución normal para el elemento 1. 59
Figura 34 Área entre dos valores de la distribución normal del elemento1. 60
Figura 35 Área para la región o zona izquierda de la distribución normal del elemento1. 61
Figura 36 área para la región o zona izquierda del elemento1. 62
Figura 37 Curva de tensión de impulso tipo rayo del elemento 1. 62
Figura 38 Curva de tensión de impulso tipo rayo del elemento 1 donde se muestra el tiempo de 1,20us. 63
Figura 39 Curva de tensión de impulso tipo rayo del elemento 1 donde se muestra el tiempo de 50us. 63
Figura 40 Elemento 1. 65
Figura 41 Elemento 2. 65
Figura 42 Elemento 3. 65
Figura 43 Elemento 4. 66
Figura 44 Elemento 5. 66
Figura 45 Grafica de la distribución normal de las pruebas de impulso tipo rayo positivo para el elemento 1. 67
Figura 46 Grafica de la distribución normal de las pruebas de impulso tipo rayo positivo para el elemento 2. 67
Figura 47 Grafica de la distribución normal de las pruebas de impulso tipo rayo negativo para el elemento 2. 68
Figura 48 Grafica de la distribución normal de las pruebas de impulso tipo rayo positivo para el elemento 3. 68
Figura 49 Grafica de la distribución normal de las pruebas de impulso tipo rayo negativo para el elemento 3. 69
Figura 50 Grafica de la distribución normal de las pruebas de impulso tipo rayo positivo para el elemento 4. 69
Figura 51 Grafica de la distribución normal de las pruebas de impulso tipo rayo negativo para el elemento 4. 70
Figura 52 Grafica de la distribución normal de las pruebas de impulso tipo rayo positivo para el elemento 5. 70
Figura 53 Curva de tensión de impulso tipo rayo del elemento 1. 71

Figura 54 Curva de tensión de impulso tipo rayo del elemento 1 donde se muestra el tiempo de 1,20us. 71
Figura 55 Curva de tensión de impulso tipo rayo del elemento 1 donde se muestra el tiempo de 50us. 71
Figura 56 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 2. 72
Figura 57 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 2 donde se muestra el tiempo de 1,20us. 72
Figura 58 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 2 donde se muestra el tiempo de 50us. 72
Figura 59 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 2 donde se muestra la disrupción eléctrica. 73
Figura 60 Curva de tensión de impulso tipo rayo negativo del elemento 2. 73
Figura 61 Curva de tensión de impulso tipo rayo negativo del elemento 2 donde se muestra el tiempo de 1,20us. 73
Figura 62 Curva de tensión de impulso tipo rayo negativo del elemento 2 donde se muestra el tiempo de 50us. 73
Figura 63 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 3. 74
Figura 64 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 3 donde se muestra el tiempo de 1,20us. 74
Figura 65 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 3 donde se muestra el tiempo de 50us. 74
Figura 66 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 3 donde se muestra la disrupción eléctrica. 75
Figura 67 Curva de tensión de impulso tipo rayo negativo del elemento 3. 75
Figura 68 Curva de tensión de impulso tipo rayo negativo del elemento 2 donde se muestra el tiempo de 1,20us. 75
Figura 69 Curva de tensión de impulso tipo rayo negativo del elemento 3 donde se muestra el tiempo de 50us. 76
Figura 70 Curva de tensión de impulso tipo rayo negativo del elemento 3 donde se muestra la disrupción eléctrica. 76
Figura 71 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 4. 77
Figura 72 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 4 donde se muestra el tiempo de 1,20us. 77

Figura 73 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 4 donde se muestra el tiempo de 50us. 77
Figura 74 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 4 donde se muestra la disrupción eléctrica. 77
Figura 75 Curva de tensión de impulso tipo rayo negativo del elemento 4. 78
Figura 76 Curva de tensión de impulso tipo rayo negativo del elemento 4 donde se muestra el tiempo de 1,20us. 78
Figura 77 Curva de tensión de impulso tipo rayo negativo del elemento 4 donde se muestra el tiempo de 50us. 78
Figura 78 Curva de tensión de impulso tipo rayo negativo del elemento 4 donde se muestra la disrupción eléctrica. 79
Figura 79 Curva de tensión de impulso tipo rayo del elemento 5. 79
Figura 80 Curva de tensión de impulso tipo rayo del elemento 5 donde se muestra el tiempo de 1,20us. 79
Figura 81 Curva de tensión de impulso tipo rayo del elemento 5 donde se muestra el tiempo de 50us. 80
Figura 82 Curva de tensión de impulso tipo rayo del elemento54 donde se muestra la disrupción eléctrica. 80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Aplicación de factores para la corrección atmosférica. 13
Tabla 2 Valores de confianza Z. 16
Tabla 3 Herramientas de diseño PCB. 18
Tabla 4 Tamaños de placas estandarizados. 22
Tabla 5 Propiedades típicas de los materiales dieléctricos comunes..... 23
Tabla 6 Descripción de conectores de la PCB de control. 34
Tabla 7 Dispositivos conectores de la placa de control PCB. 35
Tabla 8 Selección de elementos de media tensión. 44
Tabla 9 Equipo a usar para la realización de la prueba. 45
Tabla 10 Mediciones realizadas en el elemento 1. 51
Tabla 11 Datos para la realización de la distribución normal en el elemento 1. 55
Tabla 12 Evaluación del área entre dos valores del elemento1. 60
Tabla 13 Evaluación del área para la región o zona izquierda del elemento1..... 61
Tabla 14 Evaluación del área para la región o zona derecha del elemento1. 61
Tabla 15 Elementos de media tensión usados en la corrección atmosférica. 64

GLOSARIO DE TÉRMINOS

BIL	Basic Insulation Level (español, NBA: Nivel Básico de Aislamiento)
AC	Alternating Current (español, CA: Corriente Alterna
PD	Partial Discharge (español, DP: Descarga Parcial)
P	Pressure (español, P: Presión)
D	Distance (español, D: Distancia)
MOV	Metal Oxide Varistor (español, Varistor de Óxido de Metal)
mAh	Milli Ampere Hour (español, Miliamperios Hora)
TIP	Texas Instruments Power (español, Transistor de Potencia Darlington)
FET	Field-Effect Transistor (español, Transistor de Efecto de Campo)
IGBT	Insulated Gate Bipolar (español, Transistor Transistor Bipolar de Puerta Aislada)
PCB	Printed Circuit Board (español, Placa de Circuito Impreso
CAD	Computer Aided Design (español, Diseño Asistido por Computadora)
EAGLE	Easily Applicable Graphical Layout Editor (español, Editor de Diseño Gráfico Fácilmente Aplicable)

INTRODUCCIÓN

El sistema de alta tensión, en general, consiste en una compleja configuración de generadores, líneas de transmisión de larga distancia y redes de distribución localizadas con conductores por encima y por debajo del suelo para suministrar energía a los usuarios. A esto se une una amplia gama de componentes de alta tensión cuya operación exitosa depende de la elección correcta del aislamiento eléctrico para la aplicación y el nivel de tensión (Saguay & Torres, 2011).

La condición de los materiales aislantes es un factor crítico en la determinación de la vida de muchos equipos. La necesidad de un mantenimiento eficaz, incluida la monitorización continua del aislamiento en muchos casos, se está convirtiendo en un requisito importante en la gestión de activos de los sistemas de energía existentes y previstos.

La aplicación de ensayos disruptivos brinda un punto clave para la determinación del nivel básico de aislamiento para impulso tipo rayo (NBA o BIL). Dicho nivel establece el impulso máximo de tensión que puede soportar antes de que se produzca un arco eléctrico o flameo (Society, 2013).

Dado que la descarga disruptiva del aislamiento externo depende de condiciones atmosféricas, en la normativa estándar vigente, se presenta parámetros atmosféricos estándar por la normativa IEEE 4-2013 (IEEE STANDARD, 2013) los cuales son referidos a una temperatura de 20 grados centígrados (℃), presión de 101.3 kilo Pascales (kPa) y una humedad absoluta de 11 gramos por metro cubico ($\mathrm{gr/m^3}$) (corrección de altura y temperatura). Se ha considerado la necesidad de normalizarlos en parámetros atmosféricos de la localidad, de manera particular para los dispositivos de media tensión utilizados en la ciudad de Cuenca y de esta manera se obtiene precisión y exactitud al momento de realizar el diseño del BIL O NBA para cualquier dispositivo de media tensión.

1. CAPÍTULO 1: Problema

1.1. Problema de estudio

En el sector de energía eléctrica los ingenieros tratan de dar solución a la protección de los equipos eléctricos para que su funcionamiento sea fiable y también cumpla con un periodo de ciclo de vida útil adecuado. Es por ello por lo que unos de los principales problemas es la degradación del aislamiento en los equipos de potencia principalmente. Es aquí donde entra el factor del BIL o NBA, el cual es un parámetro de diseño de dispositivos para resistir tensiones de un cierto valor mínimo antes de que el impulso de sobretensión sea descargado a través de dispositivos de protección contra sobretensiones.

Dado que la descarga disruptiva del aislamiento externo, depende de condiciones atmosféricas en la normativa estándar vigente, se presenta parámetros atmosféricos estándar, los cuales son referidos a una temperatura de 20 grados centígrados (℃), presión de 101.3 kilo Pascales (kPa) y una humedad absoluta de 11 gramos por metro cubico (gr/m^3) (corrección de altura y temperatura), entonces el problema surge por la necesidad de encontrar valores del BIL pero expresados en parámetros atmosféricos de nuestra localidad, en este caso en particular en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana, ubicado en la ciudad de Cuenca.

Los fabricantes de los equipos de alta tensión refieren sus valores a los estándares citados. Lo que involucra el reajuste de los valores antes mencionados para el factor del BIL en dispositivos de media tensión usados en la ciudad de Cuenca.

Para poder realizar las mediciones y lograr hacer el reajuste de valores, es necesario realizar varios ensayos en condiciones del laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana ubicado en la ciudad de Cuenca, para aquello se realizará en estos dispositivos, los cuales se encuentran disponibles en el laboratorio de alta tensión de la universidad y son listados a continuación:

1. Descargador o pararrayos tipo polimérico de óxido de Zn, clase 3 tipo hevy duty, con módulo de desconexión, 18 kV / 10 kA.

2. Aislador tipo espiga (pin), de porcelana, clase ANSI 56-1, 25 kV.
3. Aislador de suspensión, de porcelana, clase ANSI 52, 15 kV.
4. Aislador tipo suspensión, de caucho siliconado, clase ANSI DS-15, 15 kV.
5. Cable de alta tensión TYPE MV-90 2 AWG COMPACT CU XLPE, 15kV.

Actualmente la esfera espinterométrica que se encuentra en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana, se ha visto afectada por la degradación continúa debido al gran manejo de pruebas al que es expuesta. Y al no tener ningún respaldo de su circuito electrónico, se ha visto afectado llegando al punto de dar por terminada su vida útil.

Al ser una parte esencial del laboratorio se ha visto en la necesidad de mejorar su circuito y así contar con un respaldo para pruebas futuras. Es por aquello que para realizar ensayos disruptivos para la determinación del BIL a través de esferas espinterométricas en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana, se requiere la construcción de una placa electrónica de la esfera espinterométrica, en la cual se aplicará la norma IPC 2221 para la creación de placas electrónicas.

1.2. Justificación

Dado a que los parámetros atmosféricos son de tipo estándar por la normativa IEEE 4-2013 (IEEE STANDARD, 2013), se ha considerado la necesidad de normalizarlos, de manera particular, para los dispositivos de media tensión utilizados en la ciudad de Cuenca y que se podrán generalizar para la región andina del Ecuador, de esta manera se obtiene precisión y exactitud al momento de realizar el diseño del BIL O NBA para cualquier dispositivo de media tensión.

Ahora bien, dado que la esfera espinterométrica se encuentra ligada con el problema de estudio, es de vital importancia, para la realización de la normalización del BIL para dispositivos de media tensión utilizados en ciudad de Cuenca, como también para el laboratorio de alta tensión. Por su importancia, se ve en la necesidad de mantener su funcionamiento con una renovación de su placa electrónica, debido a que facilita el aprendizaje al permitir realizar pruebas de descargas parciales, para entender como esto

afectan a un área parcial de un sistema de aislamiento eléctrico, solido o liquido bajo el estrés de la alta tensión.

1.3. Beneficiarios

Sabiendo que es un proyecto técnico y tiene un enfoque investigativo los beneficiarios serán: (1) los profesionales ligados a la coordinación de aislamiento, (2) la Academia y (3) el Sector Eléctrico del Ecuador.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

a. Aplicar ensayos disruptivos para la determinación del BIL a través de esferas espinterométricas en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana.

1.4.2. Objetivos específicos

a. Diseñar el circuito de la placa electrónica de la esfera espinterométrica para el laboratorio de alta tensión.
b. Construir la placa electrónica de la esfera espinterométrica para el laboratorio de alta tensión.
c. Verificar la funcionalidad de la placa electrónica de la esfera espinterométrica.
d. Aplicar ensayos disruptivos para la determinación del BIL.
e. Analizar los valores obtenidos en la fase de pruebas.

1.5. Metodología aplicada

Para el desarrollo de los objetivos planteados en el presente proyecto técnico, en primer lugar, se realizará una investigación exploratoria la cual permitirá tener una visión general del campo de estudio que comprende el valor atmosférico del BIL en condiciones específicas.

Se tendrá también que realizar una investigación bibliográfica con la que se pretende realizar un estado del arte sobre descargas disruptivas, la cual conducirá a conocer sobre el comportamiento del BIL ante estas circunstancias.

Con la información obtenida mediante la investigación exploratoria y bibliográfica, se procede a plantear el diseño investigativo, y como una primera fase el diseño y construcción de la placa electrónica de la esfera espinterométrica, para una segunda fase de pruebas de funcionamiento, y finalmente una tercera fase en la cual se propone normalizar el valor de BIL en dispositivos de media tensión, de forma específica para la ciudad de Cuenca.

El enfoque que se pretende utilizar para esta investigación es del tipo explicativa para el análisis correcto de los valores obtenidos sobre las pruebas efectuadas.

Como también se utilizará la metodología de investigación inductiva y deductiva para efectuar la obtención del nivel básico de aislamiento en condiciones atmosféricas adecuadas.

2. CAPÍTULO 2: Fundamentación teórica

2.1. Introducción

El sistema de alta tensión, en general, consiste en una compleja configuración de generadores, líneas de transmisión de larga distancia y redes de distribución localizadas con conductores por encima y por debajo del suelo para suministrar energía a los usuarios. A esto se une una amplia gama de componentes de alto voltaje cuya operación exitosa depende de la elección correcta del aislamiento eléctrico para la aplicación y el nivel de tensión. La condición de los materiales aislantes cuando son nuevos, y especialmente a medida que envejecen, es un factor crítico en la determinación de la vida de muchos equipos. La necesidad de un mantenimiento eficaz, incluida la monitorización continua del aislamiento en muchos casos, se está convirtiendo en un requisito importante en la gestión de activos de los sistemas de energía existentes y previstos. A medida que los voltajes y las potencias a transmitir aumentaron durante los últimos cien años, los dieléctricos básicos mejoraron mucho después de una extensa investigación por parte de la industria y en laboratorios especializados de alto voltaje, donde gran parte de este trabajo continúa (Saguay & Torres, 2011).

2.2. Disrupción eléctrica

Los sistemas de energía eléctrica están sometidos a sobretensiones y son de dos tipos, la sobretensión externa es la de tipo rayo y sobretensión interna la cual es la operación de interruptores, estas sobretensiones dan lugar a altos voltajes temporales y como acto consecuente a la generación de arcos eléctricos. El desarrollo completo de la generación de un arco eléctrico, entre los extremos de un aislador se lo considera como disrupción eléctrica (Medina, 2012).

Esta disrupción eléctrica en los sistemas eléctricas es un cambio brusco del medio aislante a un medio conductor de forma parcial o total, como resultado se da una descarga eléctrica (Medina, 2012).

2.3. El gas como un medio aislante

El gas (en caso particular el aire) es un material comúnmente utilizado como aislante en aplicaciones de alta tensión y para que este medio tenga excelentes cualidades deberá

poseer alta resistencia, estabilidad térmica y química, no inflamables, una buena transferencia del calor y tiene un bajo costo, es por eso que el aire es de uso común; porque este dieléctrico se encuentra en el ambiente (Pedersen, 1967).

La ruptura dieléctrica de tensiones elevadas en un medio dieléctrico se debe principalmente a la ionización del medio, en la que electrones e iones se crean a partir de átomos o moléculas neutros y por tanto a su migración del ánodo y al cátodo (Pedersen, 1967).

La teoría de Townsend y la teoría de Streamer son los dos tipos de teorías que explican el mecanismo de descomposición en diferentes condiciones como presión, temperatura, configuración del campo del electrodo, la naturaleza de las superficies de los electrodos y disponibilidad de partículas conductoras iniciales (Pedersen, 1967).

2.3.1. Teoría de Townsend

En esta teoría trata de dar una explicación el fenómeno de ruptura dieléctrica bajo ciertos criterios de presión (Karppine, 2017). La descarga eléctrica se da a través de un medio gaseoso ionizado (ejemplo, el aire) cuando es sometido a un cierto grado de tensión elevada o alta. Siendo capaz de acelerar los electrones libres al nivel de energía necesario para causar la ionización (Pérez Formigó, 2010).

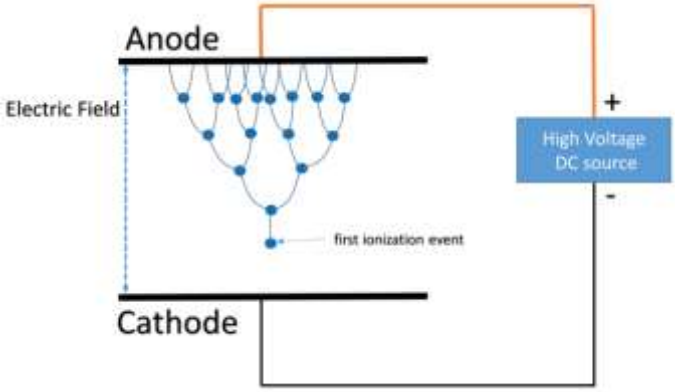


Figura 1 Efecto Townsend.
Fuente: (Pérez Formigó, 2010).

Towsend dio a conocer la reacción que existe entre la corriente que atraviesa dos electrones y la tensión aplicada, dando como resultado la siguiente gráfica.

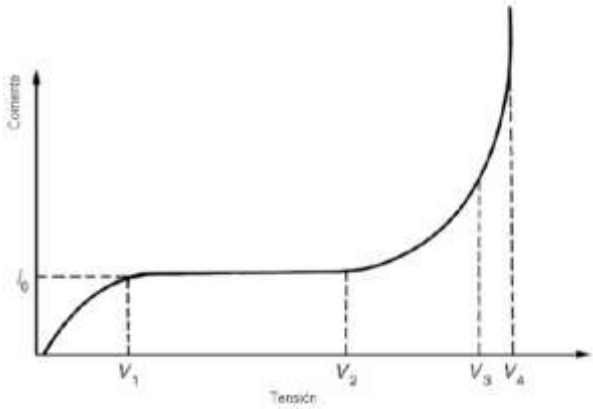


Figura 2 Curva corriente - tensión de una descarga eléctrica.
Fuente: (Pérez Formigó, 2010).

Donde en una primera etapa, la corriente aumenta directamente proporcional a la tensión aplicada (tensión 1). Una vez que se alcanza el valor de saturación, el intervalo comprendido entre la tensión 1 y 2 permanece constante. Luego que superar la tensión, de tensión 2 a 3, a un valor, la corriente se eleva exponencialmente. Y finalmente en la última etapa de Towsend se explica que, mediante un proceso de ionización de las moléculas de gas, por colisión de electrones, se ioniza las partículas neutras de gas (Pérez Formigó, 2010).

2.3.2. Teoría de Streamer

Si bien la teoría de Townsend, falla para explicar algunas observaciones experimentales tales como rutas ramificadas de los canales de arqueo y cuando el espacio entre electrodos es sobre-estresado o si tiene valores grandes de presión necesaria para el rompimiento eléctrico (Pd). Puesto que (P) es la presión necesaria para el rompimiento eléctrico, y (d) distancia de ruptura.

Debido a estas y otras limitaciones, se propuso la teoría de los Streamers. Esta teoría propuesta independientemente que involucra la formación de avalanchas electrónicas individuales en la etapa inicial y su posterior transición a Streamers (RAMOS, 2004).

La descarga instantánea o Streamer tiene en cuenta la distribución de carga espacial que producen las cargas. El criterio para que una avalancha de Townsend se transforme en

canal, es que se alcance una proporción mínima de portadores y los efectos del gas (fotoionización, ionización por iones positivos) predominan sobre los procesos secundarios en los electrodos (incidencia de iones, fotoemisión).

Un Streamer se forma por una intensa avalancha primaria de electrones, que comienza en el cátodo. Dicha avalancha, genera un campo eléctrico debido a la distribución espacial de carga interna. Dicha distribución se incrementa con la propagación y el desarrollo de la avalancha (RAMOS, 2004).

Este mecanismo tiene gran relevancia en las descargas eléctricas parciales principalmente en las producidas por campos no uniformes (IEEE STANDARD, 2013).

2.4.Nivel básico de aislamiento al impulso por rayo (BIL O NBA)

Los equipos de alta tensión vienen diseñados con un nivel de aislamiento, el cual es una resistencia de aislamiento expresado en función de un voltaje soportado (GÓMEZ, 2009).

El NBI (BIL por sus siglas en inglés) es el nivel básico de aislamiento para impulso por rayo, el cual es un nivel específico de aislamiento expresado en función del valor de cresta (máximo) de un impulso estándar tipo rayo (IEEE STANDARD, 2013).

El NBI es el valor de tensión máxima que el equipo soporta ante una solicitud de rayo en el sistema, es un impulso que aumenta a su valor de cresta de voltaje 1.2 microsegundos y cae a la mitad de valor de cresta en 50 microsegundos (IEEE STANDARD, 2013).

Es innecesario decir que la capacidad de resistencia de voltaje de todos los equipos de una subestación eléctrica o de un sistema de transmisión eléctrica debe decidirse según su voltaje del sistema operativo. Para garantizar la estabilidad del sistema, durante el fenómeno de sobretensión, la ruptura o la resistencia al destello de todos los equipos conectados al sistema debe superar un nivel seleccionado (IEEE STANDARD, 2013).

El voltaje de impulso del rayo es completamente un fenómeno natural y por lo tanto es altamente incierto en la naturaleza. Por lo tanto, es imposible predecir la forma y el tamaño de la oleada de rayos (IEEE STANDARD, 2013).

2.5. Calibración de los dispositivos de medida de las condiciones atmosféricas al momento del ensayo

Los parámetros de temperatura, presión y humedad deben medirse por medio de termómetros, barómetros e higrómetros respectivamente, los cuáles deben estar correctamente calibrados, ya que dichos parámetros al medirse deben presentar la exactitud adecuada para no afectar los resultados obtenidos por medio de los ensayos (RAMOS, 2004).

2.6. Dispositivo de medición: esfera espinterométrica

La elección del método más adecuado para la medición de alta tensión depende del valor de tensión medido, de los dispositivos de medición disponibles y de si la necesidad es medir el pico o el valor efectivo.

Las esferas espinterométricas miden el voltaje máximo de AC con una precisión de ± 3%. Y la tensión de ruptura depende de la distancia entre las esferas, el diámetro de las esferas y el tipo de tensión: directa, alterna o impulsiva (Valavala & Kanchanapalli, 2014).

El voltaje de ruptura es una función no lineal de la distancia de separación que se debe a la creciente no homogeneidad de campo. La distancia entre las esferas se puede disponer verticalmente, con la esfera inferior puesta a tierra, u horizontalmente. En ambos casos, se deben tener en cuenta los parámetros y definir la distribución de campo entre las dos esferas que están más próximas entre sí (Valavala & Kanchanapalli, 2014).

La distribución del campo de ruptura puede ser controlada por la geometría del electrodo y por la densidad del aire. La tensión de ruptura dentro del espacio de las dos esferas se ve afectada por algunos factores: las condiciones atmosféricas (densidad del aire, humedad, temperatura y la presión) (Valavala & Kanchanapalli, 2014).

Y finalmente queda resaltar que la esfera espinterométrica está compuesta de una placa electrónica la cual permite generar un tren de impulsos que estos a su vez con la ayuda de un transformador elevan su tensión hasta de $9V$ a $13KV$, valores referenciales de algunos fabricantes, siendo controlada por un cable de fibra óptica para la activación del circuito, la misma se dispone en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana.

2.7. Factores de corrección atmosférica

La descarga disruptiva de un aislamiento externo depende de las condiciones atmosféricas de su entorno. Habitualmente la tensión de flameo de un espacio dado en el aire aumenta por aumento de la densidad del aire o de la humedad (IEEE STANDARD, 2013).

Aplicando los factores de corrección, una tensión de flameo medida en unas condiciones de ensayo dadas (temperatura, presión, humedad), puede ser convertida al valor que se habría obtenido bajo las condiciones atmosféricas de referencia normalizadas. Recíprocamente, una tensión de ensayo especificada para las condiciones de referencia puede ser convertida al valor equivalente en las condiciones existentes durante el ensayo (IEEE STANDARD, 2013).

La tensión de descarga disruptiva es proporcional al factor de corrección kt que resulta de la multiplicación de dos factores de corrección (IEEE STANDARD, 2013):

a. El factor de corrección de la densidad del aire kd.
b. El factor de corrección de la humedad kh.

$$kt = \frac{kd}{kh} \tag{1}$$

2.8. Corrección atmosférica

Una descarga disruptiva dependerá de las condiciones atmosféricas de la localidad, tales variantes son la presión, humedad y temperatura. Entonces para realizar una óptima corrección atmosférica se la realiza bajo la norma IEEE STD 4 - 2013 (IEEE STANDARD, 2013), la cual indica la manera de efectuar la corrección con dos métodos:

a. Método 1: usa el factor k (es recomendado para equipos nuevos y es más aceptado internacionalmente)
b. Método 2: usa el factor de kd y kh (es para distancia de aire menor a un metro, es recomendable para equipos existentes y comparación contra datos históricos).

2.8.1. Corrección atmosférica usando el Método 2

Las condiciones atmosféricas estándar son las siguientes:

a. La temperatura $\mathrm{t_0} = 20°\mathrm{C}$
b. La presión $\mathrm{b_0} = 101{,}3\ \mathrm{kPa}\ (1013\ \mathrm{mbar})$
c. La humedad absoluta $\mathrm{h_0} = 11\ {}^{\mathrm{g}}/_{\mathrm{m}^3}$

Dos factores que considerar:

a. El factor de corrección de la densidad del aire k_d.

$$k_d = \left(\frac{p}{p_0}\right)^m \times \left(\frac{273 + t_0}{273 + t}\right)^n \qquad (2)$$

Donde P es la presión atmosférica bajo condiciones de prueba y t la temperatura en grados centígrados bajo condiciones de prueba.

b. El factor de corrección de humedad k_h.

$$k_h = k^w \qquad (3)$$

La constante k se da en la Figura 3 como una función de la humedad absoluta, siendo la $Curva\ a$ o la $Curva\ b$ aplicable según el tipo de voltaje.

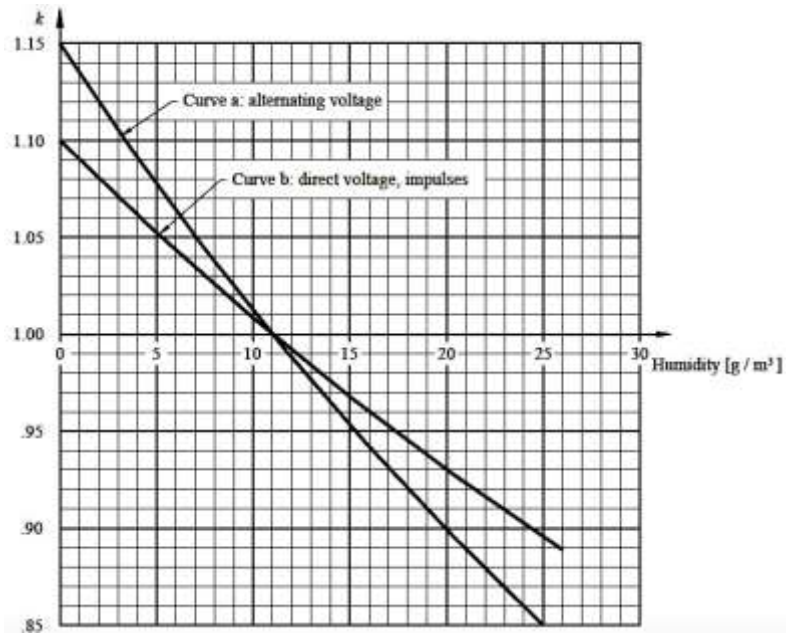


Figura 3 Factor de corrección de humedad k en función de la humedad absoluta.
Fuente: Figura 35 en la norma IEEE STD 4 - 2013.

Los exponentes m, n y w de factores los cuales se muestra en la Tabla 1 y la Figura 4.

Tabla 1 Aplicación de factores para la corrección atmosférica.
Fuente: Tabla 10 en la norma IEEE STD 4 – 2013.

Type of test voltage	Electrode form	Polarity	Air density correction exponents *m* and *n* (see Note 2)	Humidity correction	
				Factor *k*	Exponent *w*
Direct voltage		+	1.0	See Figure 35 (Curve b)	0
		–			0
		+			1.0
		–			1.0
		+			1.0
		–			0
Alternating voltage		~	1.0	See Figure 35 (Curve a)	0
		~	See Figure 36		See Figure 36
		~	See Figure 36		See Figure 36
Lightning impulse voltage		+	1.0	See Figure 35 (Curve b)	0
		–			0
		+			1.0
		–			0.8
		+			1.0
		–			0
Switching impulse voltage		+	1.0	See Figure 35 (Curve b)	0
		–	1.0		0
		+	See Figure 36		See Figure 36
		–	0 (see Note 1)		0 (see Note 1)
		+	See Figure 36		See Figure 36
		–	0 (see Note 1)		0 (see Note 1)

Por falta de precisión en la información, m y n se considera que son iguales.

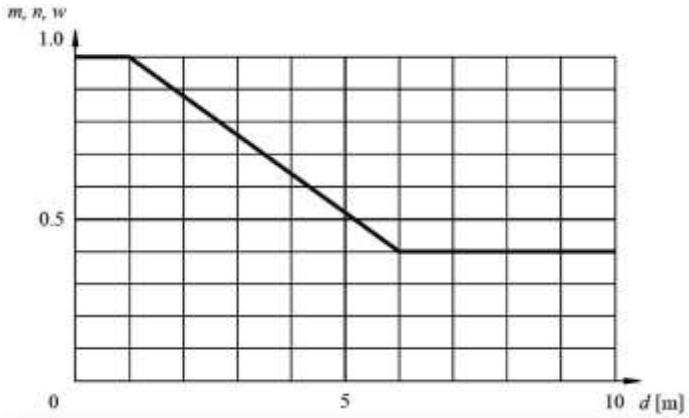


Figura 4 Valor de los exponentes m y n para la corrección de la densidad del aire y w para las correcciones de la humedad, en función de la distancia de la descarga disruptiva.
Fuente: Figura 36 en la norma IEEE STD 4 - 2013.

Y con los dos factores se obtiene que el voltaje disruptivo de descarga es proporcional a $k_d\ /k_h$.

2.9. Cálculo de humedad relativa a humedad absoluta

2.9.1. Humedad Relativa

La humedad del aire se debe al vapor de agua que se encuentra presente en la atmósfera.

$$RH = 100\frac{e}{e_w} \tag{4}$$

2.9.2. Humedad Absoluta

La masa de vapor de agua en una unidad de volumen de aire. Es una medida del verdadero contenido de vapor de agua en el aire.

$$AH = \frac{m_v}{V} \tag{5}$$

A partir de la humedad relativa y presión de saturación del vapor, podemos encontrar la verdadera presión del vapor.

$$e = e_w\frac{RH}{100} \tag{6}$$

Donde la presión de saturación del vapor en aire húmedo es igual a la multiplicación de la presión de saturación del vapor en la fase pura por la presión.

$$e_w = \left(6.112 \cdot e^{\frac{17.62t}{243.12+t}}\right)(1.0016 + 3.15 \cdot 10^{-6} \cdot p - 0.074 \cdot p^{-1}) \tag{7}$$

Las unidades de temperatura son grados centígrados, y las unidades de presión son hecto-pascales (hPa). Como dato se da que un 1 $hecto - pascal = 100\ pascales$.

Luego, se puede utilizar la ley general de gases perfectos, en donde para el caso es:

$$eV = mR_vT \tag{8}$$

Donde R es la constante universal de gas igual a 8313.6, y R_v es la constante de gas específica para vapor de agua igual a 461.5.

Entonces, se expresa la proporción de masa a volumen y donde queda como humedad absoluta (Organización Mundial Meteorológica, 2008).

$$\frac{m}{V} = \frac{e}{R_vT} \tag{9}$$

$$\frac{m}{V} = \frac{\left(6.112 \cdot e^{\frac{17.62t}{243.12+t}}\right)(1.0016 + 3.15 \cdot 10^{-6} \cdot p - 0.074 \cdot p^{-1}) \cdot \frac{RH}{100}}{(416.5) \cdot (273.15 + t)} \tag{10}$$

2.10. Determinación del tamaño de la muestra

La determinación del tamaño de la muestra es muy importante ya que nos brinda el número de muestras en este caso el número de medidas a tomar en cada una de las pruebas.

El universo de pruebas es infinito, se lo considera de esta manera ya que se puede realizar numerosas pruebas y el tiempo de cada prueba es de 1 minuto por prueba haciéndola de tiempos considerablemente altos, entonces se valora el error de estimación máximo aceptado como parte fundamental para el cálculo. La siguiente es la fórmula para el cálculo.

$$n = \frac{Z^2 \cdot p \cdot (1 - p)}{e^2} \tag{11}$$

n es el tamaño de la muestra

Z es el nivel de confianza (corresponden a tabla de valores Z)

p porcentaje de la población

p porcentaje de la población que tiene el atributo deseado

$p - 1$ porcentaje de la población que no tiene el atributo deseado

e error de estimación máximo aceptado

Ahora en la tabla 2 se muestra los valores de confianza a usar:

Tabla 2 Valores de confianza Z.
Fuente: Elaboración propia.

Valores de confianza	
95%	1.96
90%	1.65
91%	1.7
92%	1.76
93%	1.81
94%	1.89

2.11. Distribución normal

La distribución normal o de gauss es frecuentemente usada y la más importante dentro del cálculo de probabilidades, esta gráfica expresa una función de densidad con respecto de algún parámetro probabilístico. Dicha distribución lo que permite es maximizar la incertidumbre de una fuente de información con una media y varianza conocida.

Algunas características de esta distribución son las siguientes:

a. La distribución tiene una forma acampanada y posee un único pico máximo en el centro de esta, lo que hace es que la media aritmética, la mediana y la moda de la distribución sean iguales y se ubican es este pico.
b. Además, que la probabilidad tiende a ser simétrica.
c. Y que la distribución normal en sus colas es asintótica ya que estas se extienden indefinidamente en las dos direcciones sin cruzar el eje.
d. La distribución normal depende de la media μ y desviación estándar σ.
    a. Media: es la representación de un valor que se ubica dentro de la tendencia central entre un rango de datos.
    b. Desviación estándar: es variación esperada con respecto a una media, con el objetivo de contar una perspectiva clara y coherente a la realidad al momento de interpretarlos para así tomar decisiones.
e. La función de densidad de probabilidad está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{para } -\infty < x < +\infty \tag{12}$$

f. Y la función densidad de distribución normal entre dos puntos es:

$$P(a,b) = \int_a^b f(x)dx \tag{13}$$

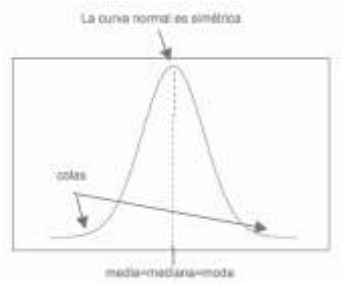


Figura 5 Distribución normal: curva característica.
Fuente: Elaboración propia.

2.12. Placas de circuito impreso

En la actualidad con el avance de la tecnología, la elaboración de placas de circuitos impresos se hace muy sencillo debido a las diversas técnicas existentes para la industria como son: serigráfica y fotográfica, mediante estos métodos es posible elaborar una PCB de manera adecuada.

La técnica serigráfica da muy buenos resultados a muy bajo costo, esto permite la producción de circuitos impresos en serie con trabajos de calidad y presentaciones necesarias para prototipos de placas electrónicas y/o industriales.

La técnica fotográfica esta entre los mejores procesos para la elaboración de placas, pero los inconvenientes vienen de la mano debido a la difícil obtención del film fotosensible y su alto precio en el mercado. Este film fotosensible es un material polímero para grabado de circuitos impresos capaz de reproducir fielmente el diseño de pistas y pads de un circuito.

2.13. Herramientas de diseño PCB

Actualmente el procedimiento de diseño se hace mediante herramientas CAD que son adecuadas para este propósito en general. Existiendo muchas herramientas para realizar

el diseño de PCB que están abiertas y comerciales de uso gratuito, entre las herramientas actuales tenemos en la Tabla 3:

Tabla 3 Herramientas de diseño PCB.
Fuente: Elaboración propia.

Herramienta	Descripción
ALTIUM	Sistema completo de edición de circuitos impresos basado en reglas, con un alto coste y el más comercial usado en entornos profesionales en la actualidad.
EAGLE	Famoso alrededor del mundo debido a su facilidad de diseños de PCB y diagramas con auto enrutador y fácil adquisición de acuerdo con sus versiones y gran cantidad de bibliotecas.
KICAD	Entorno de software libre para el diseño de circuitos electrónicos muy flexible y adaptable permitiendo el diseño de circuitos modernos de forma sencilla e intuitiva.

2.14. Estándar IPC-2221

IPC-2221 (Generic Standard on Printed Board Design) permite determinar el ancho de una pista para una corriente deseada, según el espesor del cobre, la temperatura de operación, el material del sustrato y si se trata de pistas ocultas o de superficie con y sin máscara antisoldante.

2.15. Ensamblaje de placas impresas

Para evitar encontrar cortocircuitos, aperturas, piezas incorrectas, piezas invertidas, dispositivos defectuosos, ensamblaje incorrecto de ensamblajes de placas impresas y otros defectos de fabricación Se deben seguir las siguientes pautas durante el diseño del ensamblaje de la placa impresa para promover la capacidad de prueba en el circuito (IPC-2221 Printed Board Design, 1998).

El estándar general para el diseño de circuitos impresos, ANSI-IPC 2221, recomienda el cálculo del ancho de pista mediante la siguiente ecuación:

$$Ancho = \frac{\left(\frac{I}{k1} \cdot \Delta T^{k2}\right)^{\frac{1}{k3}}}{(L \cdot 1.378)} \tag{14}$$

En donde:

a. I: se corresponde con la corriente máxima, en amperios (A).
b. ΔT: se corresponde con el incremento de temperatura máximo (℃).
c. L: se corresponde con el grosor de la capa de cobre, en onzas por pie cuadrado, valor estándar de 35 micras se corresponde con una onza por pie cuadrado (oz/ft^2).
d. $k1$: se corresponde con la constante de 0.0150 para pistas internas y 0.0647 para pistas externas.
e. $k2$: se corresponde con la constante de 0.5453 para pistas internas y 0.4281 para pistas externas.
f. $k3$: se corresponde con la constante de 0.7349 para pistas internas y 0.6732 para pistas externas.

El diámetro de las tierras de orificios pasantes y las vías utilizadas como tierras de prueba dependen del tamaño del orificio. El diámetro de las tierras de prueba utilizadas específicamente para la prueba no debe ser menor de 0.9 mm (IPC-2221 Printed Board Design, 1998).

Las separaciones alrededor de los sitios de las sondas de prueba dependen de los procesos de ensamblaje. Los sitios de la sonda deben mantener una separación igual al 80% de la altura de un componente adyacente con un mínimo de 0.6 mm y un máximo de 5 mm Figura 6 (“IPC-2221 Printed Board Design,” 1998).

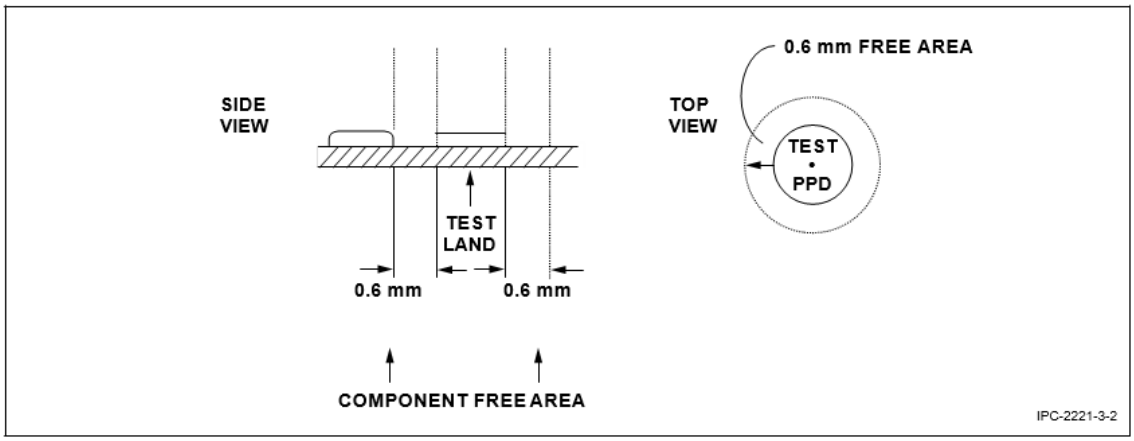


Figura 6 Área libre de los componentes vista lateral.
Fuente: (IPC-2221 Printed Board Design, 1998).

No se deben ubicar partes o terrenos de prueba a menos de 3 mm de los bordes de la placa. Los terrenos de prueba deben ubicarse a 5 mm de distancia de los componentes altos. Esto permite las tolerancias de perfil de los dispositivos de prueba durante la fabricación del accesorio de prueba como muestra la Figura 7 (IPC-2221 Printed Board Design, 1998).

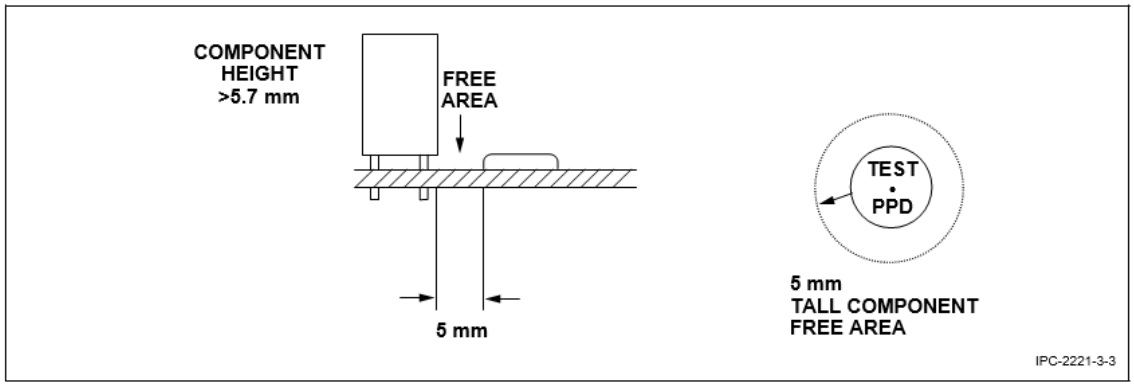


Figura 7 Área libre de tierra para piezas altas.
Fuente: (IPC-2221 Printed Board Design, 1998).

Todas las áreas de la sonda deben estar recubiertas con soldadura o cubiertas con un recubrimiento conductor no oxidante. Las tierras de prueba deben estar libres de soldadura resistente y marcas (IPC-2221 Printed Board Design, 1998).

La presión de contacto puede causar un circuito abierto o hacer que una junta de soldadura fría parezca buena. Probar las tierras o vías de prueba, como se muestran en la Figura 8 en las piezas de montaje superficial o cables sin plomo es prudente.

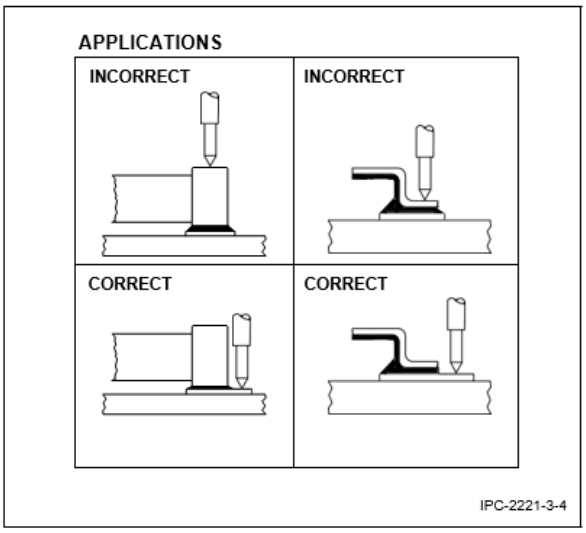


Figura 8 Prueba de sondeo para pines.
Fuente: (IPC-2221 Printed Board Design, 1998).

Los pines y las vías utilizados en las tierras de prueba se deben identificar con el nombre de la señal del nodo y la posición x-y en referencia al punto de referencia de la placa impresa. Utilice las partes de montaje de soldadura de las piezas y los conectores como puntos de prueba para reducir el número de tierras de prueba generadas (IPC-2221 Printed Board Design, 1998).

2.19. Consideraciones técnicas para un diseño.

Las siguientes consideraciones eléctricas deben seguirse durante el diseño del conjunto de la placa impresa para promover la capacidad de prueba en el circuito:

2.19.1. Mecánicas

Los conectores deben colocarse para facilitar el acoplamiento rápido y deben ser uniformes y consistentes (estandarizados) en sus relaciones con el tablero de un diseño a otro. Se deben teclear tipos similares de conectores o utilizar la geometría de la placa para asegurar el acoplamiento adecuado y evitar daños eléctricos en los circuitos (IPC-2221 Printed Board Design, 1998).

2.19.2. Eléctricas

Las pruebas de continuidad se realizan para garantizar que los conductores no se abran o que se conecten inadvertidamente (cortocircuitos). La resistencia de aislamiento y la

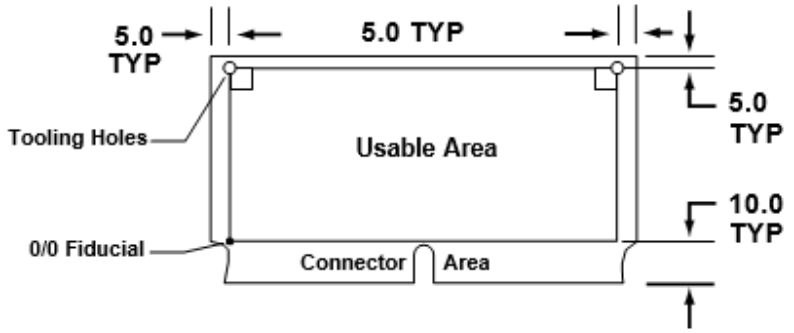
prueba de voltaje dieléctrico soportado se realizan para asegurar suficiente espacio entre conductores y espesor dieléctrico (IPC-2221 Printed Board Design, 1998).

La geometría total de la placa requerida para este montaje y terminación de los componentes se debe comparar con el área total de la placa utilizable para este fin. Los valores máximos razonables para esta relación son del 70% para el Nivel A, del 80% para el Nivel B y del 90% para el Nivel C. Los valores de densidad de los componentes superiores a estos serán motivo de preocupación. Cuantos menores sean estos valores, más fácil será diseñar una placa funcional rentable. La Tabla 4 proporciona el área utilizable para los tamaños de placa estandarizados (IPC-2221 Printed Board Design, 1998).

Tabla 4 Tamaños de placas estandarizados.
Fuente: (IPC-2221 Printed Board Design, 1998)

	Overall Dimensions		**Usable Dimensions**		**Usable Area**		
Board Size (Fig. 5-1)	**Height, mm**	**Width, mm**	**Height, mm**	**Width, mm**	**mm^2**	**Grid Elements 0.5 mm Grid**	**cm^2**
A1	80	60	65	50	3200	12800	32
B1	170		155		7700	30800	77
C1	260		245		12200	48800	122
D1	350		335		16700	66800	167
A2	80	120	65	110	7100	28400	71
B2	170		155		17000	68000	170
C2	260		245		26900	107600	269
D2	350		335		36800	147200	368
A3	80	180	65	170	11000	44000	110
B3	170		155		26300	105200	263
C3	260		245		41600	166400	416
D3	350		335		56900	227600	569
A4	80		65		14900	59600	149

B4	170	240	155	230	35600	142400	356
C4	260		245		56300	225200	563
D4	350		335		77000	308000	770



IPC-2221-3-5

2.19.3. Materiales

Un diseñador de tableros impresos tiene varias opciones de material a considerar, desde estándar hasta altamente sofisticado y especializado. Al especificar los materiales, el diseñador debe primero determinar qué requisitos debe cumplir la placa impresa. Estos requisitos incluyen temperatura (soldadura y funcionamiento), propiedades eléctricas, interconexiones (componentes soldados, conectores), resistencia estructural y densidad de circuito (IPC-2221 Printed Board Design, 1998).

2.20. Propiedades eléctricas de los materiales

Algunas de las propiedades críticas a considerar son la resistencia eléctrica, la constante dieléctrica, la resistencia a la humedad y la estabilidad hidrolítica. La Tabla 5 enumera las propiedades de algunos de los sistemas más comunes (IPC-2221 Printed Board Design, 1998).

Tabla 5 Propiedades típicas de los materiales dieléctricos comunes
Fuente: (IPC-2221 Printed Board Design, 1998)

Property	**Material**					
	FR-4 (Epoxy E-glass)	**ltifunctional Epoxy**	**High Performance Epoxy**	**Bismalaimide Triazine/ Epoxy**	**Polyimide**	**Cyanate Ester**
Dielectric Constant (neat resin)	3.9	3.5	3.4	2.9	3.5 - 3.7	2.8

Dielectric Constant (reinforcement/ resin)[1]	—	—	—	—	—	—
Electric Strength[2] (V/mm)	39.4×10^3	51.2×10^3	70.9×10^3	47.2×10^3	70.9×10^3	65×10^3
Volume Resistivity (D-cm)	4.0×10^6	3.8×10^6	4.9×10^6	4×10^6	2.1×10^6	1.0×10^6
Water Absorption (wt%)	1.3	0.1	0.3	1.3	0.5	0.8
Dissipation Factor (DX)	0.022	0.019	0.012	0.015	0.01	0.004

3. CAPÍTULO 3: Metodología

3.1. Diseño de la placa de control

3.1.1. Información general

En este capítulo se desarrollará una visión general de la placa de control, el esquema, los componentes a utilizarse y la normativa correspondiente para el diseño y fabricación. Se proporcionará procedimientos, recomendaciones y medidas de seguridad para el óptimo funcionamiento de la placa de control. Así como la explicación del circuito de accionamiento y el sistema capaz de encender la bobina para producir arcos y experimentación, a través del espinterómetro.

3.1.2. Requerimientos generales de los espinterómetros

La norma ANSI/IEEE Standard 4-2013 define el espinterómetro como un dispositivo constituido por dos electrodos metálicos, esféricos y de igual diámetro, donde la distancia que los separa estará designada por S y será regulada a voluntad.

Al aplicar entre dichas esferas un potencial, la descarga a cierta distancia de ruptura ocurre a un valor de tensión predeterminado. En la prueba de impulso, este valor es el voltaje pico de la onda o nivel básico de aislamiento (BIL) del equipo a ensayar.

El espacio esférico estándar consiste en dos esferas metálicas del mismo diámetro D, el valor estándar de la esfera será de 10 cm, que estará sostenido por su bastidor de soporte, engranaje operativo, vástagos y cables para la conexión al punto donde se va a aplicar el voltaje. La esfera, en su interior, acogerá la placa de control que permitirá generar los impulsos eléctricos necesarios para los diversos esquemas experimentales de accionamiento (IEEE STANDARD, 2013).

El objetivo de este sistema es controlar de forma sencilla la generación del pulso y la activación al electrodo de encendido a través de las esferas espinterométricas. El hecho es que con los modernos sistemas de fabricación y control es imposible acceder a estos parámetros; ya que solo el fabricante de la Unidad de Control Electrónico tiene acceso a ellos.

Los requerimientos que se exigen al sistema electrónico son:

a. Una solución fiable desde el punto de vista constructivo.
b. Nivel de precisión acorde con las exigencias del sistema.
c. Un sistema versátil y adaptable a la esfera espinterométrica.

3.1.3. Funcionamiento de la placa de control

El funcionamiento de la placa de control, consiste en generar un tren de impulsos que encenderá y apagará un interruptor, el cual alimentará a un transformador elevando la tensión en el esquema de alta tensión del laboratorio. Un breve impulso de tensión al electrodo central del espinterómetro de ignición permite romper la resistencia del aire generando la descarga parcial del circuito.

El diseño electrónico de la placa de control, que generará el tren de pulsos para las descargas de impulso tipo rayo está dividido en 5 subsistemas.

d. Fuente de alimentación
e. Circuito de protección
f. Generación de pulsos
g. Interruptor
h. Bobina de encendido

3.2.Etapas de la placa de control

La siguiente Figura 9 indica los bloques básicos del sistema para generar el arco eléctrico utilizando una bobina de encendido (Multiplicador de Tensión).

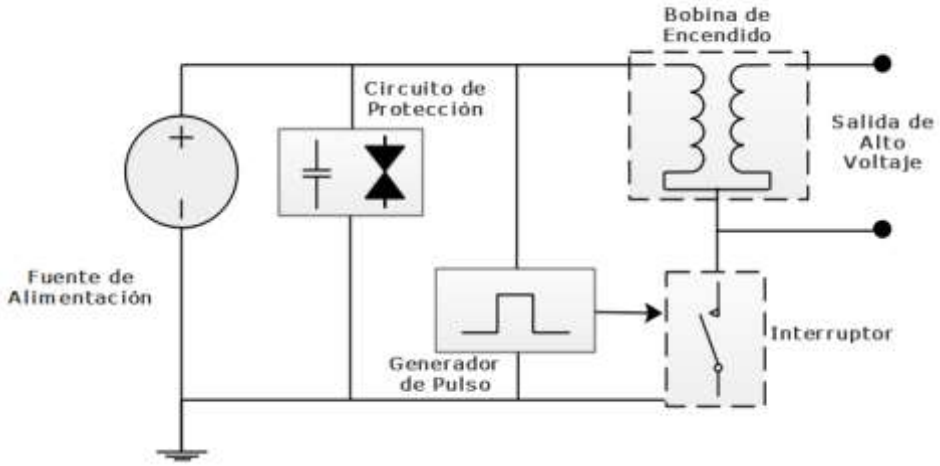


Figura 9 Diagrama de bloques del circuito de accionamiento.
Fuente: Elaboración propia.

El circuito de accionamiento general consiste en un generador de impulsos que enciende y apaga un interruptor de semiconductor (un transistor FET o IGBT) a la velocidad deseada y limitada por las características del semiconductor activando de esta manera a la bobina de encendido.

La fuente de alimentación es una batería de un voltaje apropiado capaz de suministrar suficiente corriente. La función que cumple cada subsistema se describe a continuación:

3.2.1. Fuente de alimentación

Una batería de $3.8V$ $3200mAh$ proveerá la tensión adecuada para cada una de las etapas del sistema, este tipo de batería es recargable ya que cuenta con su propio régimen de carga integrado en su diseño.

3.2.2. Circuito de protección

Es útil proporcionar protección al circuito del generador de pulsos para evitar daños, sean estos por "picos" de sobretensiones transitorios. El MOV1 en la entrada de la fuente de alimentación dará protección a los picos de tensión.

Los MOV son módulos de protección diseñados para desconectarse cuando el voltaje a través de ellos se sitúa por debajo de su voltaje de sujeción. Por tanto, el MOV retiene el voltaje a través del bus de la fuente de alimentación a un nivel seguro de modo que la tensión no suba los suficiente como para dañar el circuito generador de pulsos.

3.2.3. Generador de pulsos

El generador de pulsos se basa en un circuito de temporizador 555 que permite controlar los impulsos, pero generalmente no permite controlar el tiempo y la frecuencia de manera independiente. El circuito utiliza diodos para crear rutas de carga y descarga separadas. El tiempo de encendido estará determinado por el tiempo que tarda C1 en cargar a través de R1 y el potenciómetro R2.

Al separar las rutas de carga y descarga, los tiempos de encendido y apagado se pueden controlar de manera independiente, lo que permite controlar el tiempo de encendido, de modo que no sea tan largo como para desperdiciar energía.

3.2.4. Interruptor

El interruptor utilizado para controlar la corriente en el primario es un TIP122. Este transistor de potencia tiene la característica de manejar una pequeña tensión de impulso para su activación permitiendo un sistema de encendido eficaz.

Cuando el interruptor en un sistema de encendido se abre para interrumpir la corriente en el primario, el voltaje a través de él se eleva a cientos de voltios. Este transistor de potencia tiene el funcionamiento especial de manejar altas tensiones e intensidades y las altas potencias a soportar y disipar, también incluye un diodo de sujeción interno para protegerlo de alguna sobretensión.

3.2.5. Bobina de encendido

La etapa final del circuito, para generar el arco es a través de la bobina de encendido, la cual producirá una salida de alto voltaje en el secundario, cuando la corriente que fluye en el devanado primario se interrumpe.

Para generar un alto voltaje en la bobina de encendido, es necesario almacenar energía en la inductancia del devanado primario y descargarla a través de la tensión de impulso.

3.2.5.1. Multiplicador de tensión

Un multiplicador de tensión no es más que un arreglo de capacitores y diodos rectificadores que se utiliza con frecuencia para generar altos voltajes y corrientes constantes. Este tipo de circuito utiliza el principio de la carga en paralelo de capacitores, a partir de la entrada de corriente alterna y añadiendo voltaje a través de ellos en serie se obtiene voltajes de corriente continua más altos que el voltaje de la fuente.

3.2.5.2. Esquema del multiplicador de tensión

Por tanto, sabiendo que la carga necesita una tensión muy alta y que absorbe una corriente pequeña se elevara la tensión de la red, para eso el multiplicador utiliza un transformador elevador y seguido de esto todos los diodos y condensadores que se necesite para alcanzar el voltaje deseado a su salida. En la Figura 10 se muestra el esquema general del multiplicador.

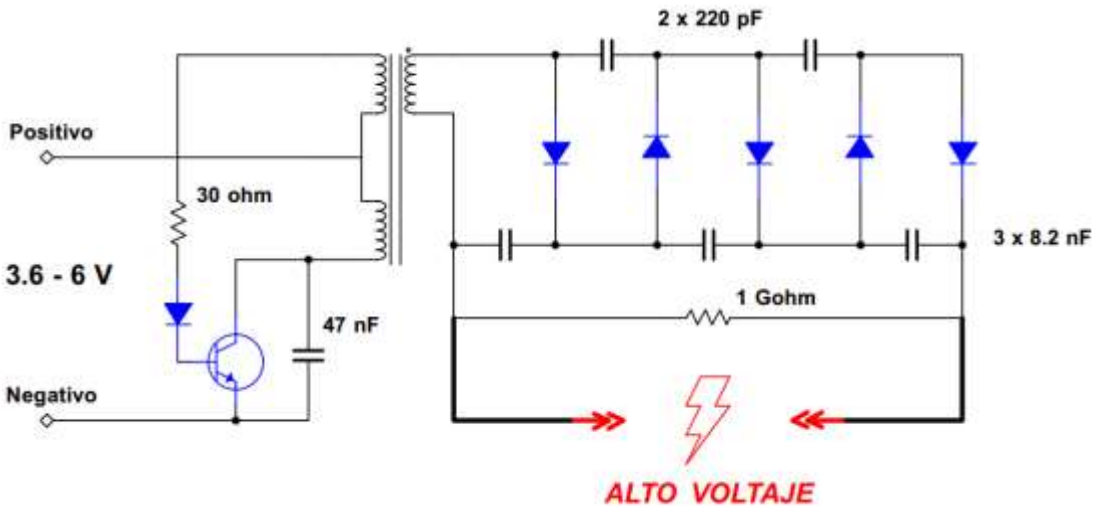


Figura 10 Esquema del multiplicador de tensión DC 3-6V a 400kV.
Fuente: Elaboración propia.

3.2.6. Salida de alto voltaje

La última etapa del sistema es conectar los terminales de alto voltaje a la bujía de encendido o electrodo central la cual generara el arco eléctrico a través del encapsulado de la esfera espinterométrica.

3.3.Esquema del circuito de control

En esencia el esquema de control adopta diferentes dispositivos electrónicos apropiados, que se complementan, para cumplir los requerimientos de funcionamiento, se optó por un diseño claramente sencillo que cumpla el requerimiento necesario, el diseño es presentado en la Figura 11.

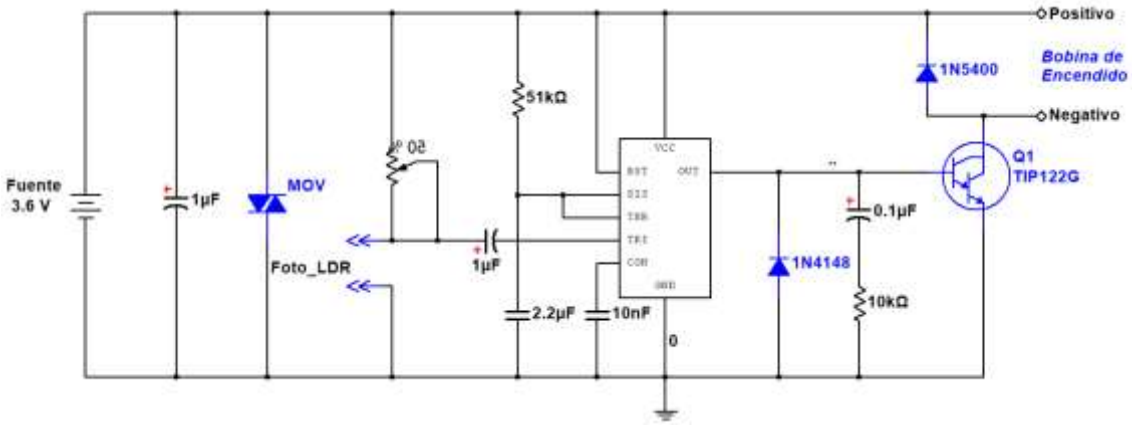


Figura 11 Esquema de la placa de control.
Fuente: Elaboración propia.

El circuito basa su funcionamiento en un IC 555 un chip de circuito integrado que puede operar tanto en configuración astable como monoestable, ello garantiza la exactitud de la secuencia de oscilación.

Por tanto, el integrado 555 puede ser activado por medio del paso de luz sobre el sensor fotoeléctrico lo cual es llevado al nivel bajo por un momento, lo que provoca la activación monoestable. Entonces la salida del 555 va luego a un nivel alto por un intervalo de tiempo que depende de R y C.

Cuando la luz aumenta por un momento, el transistor conduce poniendo el nivel bajo en el 555, permitiendo la activación de la bobina de encendido generando el arco eléctrico.

3.3.1. Circuito monoestable

Este circuito se denomina monoestable porque logra cambiar su estado (nivel lógico 0 ó 1 durante un cierto tiempo que es fijado ya sea externamente por una red R-C o por algún tipo de circuito contador que luego de un número determinado de ciclos de reloj, cambie nuevamente el estado lógico de su salida.

En general el tiempo del estado lógico para activar el interruptor o transistor depende de R y C que viene dada por la siguiente formula:

$$t = 1.1 \times R1 \times C1 \tag{15}$$

$$t = 1.1 \ \times 51k\Omega \ \times 2.2uF \tag{16}$$

$$t = 0.52 \tag{17}$$

De esta manera se mantiene un tiempo de estado lógico aceptable para generar el arco eléctrico en la bobina de encendido.

3.4.Diseño electrónico de la placa de control

Las dimensiones de la tarjeta de control del equipo vienen dadas por la naturaleza de la esfera que contendrá la placa y por los dispositivos electrónicos que se desean disponer.

En la Figura 12 y Figura 13 se detallan los requerimientos de la placa de control y las medidas que la placa tendrá para adaptarse al espacio esférico existente.

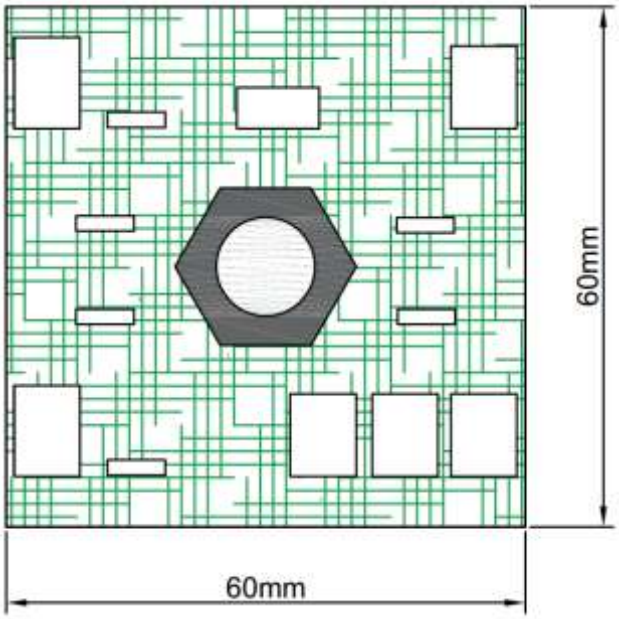


Figura 12 Detalle de las dimensiones de la placa electrónica.

Fuente: Elaboración propia.

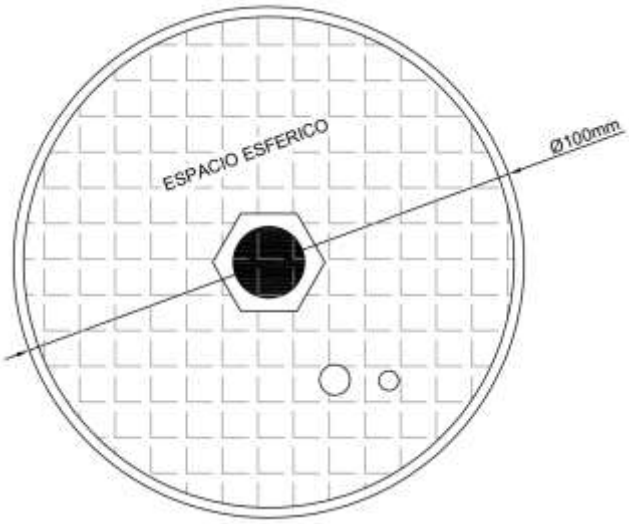


Figura 13 Detalle de las dimensiones del espacio esférico.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1. Esquema de diseño del circuito electrónico

El chip de circuito integrado IC 555 y el interruptor TIP 122 permitirán la correcta activación de la tarjeta electrónica, la cual tiene un sistema de alimentación de batería recargable de $3.6V$, $3200mA$, pero podrá contar con la alternativa de usar baterías de $9V$ directamente a su entrada en los terminales X3-1, X3-2.

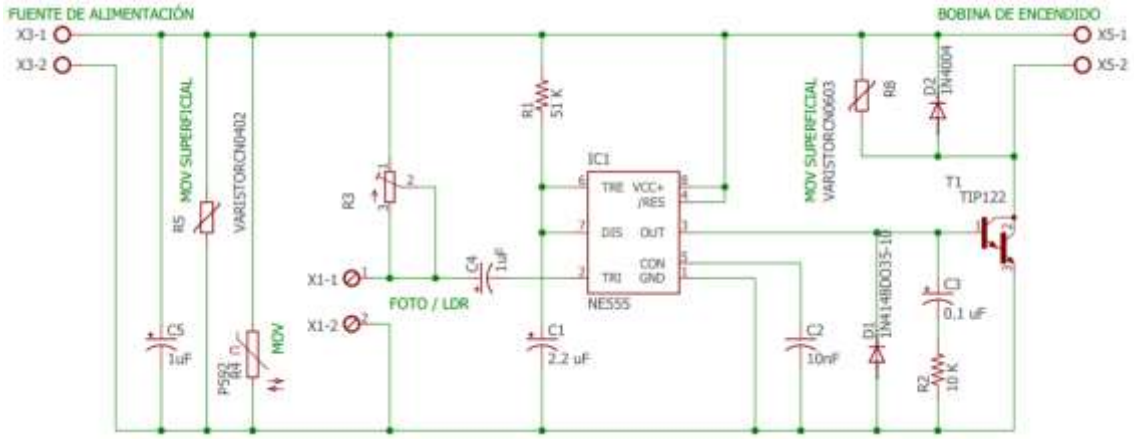


Figura 14 Diseño del circuito electrónico implementado.
Fuente: Elaboración propia.

Las salidas X5-1 y X5-2 permitirán conectar el multiplicador de tensión o la bobina de encendido a activar, es muy importante tener en cuenta la polaridad del multiplicador de tensión para que se conecte a la placa de control ya que de esta manera se da el correcto funcionamiento la descripción de cada elemento se muestra en la **¡Error! No se ncuentra el origen de la referencia.**.

3.4.2. Diseño PCB de la tarjeta de circuito electrónico

El desarrollo de la electrónica de control consiste en una placa de circuito impreso o PCB diseñada mediante el software EAGLE 2017 de AUTODESK. La herramienta permite el diseño de circuitos electrónicos a nivel esquemático y posterior a este los diagramas PCB´s. La mencionada placa de control es la encargada del gobierno y activación de la señal de pulso en el esquema de Alta Tensión. El diseño PCB de la placa electrónica con todos sus requerimientos. Pistas y componentes por utilizarse se muestran en la Figura 15.

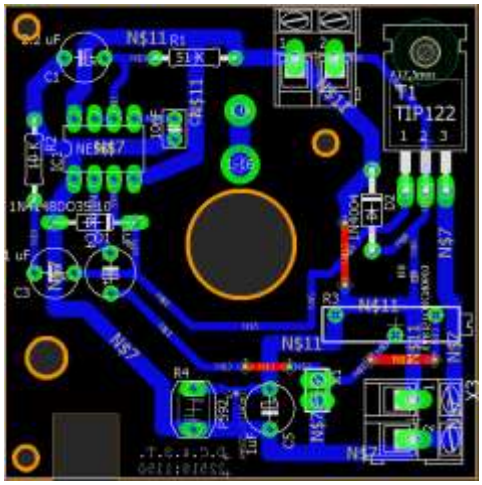


Figura 15 Diseño PCB de la tarjeta electrónica.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 16 y Figura 17, se visualiza la parte delantera (A) y la parte posterior (B) que fueron diseñadas en el software EAGLE de Autodesk.

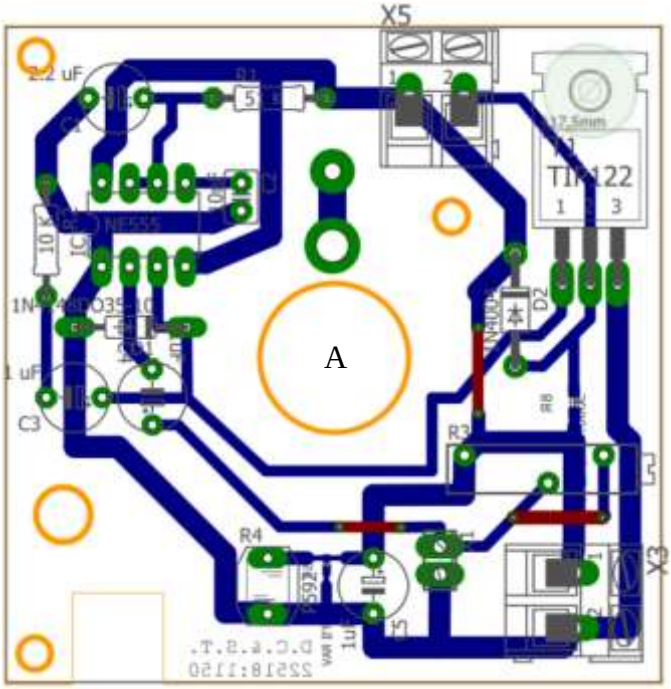


Figura 16 Diseño frontal de la placa electrónica A.
Fuente: Elaboración propia.

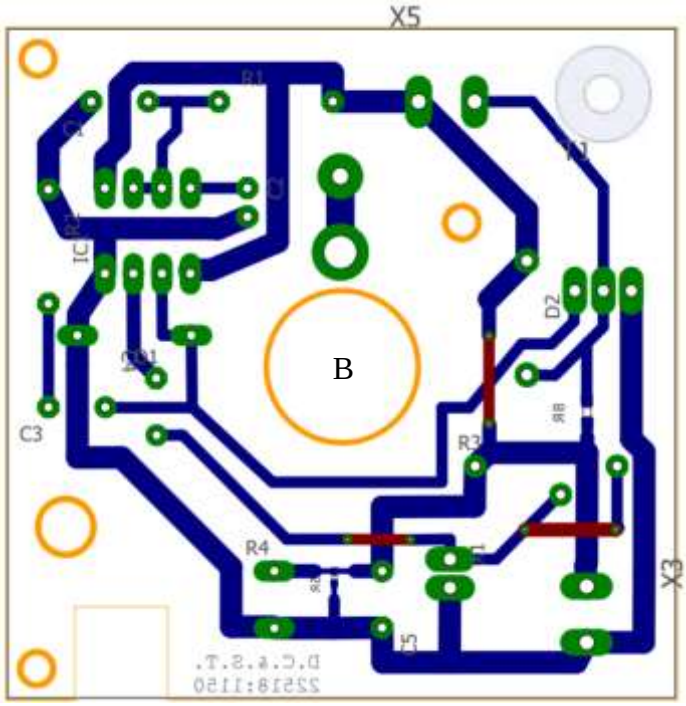


Figura 17 Diseño posterior de la placa electrónica B.
Fuente: Elaboración propia.

3.4.3. Elementos de la PCB

Es preciso conocer cada uno de los elementos de la placa electrónica, el listado es presentado en la Tabla 6.

Tabla 6 Descripción de conectores de la PCB de control.
Fuente: Elaboración propia.

Designación	Descripción
X3	Fuente de Alimentación del Circuito / X3-1(+), X3-2(-).
C5	Capacitor de Protección.
R5	Varistor de Sobretensión / Protección CN0402.
R4	Varistor de Protección P594.
X1	Sensor Fotoeléctrico.
R3	Potenciómetro / RTRIM43P.
C4	Capacitor de Conexión.
R1	Resistencia de estado lógico.
C1	Capacitor de estado lógico.
IC1	Chip de circuito integrado NE555.
C2	Capacitor de Conexión.
D1	Diodo de Conexión.

C3	Capacitor de Protección.
R2	Resistencia de Protección.
R8	Varistor de Protección CN0603.
D2	Diodo de Protección 1N4004.
T1	Transistor de Potencia Darlington NPN TIP122.
X5	Salida / Bobina de Encendido / X5-1(+), X5-2(-).

En la Tabla 7, se especifican los dispositivos de conexión implementados en la placa de control.

Tabla 7 Dispositivos conectores de la placa de control PCB.
Fuente: Elaboración propia.

Descripción	**Conector**
X3	Terminal Block Free Plug Macho – 2 Pines
X1	Header Macho – 2 Pines
IC1	Zócalo para circuito integrado 2 x 4
X5	Terminal Block Free Plug Macho – 2 Pines

3.5.Diseño funcional

Por medio del diseño funcional se explica cada una de las partes y piezas que compondrán la esfera espinterométrica y la interacción que existe entre ellas.

3.5.1. Descripción y diseño funcional de la placa electrónica

La placa de circuito electrónico fue diseñada con el propósito de adaptarse al poco espacio existente dentro las esferas espinterométricas y acomodarse de manera tan sutil, tanto para la placa que sostendrá los dispositivos, así como la bujía de accionamiento, permitiendo que no existan fugas de sobretensión o tensiones estáticas dentro del compartimiento esférico. El diseño funcional de cada parte que contendrá la esfera y la interacción de la placa de control y la placa de dispositivos se visualizan en la Figura 18 y Figura 19.

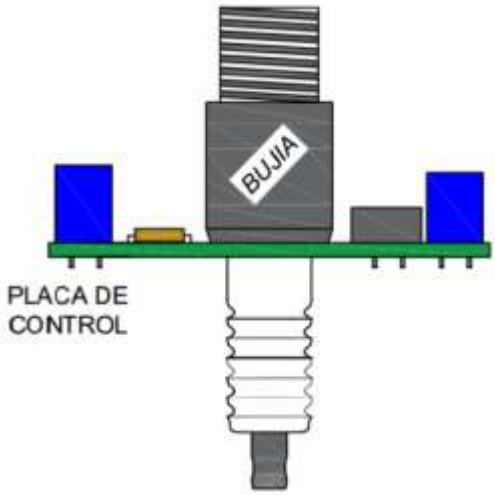


Figura 18 Diseño funcional de la placa de control.
Fuente: Elaboración propia.

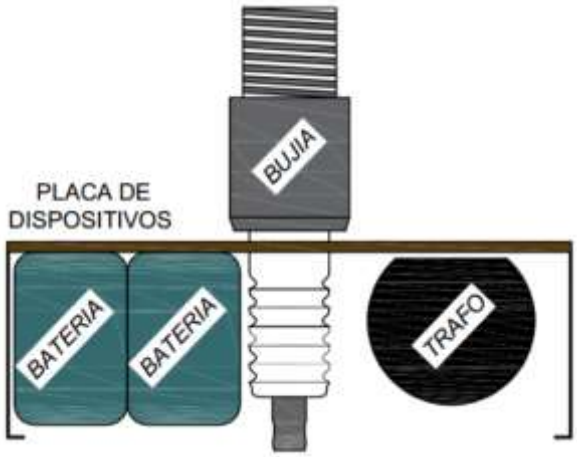


Figura 19 Diseño funcional de la placa de dispositivos.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 20 y Figura 21, se visualiza la parte superior (A) e inferior (B) de la placa de control electrónica que se diseñó para la esfera espinterométrica con las adecuaciones y sujeciones pertinentes.

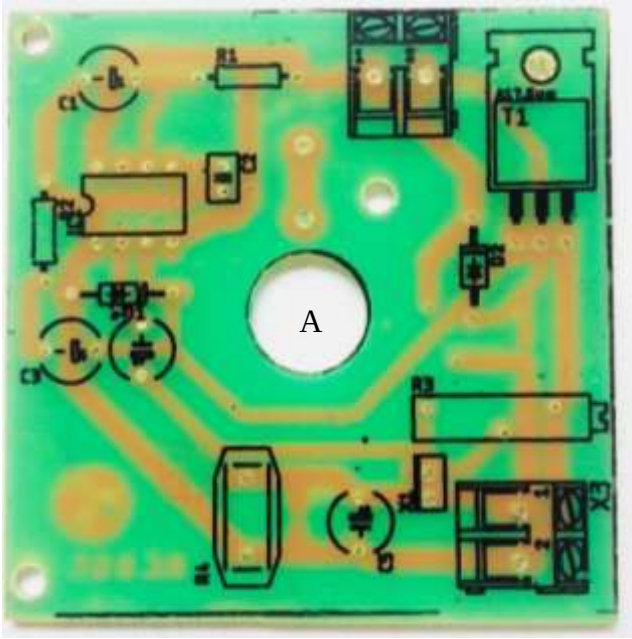


Figura 20 Parte frontal de la placa electrónica diseñada A.
Fuente: Elaboración propia.

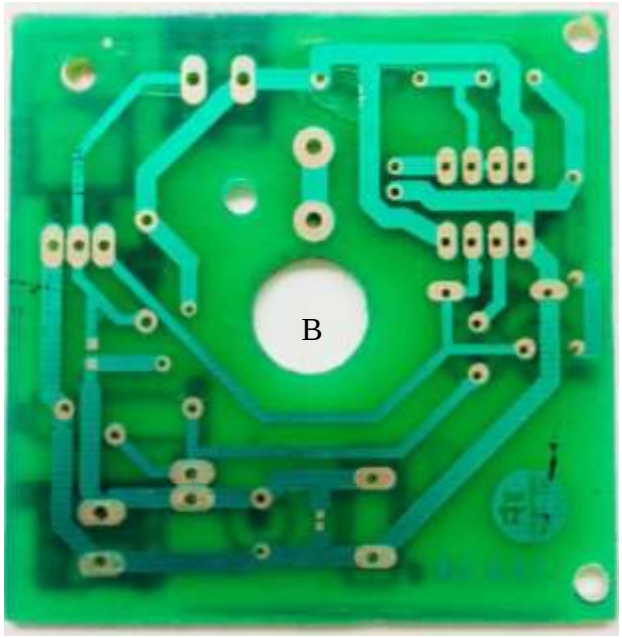


Figura 21 Parte posterior de la placa electrónica diseñada B.
Fuente: Elaboración propia.

La placa de control y la placa de dispositivos implementadas en la esfera espinterométrica se muestra en la Figura 22 y Figura 23.

Figura 22 Placa de control implementada en la esfera espinterométrica.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 23 Placas de dispositivos implementada en la esfera espinterométrica.
Fuente: Elaboración propia.

Se indica en la Figura 24, la esfera espinterométrica completamente armada con sus componentes principales de accionamiento la bujía y su cable de fibra óptica.

Figura 24 Esfera espinterométrica armada con sus componentes principales.
Fuente: Elaboración propia.

3.6. Comportamiento de señales de la placa electrónica

La placa electrónica tiene diferentes tipos de señales que varían en un nivel de tensión apropiado por etapas para el funcionamiento, estas señales se muestran desde la Figura 25 a la Figura 29, se describe cada una de las señales obtenidas.

El nivel de tensión en los bornes de ingreso (X3-1,2) de la placa electrónica se muestra en la Figura 25. Este valor eficaz de $3.83V$, proceden de la batería que alimenta a la placa de control electrónica.

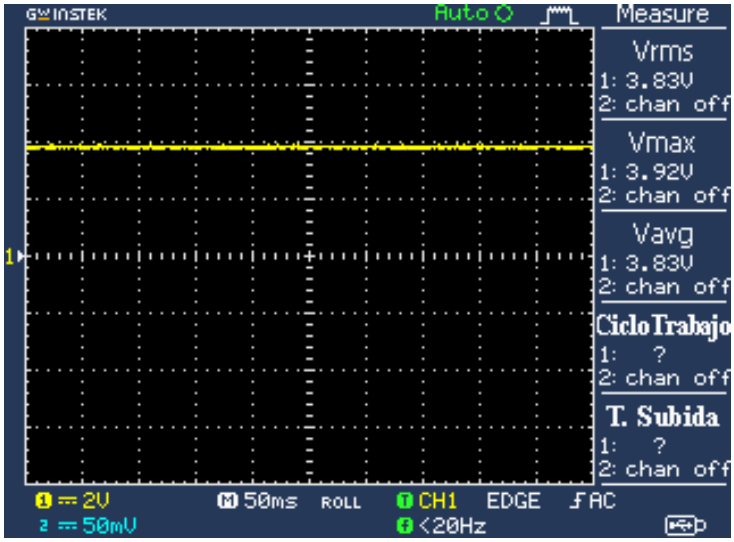


Figura 25 Señal de ingreso en los bornes X3 - 1,2 de la placa electrónica.
Fuente: Elaboración propia.

El resultado de la operación del temporizador se da en la salida del chip de circuito integrado pin 3, cuando en su ingreso recibe una señal constante de luz él foto transistor obteniendo en su salida un voltaje eficaz de $1.68V$, se muestra en la Figura 26. Misma señal que activa el interruptor de potencia para la activación del multiplicador de tensión.

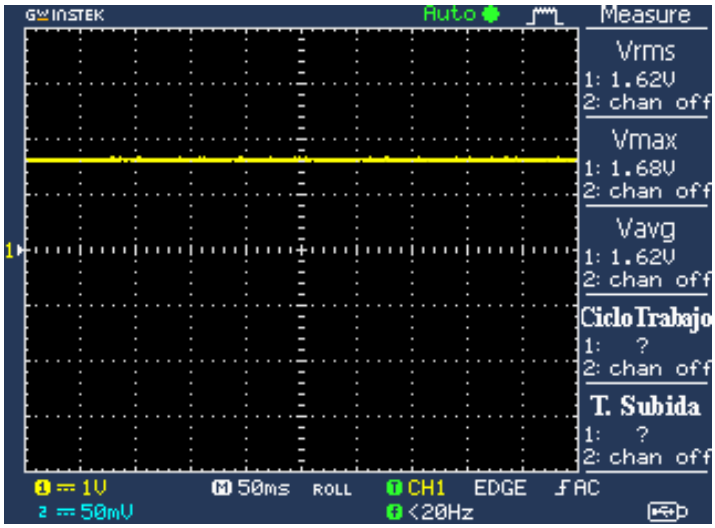


Figura 26 Señal de salida constante del chip de circuito integrado.
Fuente: Elaboración propia.

La señal que se muestra en la Figura 27. Es la operación del temporizador cuando en su ingreso recibe múltiples señales de luz el fototransistor.

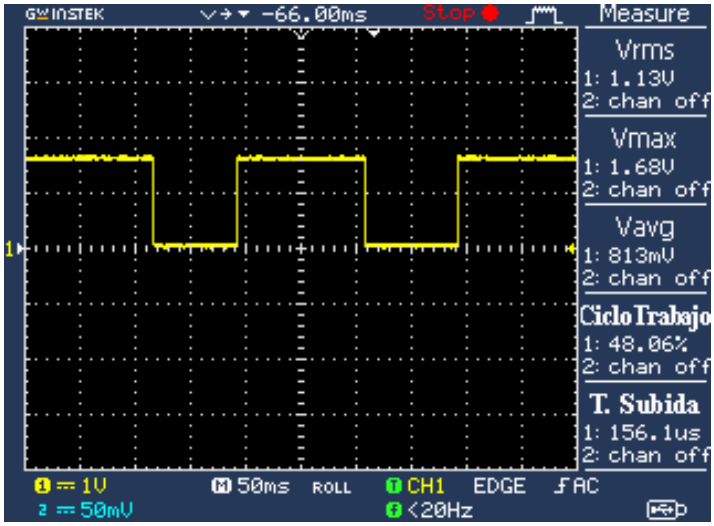


Figura 27 Señal de salida múltiple del chip de circuito integrado.
Fuente: Elaboración propia.

En la salida de la placa electrónica bornes (X5-1,2), se tiene la señal que activará el multiplicador de tensión, esta se muestra en la Figura 28. El voltaje eficaz de 3.02V que se visualiza, indica que el multiplicador estará encendido constantemente debido a la señal constante que está recibiendo.

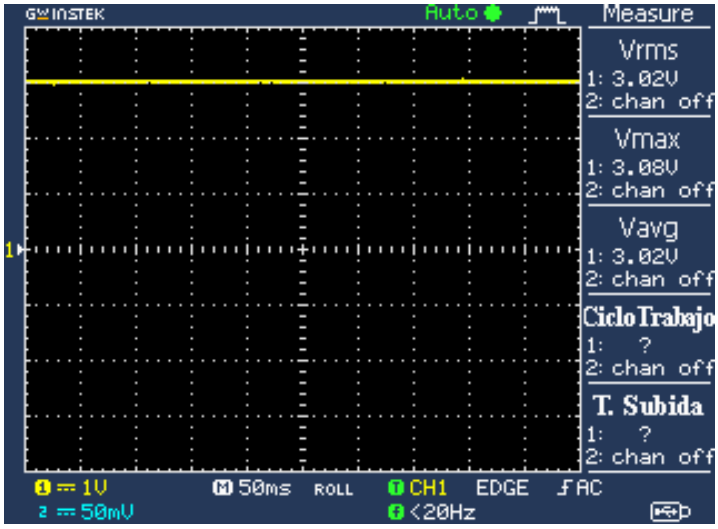


Figura 28 Señal de salida constante de la placa electrónica.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 29 se muestra las múltiples señales de impulso recibidas del fototransistor, estas señales permiten identificar y verificar el funcionamiento adecuado para la activación del multiplicador de tensión.

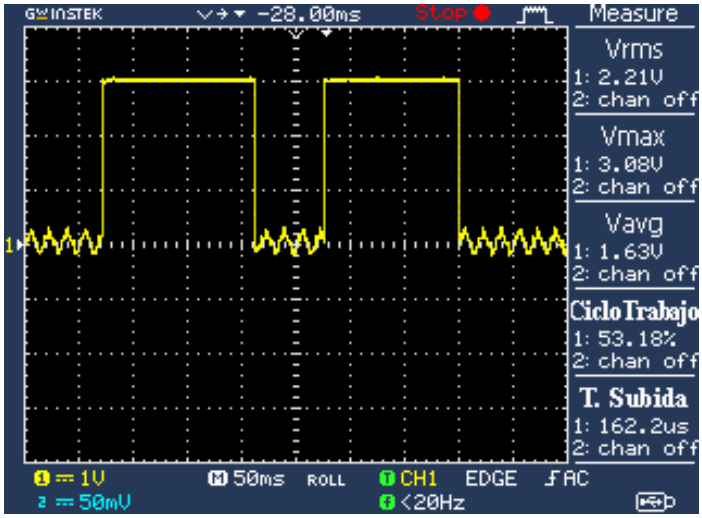


Figura 29 Múltiple señal de salida del chip de circuito integrado.
Fuente: Elaboración propia.

La necesidad de múltiples señales de activación, permiten que se pueda generar arcos eléctricos a niveles de tensión elevados de esta manera el multiplicador de tensión generar la carga y descarga de su voltaje almacenado, formando el arco eléctrico necesario.

3.7.Medidas de seguridad

Al manipular la esfera se deberá seguir las siguientes medidas para el mantenimiento:

1. Retire el cable de fibra óptica cuidadosamente.
2. Cubra la entrada de luz del fototransistor para que este desactive la señal de impulso.
3. Abra el módulo de la esfera cuidadosamente.
4. Seguido de esto elimine la energía del sistema antes de realizar ajustes.
    a. Con estas medidas de prevención es posible reemplazar cualquier elemento averiado y facilitar su manejo. Tenga en cuenta que los potenciales generados pueden hacer que salten brechas significativas, por tanto, realizadas las adecuaciones pertinentes conecte la alimentación del sistema y cierre el encapsulado con los siguientes ajustes:
5. Deje libre la entrada de luz del fototransistor para que este active la señal de impulso.
6. Coloque el cable de fibra óptica cuidadosamente.
7. Aplique la señal de luz generada mediante el TRIGGER del banco de Alta Tensión.

8. Verifique que se genere el arco, no lo toque.
    a. Una vez verificado el correcto funcionamiento, coloque la esfera en el pedestal de pruebas de Alta Tensión y realice las pruebas necesarias. Tenga en cuenta que las descargas de alta tensión generan gas de ozono que puede causar irritación si se inhala.

4. CAPÍTULO 4: Análisis de resultados

4.1. Introducción

En este capítulo se dará a conocer los ensayos disruptivos realizados en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana, con el objetivo de la determinación del BIL para elementos de media tensión utilizados en la ciudad de Cuenca. Es de considerar las distancias en la atmosfera y las superficies en contacto con el aire circundante de los aislamientos sólidos del equipo, que están sujetos a esfuerzos dieléctricos y a los afectos atmosféricos y otras condiciones externas tales como hongos, humedad, contaminación, etc.

Para la determinación del BIL se utilizará un circuito de alta tensión, en donde entrará como parte del mismo las esferas espinterometricas.

Se seleccionó de entre los diferentes elementos de media tensión, cinco equipos a los que se les somete a los diferentes ensayos. Los mismos son presentados en la Tabla 8.

Tabla 8 Selección de elementos de media tensión.
Fuente: Elaboración propia.

Número de elemento	**Descripción**	**BIL de catálogo**
1	Descargador o pararrayos tipo polimérico de óxido de Zn, clase 3 tipo hevy duty, con módulo de desconexión, 18 kV / 10 kA	Positivo 150 kV
2	Aislador tipo espiga (pin), de porcelana, clase ANSI 56-1, 25 kV.	Positivo 150 kV Negativo 109 kV
3	Aislador de suspensión, de porcelana, clase ANSI 52, 15 kV	Positivo y Negatico 100 kV
4	Aislador tipo suspensión, de caucho siliconado, clase ANSI DS-15, 15 kV	Positivo 140 kV Negativo 160 kV
5	Cable de alta tensión TYPE MV-90 2 AWG COMPACT CU XLPE, 15kV	Positivo 30 kV

4.2. Elemento 1: Descargador o pararrayos tipo polimérico de óxido de Zn, clase 3 tipo hevy duty, con módulo de desconexión, 18 kV / 10 kA.

Figura 30 Elemento 1.
Fuente: Elaboración propia.

4.2.1. Medición de tensión de impulso tipo rayo

Para la realización de las mediciones de tensión de impulso tipo rayo se requiere utilizar del laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana.

4.2.1.1. Equipo

Se debe conocer el equipo de ensayo para realizar este tipo de mediciones, en la Tabla 9 se lista los componentes a utilizar para la realización de la prueba de tensión de impulso tipo rayo. (Terco Ab, 2011).

Tabla 9 Equipo a usar para la realización de la prueba.
Fuente: (Terco Ab, 2011).

Descripción de componentes	Elemento Terco	Cantidad
Transformador de prueba de HV	HV9105	1
Panel de control	HV9103	1
Condensadores de alisado	HV9112	1

Condensador de carga	HV9120	1
Rectificador semiconductor	HV9111	2
Resistencia de medición	HV9113	1
Resistencia de carga	HV9121	1
Resistencia de frente de onda	HV9122	1
Resistencia de cola de onda	HV9123	1
Esfera diferencial	HV9125	1
Unidad para esfera diferencial	HV9126	1
Varilla aislada	HV9124	2
Varilla de conexión	HV9108	2
Copa de conexión	HV9109	7
Pedestal de piso	HV9110	6
Barra espaciadora	HV9119	4
Electrodo	HV9138	1
Interruptor de puesta a tierra	HV9114	1
Varilla de puesta a tierra	HV9107	1
Voltímetro de cd	HV9151	1
Voltímetro pico de impulso	HV9152	1
Divisor de baja tensión	HV9130	1
Medidor de chispa	HV9133	1
Barra espaciadora (para HV9133)	HV9118	1
Osciloscopio digital de 100 MHz, 500 M muestras/seg.	-	1

4.2.1.2. Configuración de prueba

En la Figura 31 se muestra la conexión a realizar para la prueba.

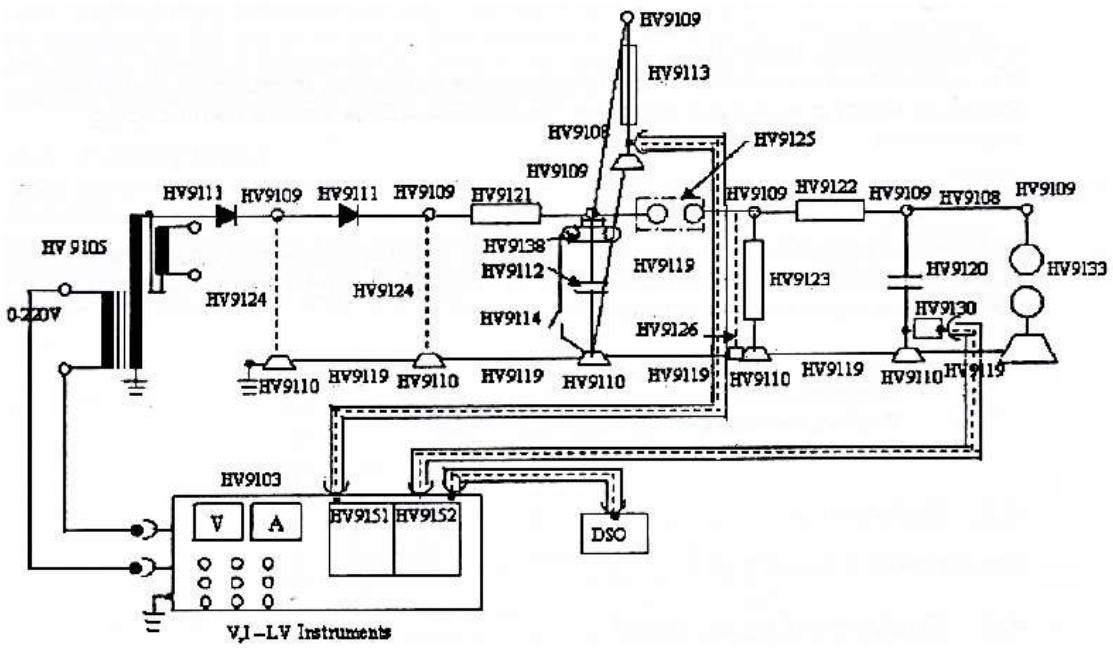


Figura 31 Montaje experimental para la generación de tensiones de impulso tipo rayo.

Fuente: (Terco Ab, 2011)

4.2.1.3. Proceso

A continuación, se describe el proceso a seguir:

1. Comprobar que el escritorio de control se encuentre en estado apagado.
2. Abrir la jaula desde el manubrio.
3. Retirar la pértiga de la puerta de acceso.
4. Colocar la pértiga en el trasformador de alta tensión (aterrar).
5. Identificar los elementos del circuito como se indica en la Tabla 9.
6. Armar el circuito indicado en la Figura 31.
7. Verificar que el circuito se haya armado correctamente.
8. Al salir colocar la pértiga en modo cruzado en la puerta acceso de la jaula.
9. Encender el escritorio de control.
10. Verificar que los módulos estén encendidos.
11. Verificar que los módulos estén en escalas, estados, clases de manera correcta para la visualización de la medición.
12. Variar la distancia de separación entre las esferas espinterométricas de forma remota desde el escritorio de control.
13. Encender el primario y seguidamente el secundario del transformador de alta tensión desde el escritorio de control.
14. Aumentar la tensión desde la mínima hasta la máxima que se requiera.

15. Presionar el trigger (disparador) del módulo para que se active la señal de la esfera espinterométrica y para así producir el impulso de tensión.
16. Tomar los datos de tensión que se visualiza en los distintos módulos, pero de manera especial en el módulo de voltímetro pico de impulso.
17. Guardar la gráfica del osciloscopio donde se muestra la curva del impulso tipo rayo generada.
18. Disminuir la tensión del transformador de alta tensión hasta llegar a la mínima.
19. Apagar el secundario y luego el primario del transformador de alta tensión.
20. Apagar de forma adecuada los distintos módulos y finalmente el escritorio de control.

Figura 32 Circuito armado para el elemento 1.
Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Parámetros iniciales

Los parámetros iniciales son valores que se consideran para la realización de la prueba, estos valores se usaran para realizar la respectiva corrección atmosférica en un lugar fijo, en este caso es el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca.

4.2.2.1. Condiciones atmosféricas estándar

Para la obtención de estas condiciones se redirige a la norma IEEE STD 4 las cuales son las siguientes:

a. La temperatura $t_0 = 20°C$
b. La presión $p_0 = 101.3\ kPa\ (1013\ mbar)$
c. La humedad absoluta $h_0 = 11\ {}^{g}/_{m^3}$

4.2.2.2. Condiciones atmosféricas de prueba

Para la obtención de las condiciones atmosféricas de prueba se utilizan un termómetro, barómetro, higrómetro.

a. La temperatura $\mathrm{t} = 22.2°C$
b. La presión $p = 753.4\ hPa\ \approx 75.34\ \ kPa$
c. La humedad relativa $h_r =\ 51\%$

4.2.2.3. Cálculo de humedad relativa a humedad absoluta

Entonces con la fórmula de humedad absoluta (masa/volumen) reemplazo los términos para encontrar el valor.

$$\frac{m}{V} = \frac{e}{R_v T} \tag{18}$$

$$\frac{m}{V} = \frac{\left(6.112 \cdot e^{\frac{17.62t}{243.12+t}}\right)(1.0016 + 3.15 \cdot 10^{-6} \cdot p - 0.074 \cdot p^{-1}) \cdot \frac{h_r}{100}}{R_v(273.15 + t)} \tag{19}$$

$$\frac{m}{V} = \frac{\left(6.112 \cdot e^{\frac{17.62\cdot(22.2)}{243.12+(22.2)}}\right)(1.0016 + 3.15 \cdot 10^{-6} \cdot (753.4) - 0.074 \cdot (753.4)^{-1}) \cdot \frac{51}{100}}{(461.5) \cdot (273.15 + 22.2)} \cdot 100000 \tag{20}$$

Finalmente, el valor de la humedad absoluta es $h_0 = 10.02788\ {}^{g}/_{m^3}$

4.2.2.4. Corrección atmosférica

Con los parámetros iniciales de condiciones atmosféricas y la humedad absoluta, se aplica la corrección atmosférica con el método 2 de la norma IEEE STD 4.

$$k_d = \left(\frac{p}{p_0}\right)^m \times \left(\frac{273 + t_0}{273 + t}\right)^n \tag{21}$$

$$k_d = \left(\frac{75{,}34}{101.3}\right)^1 \times \left(\frac{273 + 20}{273 + 22.2}\right)^1 \tag{22}$$

$$k_d = 0.738 \tag{23}$$

$$k_h = k^w \tag{24}$$

$$k_h = 1.01^1 \ (ver\ en\ la\ \text{Figura 3, Tabla 1¡ Error! No se encuentra el origen c} \tag{25}$$

$$k_h = 1.01 \tag{26}$$

$$\frac{k_d}{k_h} = \frac{0.738}{1.01} \tag{27}$$

$$\frac{k_d}{k_h} = 0.731 \tag{28}$$

Ahora aplicar el valor obtenido para establecer la tensión del impulso tipo rayo para el elemento 1.

a. Impulso tipo rayo (de catálogo): $150\ kV$
b. Impulso tipo rayo (corrección atmosférica): $150\ kV \cdot \frac{k_d}{k_h} = 150\ kV \cdot 0.731 = 110\ kV$

4.2.3. Determinación del tamaño de la muestra

Para la toma de mediciones del elemento de media tensión, se establecerá un número de muestra, como es universo infinito, por la razón que el número de pruebas es proporcional al tiempo de toma, esto lo hace muy elevado en tiempo ya que es 1 toma por 1 minuto. Entonces se consideró el error que debe ser menor del 10%.

$$\mathrm{n} = \frac{\mathrm{Z}^2 \cdot \mathrm{p} \cdot (1 - \mathrm{p})}{\mathrm{e}^2} = \frac{1.96^2 \cdot 0.5 \cdot (1 - 0.5)}{0.0826^2} = 140.76 \tag{29}$$

n es el tamaño de la muestra

$\mathrm{Z} = 1.96$

$\mathrm{p} = 50\%$

$\mathrm{p} - 1 = 50\%$

$\mathrm{e} = 8{,}26\%$

Se obtiene que el número de muestras a tomar es de 140 en total.

4.2.4. Muestras obtenidas

Se obtuvo un número total de 140 mediciones en la cuales se tomó 5 para cada estado de tensión. El tiempo según la norma IEEE STD 4 fue de un 1 minuto por cada una de las mediciones dando un total de 140 minutos por la prueba en impulso tipo rayo positivo para este elemento y también se consideró la falla del elemento si se daba una disrupción eléctrica durante la fase de prueba.

Tabla 10 Mediciones realizadas en el elemento 1.
Fuente: Elaboración propia.

# mediciones	# mediciones por estado	Tiempo (min)	HV9152 Stage I Positivo KV	Falla
1	1	1min	8,48	NO
2	2	1min	8,35	NO
3	3	1min	8,22	NO
4	4	1min	8,14	NO
5	5	1min	8,48	NO
6	1	1min	14,86	NO
7	2	1min	14,86	NO
8	3	1min	14,95	NO
9	4	1min	14,80	NO
10	5	1min	14,93	NO
11	1	1min	19,08	NO
12	2	1min	19,01	NO
13	3	1min	19,18	NO
14	4	1min	19,21	NO
15	5	1min	19,05	NO
16	1	1min	23,20	NO
17	2	1min	23,07	NO
18	3	1min	23,03	NO
19	4	1min	23,05	NO
20	5	1min	23,20	NO
21	1	1min	27,16	NO
22	2	1min	27,01	NO

23	3	1min	27,02	NO
24	4	1min	27,19	NO
25	5	1min	27,16	NO
26	1	1min	31,14	NO
27	2	1min	31,12	NO
28	3	1min	31,14	NO
29	4	1min	31,15	NO
30	5	1min	31,16	NO
31	1	1min	34,91	NO
32	2	1min	35,01	NO
33	3	1min	34,84	NO
34	4	1min	34,87	NO
35	5	1min	34,84	NO
36	1	1min	39,29	NO
37	2	1min	39,17	NO
38	3	1min	39,10	NO
39	4	1min	39,29	NO
40	5	1min	39,08	NO
41	1	1min	43,08	NO
42	2	1min	43,28	NO
43	3	1min	43,33	NO
44	4	1min	43,19	NO
45	5	1min	43,33	NO
46	1	1min	47,07	NO
47	2	1min	47,09	NO
48	3	1min	47,09	NO
49	4	1min	47,21	NO
50	5	1min	47,10	NO
51	1	1min	50,68	NO
52	2	1min	50,79	NO
53	3	1min	50,90	NO
54	4	1min	50,90	NO
55	5	1min	50,82	NO
56	1	1min	55,02	NO
57	2	1min	55,16	NO
58	3	1min	55,04	NO
59	4	1min	55,17	NO
60	5	1min	54,90	NO
61	1	1min	58,73	NO

62	2	1min	58,97	NO
63	3	1min	58,70	NO
64	4	1min	58,84	NO
65	5	1min	58,93	NO
66	1	1min	63,40	NO
67	2	1min	63,35	NO
68	3	1min	63,50	NO
69	4	1min	63,54	NO
70	5	1min	63,56	NO
71	1	1min	67,08	NO
72	2	1min	67,07	NO
73	3	1min	67,02	NO
74	4	1min	66,92	NO
75	5	1min	66,86	NO
76	1	1min	70,86	NO
77	2	1min	70,73	NO
78	3	1min	70,92	NO
79	4	1min	71,10	NO
80	5	1min	70,80	NO
81	1	1min	74,91	NO
82	2	1min	74,99	NO
83	3	1min	75,25	NO
84	4	1min	74,94	NO
85	5	1min	74,94	NO
86	1	1min	78,45	NO
87	2	1min	78,45	NO
88	3	1min	78,44	NO
89	4	1min	78,42	NO
90	5	1min	78,40	NO
91	1	1min	82,52	NO
92	2	1min	82,63	NO
93	3	1min	82,49	NO
94	4	1min	82,76	NO
95	5	1min	82,50	NO
96	1	1min	86,22	NO
97	2	1min	86,46	NO
98	3	1min	86,35	NO
99	4	1min	86,14	NO
100	5	1min	86,50	NO

101	1	1min	90,31	NO
102	2	1min	90,35	NO
103	3	1min	90,32	NO
104	4	1min	90,36	NO
105	5	1min	90,40	NO
106	1	1min	94,10	NO
107	2	1min	94,35	NO
108	3	1min	94,35	NO
109	4	1min	94,16	NO
110	5	1min	94,19	NO
111	1	1min	98,16	NO
112	2	1min	98,00	NO
113	3	1min	98,02	NO
114	4	1min	98,23	NO
115	5	1min	98,31	NO
116	1	1min	101,86	NO
117	2	1min	101,76	NO
118	3	1min	101,62	NO
119	4	1min	101,38	NO
120	5	1min	101,63	NO
121	1	1min	105,69	NO
122	2	1min	105,72	NO
123	3	1min	105,99	NO
124	4	1min	104,36	NO
125	5	1min	105,45	NO
126	1	1min	109,38	NO
127	2	1min	109,23	NO
128	3	1min	109,03	NO
129	4	1min	109,04	NO
130	5	1min	109,47	NO
131	1	1min	113,15	NO
132	2	1min	112,78	NO
133	3	1min	112,76	NO
134	4	1min	112,56	NO
135	5	1min	112,01	NO
136	1	1min	113,63	NO
137	2	1min	113,20	NO
138	3	1min	113,01	NO
139	4	1min	113,46	NO

140	5	1min	113,01	NO

4.2.5. Cálculo para la distribución normal o Gauss

En Microsoft Excel se tiene una función que devuelve la función de distribución normal acumulada y la función de densidad para una distribución normal con una media y una desviación estándar especificadas. La sintaxis es $DISTR.NORM\ (x, media, desv_estandar, acum)$.

Donde x es el valor al que desea evaluar la distribución, la $media$ es la media de la distribución, $desv_estandar$ es la desviación estándar y $acum$ (acumulativo) es un valor lógico ($TRUE$ para la función de distribución acumulada y $FALSE$ para la función de densidad de probabilidad).

Se procede a realizar el cálculo con las muestras obtenidas del voltímetro pico de impulso (módulo HV9152) que se encuentran en la Tabla 10 (tabla anterior), se realiza el cálculo de la media y también la desviación estándar para obtener la distribución normal como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11 Datos para la realización de la distribución normal en el elemento 1.
Fuente: Elaboración propia.

Media	**Desviación estándar**	**#**	**Distribución normal no acumulativa**	**Distribución normal acumulativa**
64,34	31,77877642	1	0,002678388	0,039396945
		2	0,002659176	0,039050004
		3	0,002640058	0,038705555
		4	0,002628339	0,03849482
		5	0,002678388	0,039396945
		6	0,003735751	0,05973945
		7	0,003735751	0,05973945
		8	0,003752245	0,06007641
		9	0,003724778	0,059515634
		10	0,003748576	0,060001401
		11	0,004553453	0,077198412

12	0,00453918	0,07688017
13	0,004573882	0,077654779
14	0,00458002	0,077792087
15	0,004547333	0,077061901
16	0,005430984	0,097742026
17	0,005402254	0,097037866
18	0,005393427	0,096821953
19	0,00539784	0,096929865
20	0,005430984	0,097742026
21	0,006332334	0,121017833
22	0,006297393	0,120070604
23	0,00629972	0,12013359
24	0,006339329	0,121207908
25	0,006332334	0,121017833
26	0,007274298	0,148087072
27	0,007269515	0,147941634
28	0,007274298	0,148087072
29	0,007276689	0,148159827
30	0,007279081	0,148232606
31	0,008176325	0,177212511
32	0,008200145	0,178031335
33	0,008159644	0,176640752
34	0,008166793	0,176885649
35	0,008159644	0,176640752
36	0,009201611	0,215286212
37	0,009174199	0,214183662
38	0,009158186	0,213542029
39	0,009201611	0,215286212
40	0,009153608	0,213358911
41	0,010036924	0,251763525
42	0,010079069	0,253775128
43	0,010089571	0,254279344
44	0,010060131	0,252868864
45	0,010089571	0,254279344
46	0,010830639	0,29342893
47	0,010834341	0,29364558
48	0,010834341	0,29364558
49	0,010856492	0,294947031
50	0,010836191	0,293753932

51	0,011446171	0,333671591
52	0,011463144	0,334931605
53	0,011480004	0,336193479
54	0,011480004	0,336193479
55	0,011467753	0,335275568
56	0,012025468	0,384673923
57	0,012040896	0,386358571
58	0,012027685	0,384914455
59	0,01204199	0,386478986
60	0,012012075	0,383231669
61	0,012359746	0,429957069
62	0,012375877	0,432925357
63	0,012357681	0,429586308
64	0,012367224	0,431317054
65	0,012373236	0,432430375
66	0,012548261	0,48822093
67	0,012547662	0,487593532
68	0,012549365	0,489475812
69	0,012549772	0,489977795
70	0,012549968	0,490228793
71	0,012507104	0,534374312
72	0,012507443	0,534249239
73	0,012509119	0,533623825
74	0,012512379	0,532372749
75	0,012514276	0,531621949
76	0,012292151	0,581299029
77	0,012302371	0,579700383
78	0,012287367	0,582036415
79	0,012272765	0,584246832
80	0,012296893	0,580561357
81	0,01187798	0,630305045
82	0,011868	0,631254885
83	0,011835103	0,634336303
84	0,011874245	0,630661329
85	0,011874245	0,630661329
86	0,01137508	0,671499123
87	0,01137508	0,671499123
88	0,011376669	0,671385364
89	0,011379845	0,671157799

90	0,011383016	0,670930171
91	0,01065844	0,716382835
92	0,010637289	0,7175541
93	0,010664194	0,716062995
94	0,010612183	0,718935317
95	0,010662276	0,716169627
96	0,009904222	0,754449673
97	0,009852571	0,756820495
98	0,009876281	0,755735407
99	0,009921373	0,753656649
100	0,009843935	0,757214425
101	0,008989524	0,793110507
102	0,008980274	0,793469903
103	0,008987212	0,79320039
104	0,008977961	0,793559694
105	0,008968705	0,793918627
106	0,008096889	0,825498145
107	0,008037206	0,827514908
108	0,008037206	0,827514908
109	0,00808257	0,825983529
110	0,00807541	0,826225898
111	0,007125431	0,856399456
112	0,007163624	0,855256332
113	0,007158849	0,855399557
114	0,007108729	0,856897652
115	0,007089647	0,857465587
116	0,006252479	0,881141353
117	0,006275722	0,880514944
118	0,006308302	0,879634062
119	0,00636426	0,878113358
120	0,006305973	0,879697134
121	0,005383912	0,90341053
122	0,0053773	0,903571948
123	0,005317944	0,9050158
124	0,005680268	0,896053536
125	0,005436927	0,902112033
126	0,004597814	0,921809333
127	0,004628625	0,921117351
128	0,004669867	0,920187505

129	0,0046678	0,920234193
130	0,004579377	0,922222306
131	0,003858971	0,937728382
132	0,003928337	0,936287752
133	0,003932106	0,936209148
134	0,003969916	0,935418949
135	0,004074945	0,933206682
136	0,003770043	0,939559297
137	0,003849651	0,937921097
138	0,003885134	0,937186296
139	0,0038014	0,938915727
140	0,003885134	0,937186296

4.2.6. Gráfica de la distribución normal

Con los valores obtenidos de la distribución normal, Tabla 11, se realiza una gráfica en donde esta permite calcular la probabilidad donde en un cierto intervalo de tensión ocurra una disrupción eléctrica en el elemento.

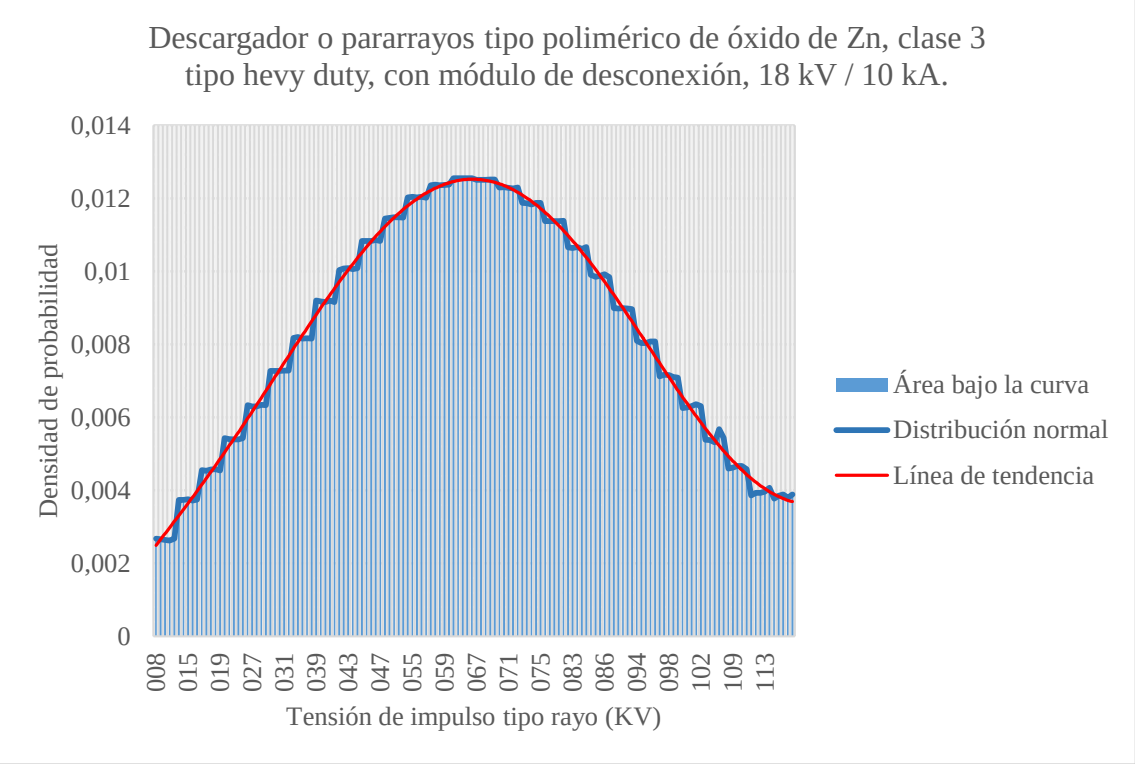


Figura 33 Gráfica de la distribución normal para el elemento 1.
Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, con la recopilación de datos expuesto anteriormente, se hace la gráfica de la distribución normal siguiendo la línea de tendencia con el objeto de una mejor visualización. Y se evalúa la probabilidad de los valores en tres condiciones la primera es entre dos elementos, segunda con la región izquierda y tercera con la región derecha.

En la evaluación de probabilidad entre dos valores se ha escogido dos niveles de tensión y como indica su resultado tiene un 3,4% de ocurrencia.

Tabla 12 Evaluación del área entre dos valores del elemento1.
Fuente: Elaboración propia.

Evaluación	
Área evaluada entre dos valores	
Tensión 1:	105,450
Tensión 2:	112,780
Longitud:	0,147
Probabilidad:	0,034

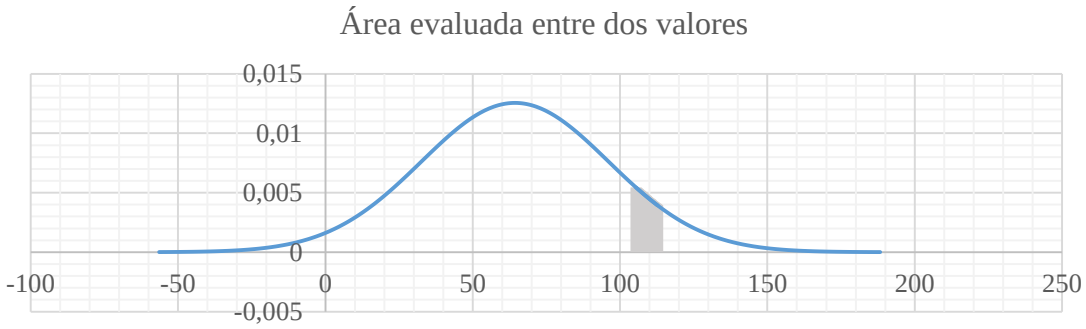


Figura 34 Área entre dos valores de la distribución normal del elemento1.
Fuente: Elaboración propia.

En la evaluación de la región izquierda se toma como valor inicial el valor mínimo y como es acumulativa hasta el valor de tensión deseado en este caso el valor mostrado en la Tabla 13, es decir existe una sumatoria de probabilidades desde el valor mínimo hasta el valor deseado. Se tiene un 90,2% de probabilidad de ocurrencia.

Tabla 13 Evaluación del área para la región o zona izquierda del elemento1.
Fuente: Elaboración propia.

Evaluación	
Área evaluada en la región izquierda	
Tensión 1:	105,450
Longitud:	3,237
Probabilidad:	0,902

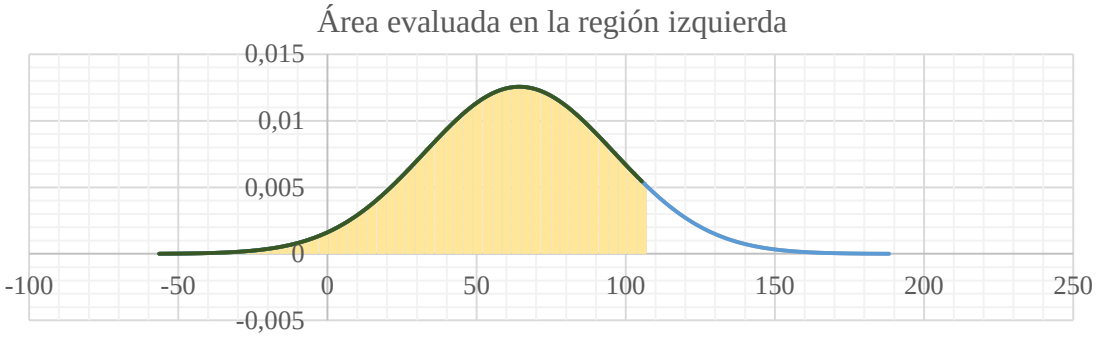


Figura 35 Área para la región o zona izquierda de la distribución normal del elemento1.
Fuente: Elaboración propia.

Y para la zona derecha, viene a resultar el complemento de la zona izquierda, en este caso el valor de probabilidad de ocurrencia es del 6,4%.

Tabla 14 Evaluación del área para la región o zona derecha del elemento1.
Fuente: Elaboración propia.

Evaluación	
Área evaluada en la región derecha	
Tensión 2:	112,780
Longitud:	1,510
Probabilidad:	0,064

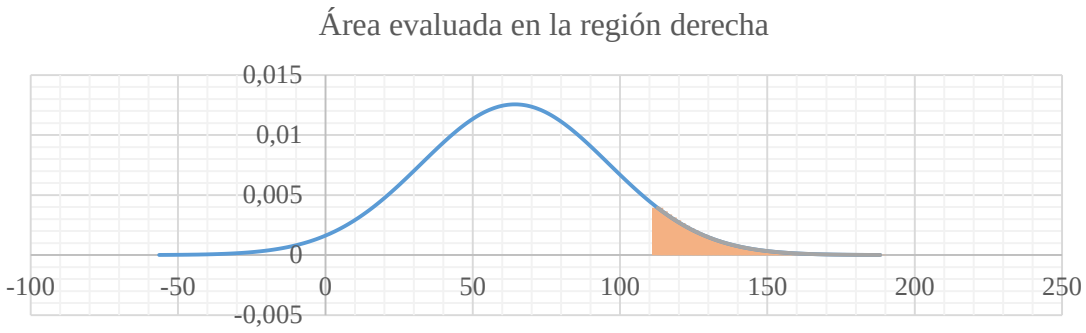


Figura 36 área para la región o zona izquierda del elemento1.
Fuente: Elaboración propia.

4.2.7. Graficas de resultados del impulso tipo rayo

En este punto las características de tiempo de identificación de las tensiones de impulso se dan en la Figura 37, Figura 38 y Figura 39.

En esta prueba, las tensiones de impulso del rayo con un tiempo de frente $T1 = 1.2\ \mu s$ (Figura 38) y un tiempo de medio valor $T2 = 50\ \mu s$ (Figura 39) la cual tiene forma de $1.2/50\ \mu s$. En las pruebas de impulso tipo rayo para el elemento 1 realizadas el fallo por disrupción eléctrica nunca se dio, es decir que el elemento soporto todas las pruebas hasta el nivel máximo de tensión que brinda el banco.

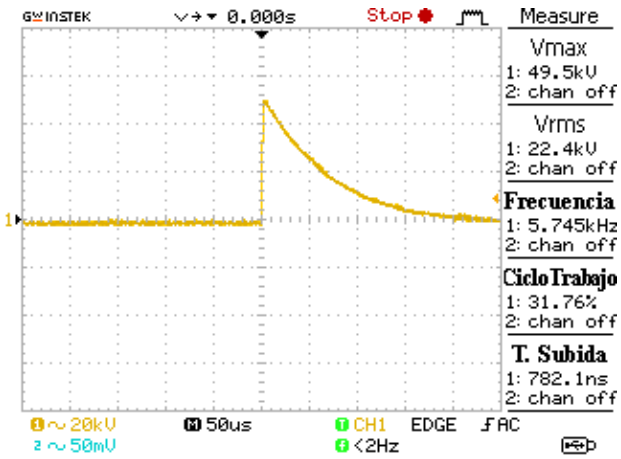


Figura 37 Curva de tensión de impulso tipo rayo del elemento 1.
Fuente: Elaboración propia.

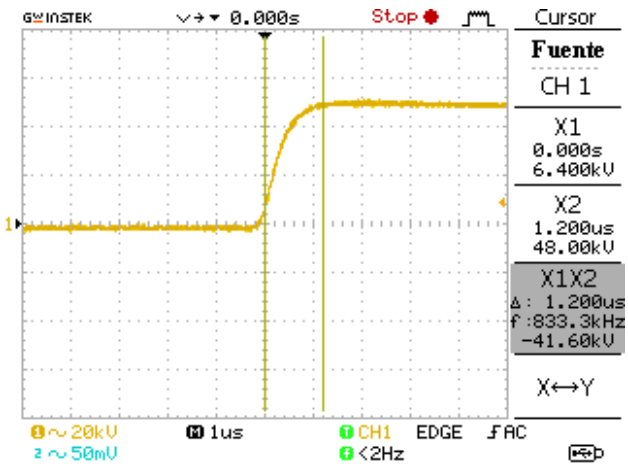


Figura 38 Curva de tensión de impulso tipo rayo del elemento 1 donde se muestra el tiempo de 1,20us. Fuente: Elaboración propia.

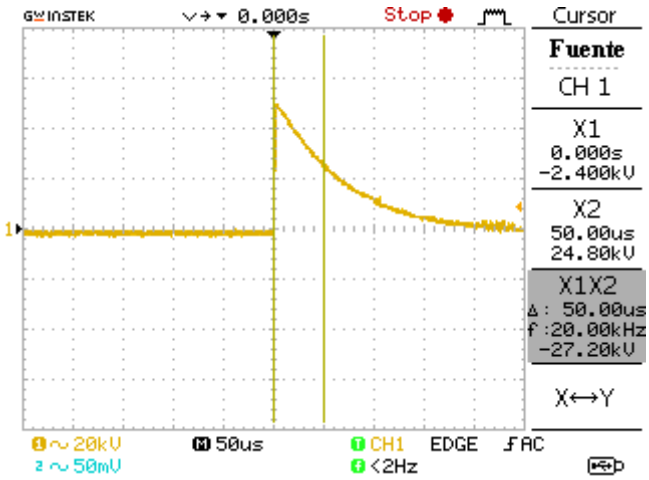


Figura 39 Curva de tensión de impulso tipo rayo del elemento 1 donde se muestra el tiempo de 50us. Fuente: Elaboración propia.

4.3.Elementos usados en la corrección atmosférica

En la Tabla 15 se presenta los resultados de los ensayos aplicados a los elementos de media tensión seleccionados. Se da a conocer los elementos utilizados, las condiciones atmosféricas estándar y de prueba, el cálculo para convertir la humedad relativa a absoluta, como también la determinación del tamaño de la muestra para tener una idea sobre cuantas mediciones se realizará en cada prueba, y finalmente la corrección atmosférica donde con el factor se multiplica la tensión dada por el catálogo y se obtiene la tensión corregida del elemento.

Tabla 15 Elementos de media tensión usados en la corrección atmosférica.
Fuente: Elaboración propia.

Número de elemento	**Descripción**	**Parámetros iniciales**								
		Condiciones atmosféricas estándar	**Condiciones atmosféricas de prueba**	**Cálculo de humedad relativa a humedad absoluta**	**Corrección atmosférica del impulso tipo rayo**					**Determinación del tamaño de la muestra**
					Factor $\frac{k_d}{k_h}$	Catálogo		Corrección kV		
						+	-	+	-	
1	Descargador o pararrayos tipo polimérico de óxido de Zn, clase 3 tipo hevy duty, con módulo de desconexión, 18 kV / 10 kA	$t_0 = 20°C$ $p_0 = 101.3\ kPa$ $h_0 = 11\ {}^{g}/_{m^3}$	t = 22.2°C $p = 753.4\ hPa \approx 75{,}34\ kPa$ $h_r = 51\%$	$h = 10.02788\ {}^{g}/_{m^3}$	0.73088	150 kV		110 kV		140 (+)
2	Aislador tipo espiga (pin), de porcelana, clase ANSI 56-1, 25 kV.		t = 23.1°C $p = 748{,}4\ hPa \approx 74{,}84\ kPa$ $h_r = 44\%$	$h = 9.10895\ {}^{g}/_{m^3}$	0.723823	150 kV	109 kV	190 kV	138 kV	147 (+) 141 (−)
3	Aislador de suspensión, de porcelana, clase ANSI 52, 15 kV		t = 24°C $p = 752{,}2\ hPa \approx 75{,}22\ kPa$ $h_r = 42\%$	$h = 9.15163\ {}^{g}/_{m^3}$	0.725293	100 kV	100 kV	73 kV		120 (+) 140 (−)
4	Aislador tipo suspensión, de caucho siliconado, clase ANSI DS-15, 15 kV		t = 22.2°C $p = 753.4\ hPa \approx 75.34\ kPa$ $h_r = 51\%$	$h = 10.0279\ {}^{g}/_{m^3}$	0.723714	140 kV	160 kV	101 kV	116 kV	150 (+) 150 (−)
5	Cable de alta tensión TYPE MV-90 2 AWG COMPACT CU XLPE, 15kV		t = 22.2°C $p = 754.3\ hPa \approx 75.43\ kPa$ $h_r = 45\%$	$h = 8.84816\ {}^{g}/_{m^3}$	0.731753	30 kV		22 kV		70 (+)

4.3.1. Graficas de los elementos seleccionados en las pruebas

Para añadir información a la Tabla 15 se presenta a continuación los elementos que fueron utilizados para realizar las pruebas.

Figura 40 Elemento 1.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 41 Elemento 2.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 42 Elemento 3.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 43 Elemento 4.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 44 Elemento 5.
Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Gráfica de la distribución normal

Con los valores obtenidos de la distribución normal, se realiza una gráfica que permite calcular la probabilidad que ocurra una disrupción eléctrica en cada uno de los elementos.

Para el elemento 1 la media es de 64.34 y la desviación estándar de 31.77.

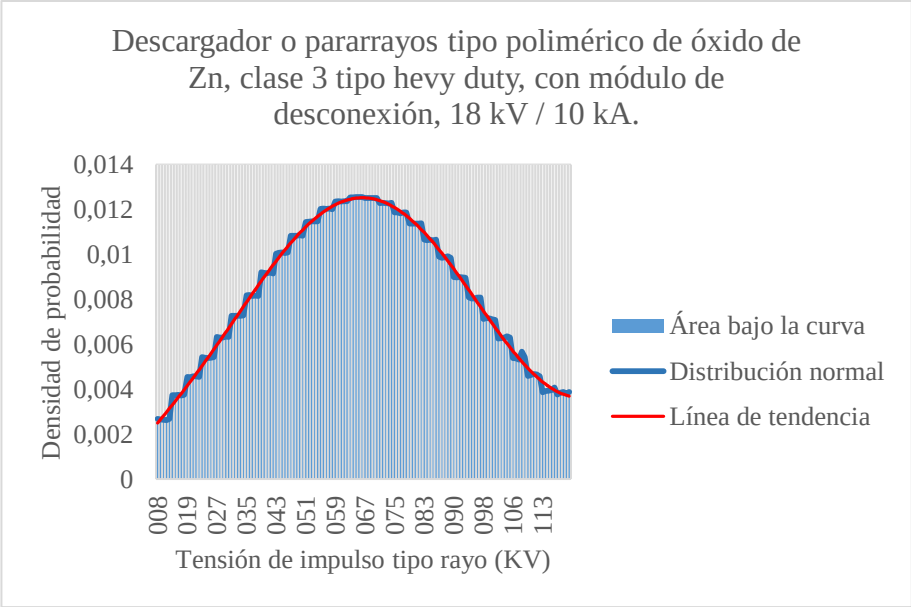


Figura 45 Grafica de la distribución normal de las pruebas de impulso tipo rayo positivo para el elemento 1.
Fuente: Elaboración propia.

Para el elemento 2 en pruebas de impulso tipo rayo positivo la media es de 66.41 y la desviación estándar de 32.57.

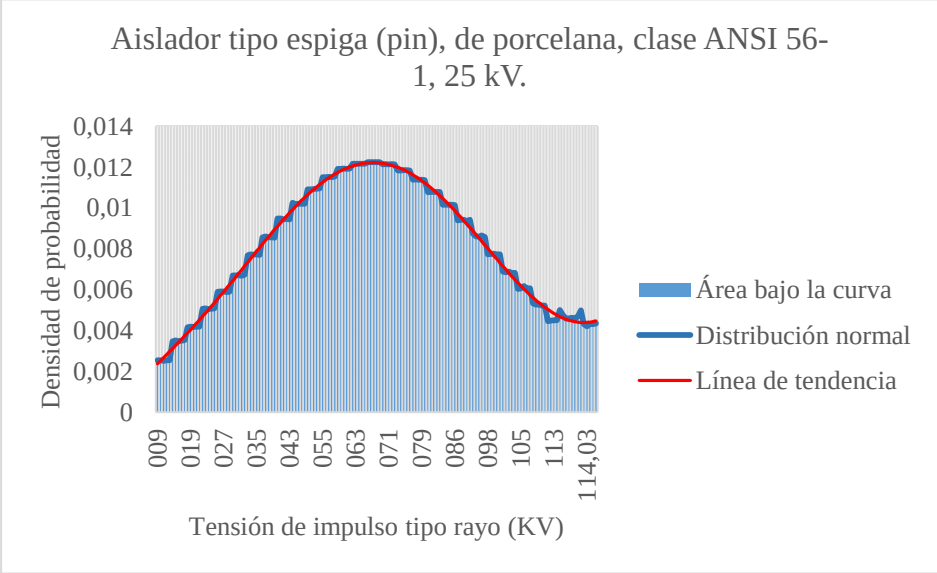


Figura 46 Grafica de la distribución normal de las pruebas de impulso tipo rayo positivo para el elemento 2.
Fuente: Elaboración propia.

En pruebas de impulso tipo rayo negativo la media es de 64.39 y la desviación estándar de 31.75.

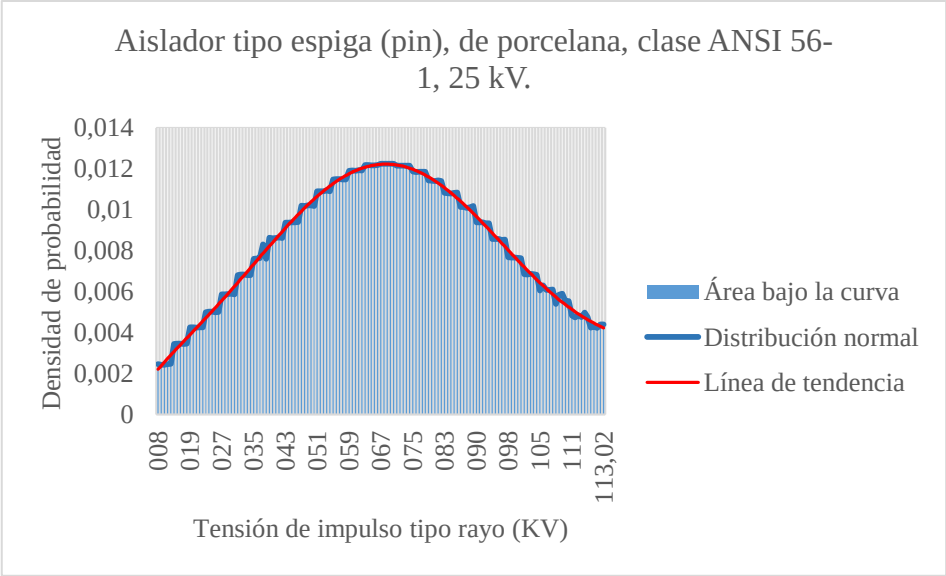


Figura 47 Grafica de la distribución normal de las pruebas de impulso tipo rayo negativo para el elemento 2.
Fuente: Elaboración propia.

Para el elemento 3 en pruebas de impulso tipo rayo positivo la media es de 53.89 y la desviación estándar de 24.48.

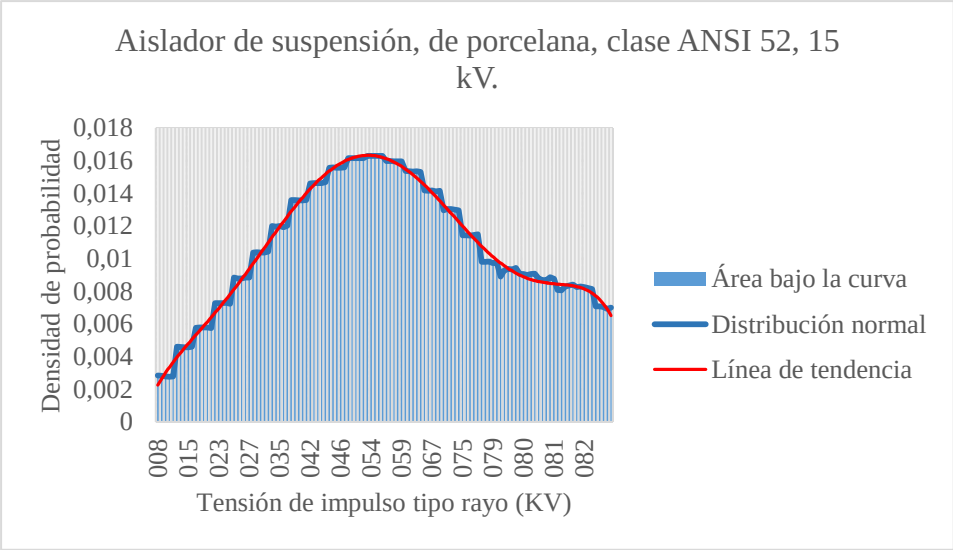


Figura 48 Grafica de la distribución normal de las pruebas de impulso tipo rayo positivo para el elemento 3.
Fuente: Elaboración propia.

En pruebas de impulso tipo rayo negativo la media es de 61.14 y la desviación estándar de 28.13.

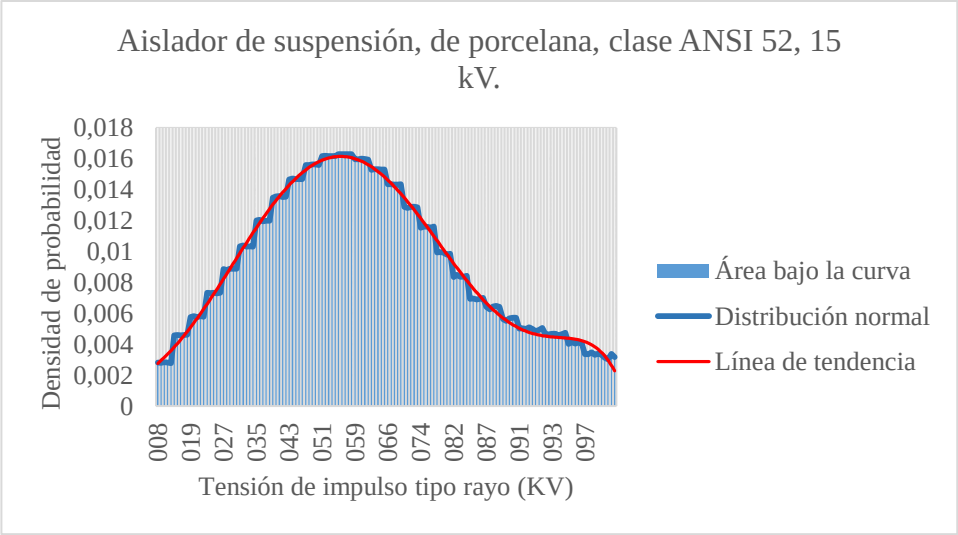


Figura 49 Grafica de la distribución normal de las pruebas de impulso tipo rayo negativo para el elemento 3.
Fuente: Elaboración propia.

Para el elemento 4 en pruebas de impulso tipo rayo positivo la media es de 67.18 y la desviación estándar de 32.56.

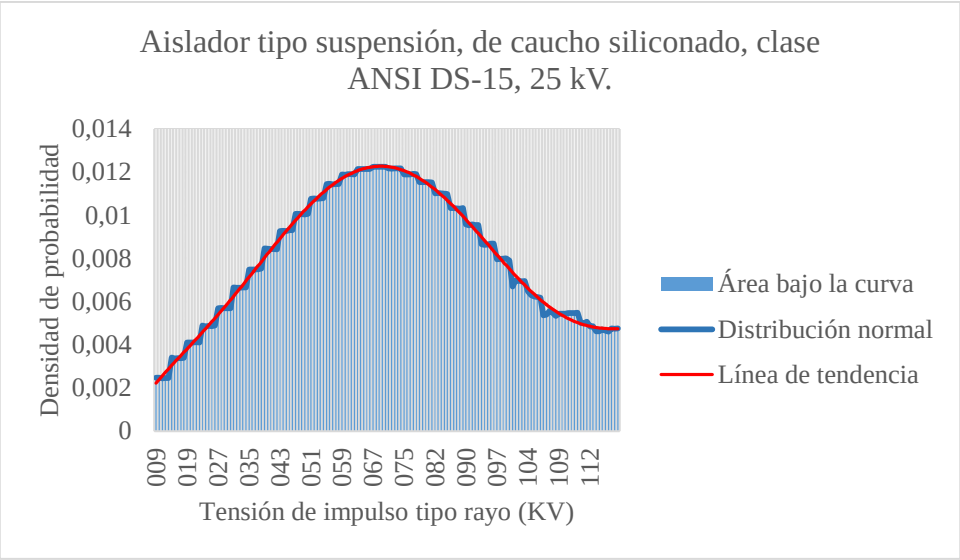


Figura 50 Grafica de la distribución normal de las pruebas de impulso tipo rayo positivo para el elemento 4.
Fuente: Elaboración propia.

En pruebas de impulso tipo rayo negativo la media es de 67.23 y la desviación estándar de 32.61.

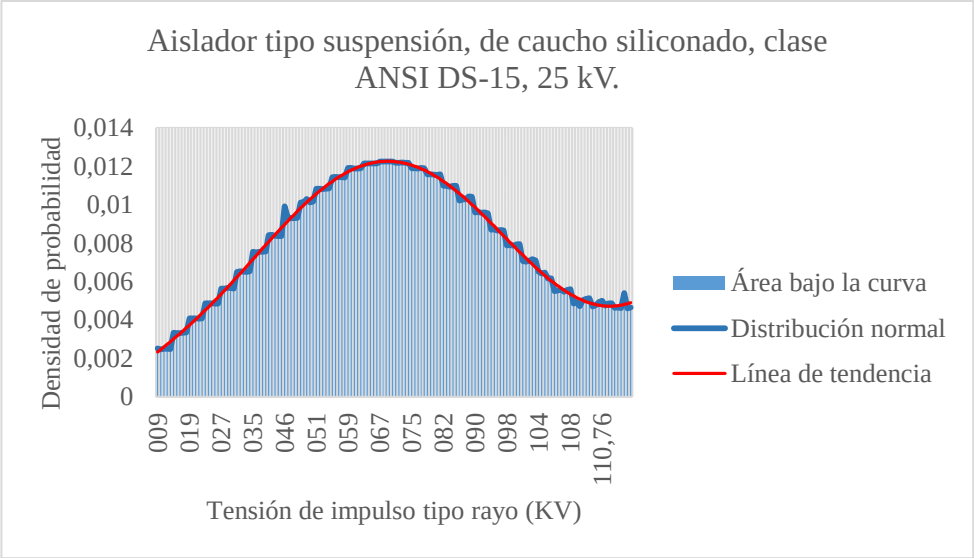


Figura 51 Grafica de la distribución normal de las pruebas de impulso tipo rayo negativo para el elemento 4.
Fuente: Elaboración propia.

Para el elemento 8 la media es de 25.43 y la desviación estándar de 6.67.

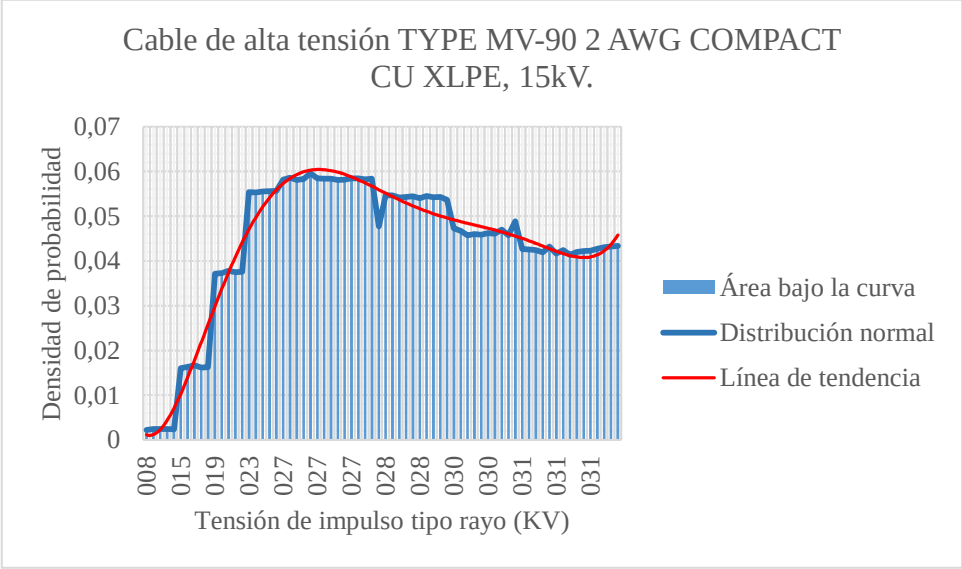


Figura 52 Grafica de la distribución normal de las pruebas de impulso tipo rayo positivo para el elemento 5.
Fuente: Elaboración propia.

4.3.3. Figuras de impulso tipo rayo

En las figuras de la Figura 53 a la Figura 83 se presenta el impulso tipo rayo en cada uno de los elementos de media tensión, como también se muestran figuras cuando se presenta una disrupción eléctrica en el elemento.

4.3.3.1. Elemento 1

Las tensiones de impulso del rayo con un tiempo de frente $T1 = 1.2\ \mu s$ (Figura 54) y un tiempo de medio valor $T2 = 50\ \mu s$ (Figura 55) la cual tiene forma de $1.2/50\ \mu s$.

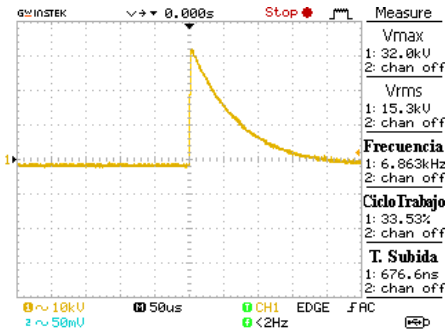


Figura 53 Curva de tensión de impulso tipo rayo del elemento 1.
Fuente: Elaboración propia.

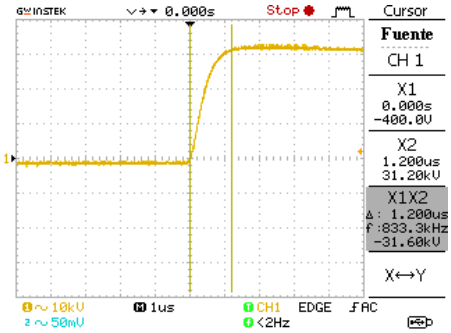


Figura 54 Curva de tensión de impulso tipo rayo del elemento 1 donde se muestra el tiempo de 1,20us.
Fuente: Elaboración propia.

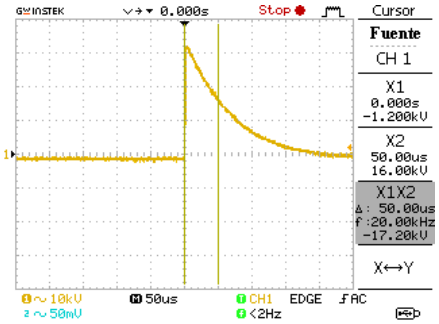


Figura 55 Curva de tensión de impulso tipo rayo del elemento 1 donde se muestra el tiempo de 50us.
Fuente: Elaboración propia.

4.3.3.2. Elemento 2

Las tensiones de impulso del rayo en positivo y negativo con un tiempo de frente $T1 = 1.2\ \mu s$ (Figura 57 y Figura 61) y un tiempo de medio valor $T2 = 50\ \mu s$ (Figura 58 y Figura 62) la cual tiene forma de $1.2/50\ \mu s$. En las pruebas de impulso tipo rayo para el elemento 2 realizadas, el fallo por disrupción eléctrica se dio (Figura 59), el elemento no soporto todas las pruebas.

4.3.3.2.1. Positivo

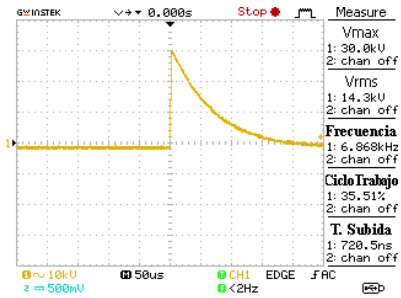


Figura 56 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 2.
Fuente: Elaboración propia.

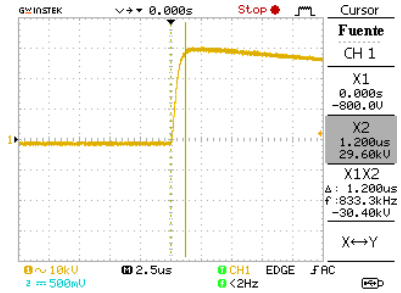


Figura 57 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 2 donde se muestra el tiempo de 1,20us.
Fuente: Elaboración propia.

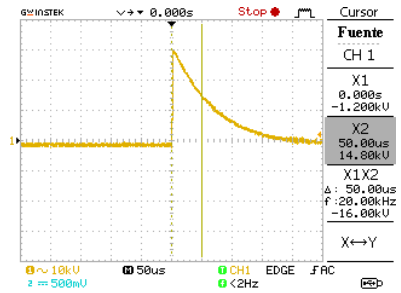


Figura 58 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 2 donde se muestra el tiempo de 50us.
Fuente: Elaboración propia.

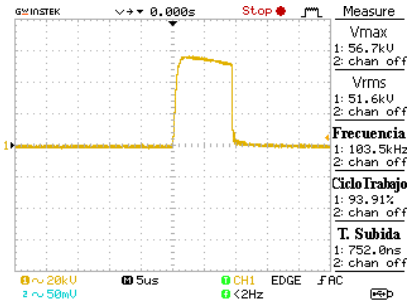


Figura 59 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 2 donde se muestra la disrupción eléctrica.
Fuente: Elaboración propia.

4.3.3.2.2. Negativo

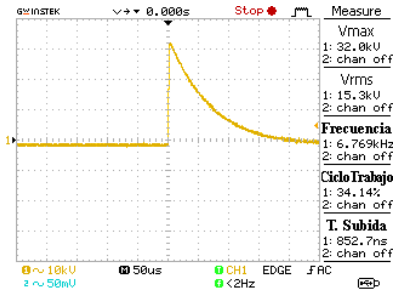


Figura 60 Curva de tensión de impulso tipo rayo negativo del elemento 2.
Fuente: Elaboración propia.

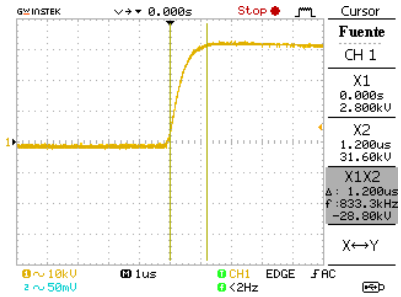


Figura 61 Curva de tensión de impulso tipo rayo negativo del elemento 2 donde se muestra el tiempo de 1,20us.
Fuente: Elaboración propia.

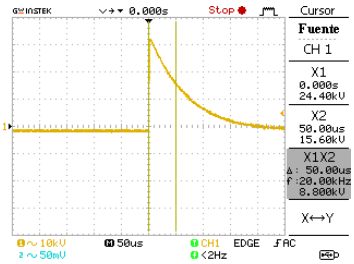


Figura 62 Curva de tensión de impulso tipo rayo negativo del elemento 2 donde se muestra el tiempo de 50us.
Fuente: Elaboración propia.

4.3.3.3. Elemento 3

Las tensiones de impulso del rayo en positivo y negativo con un tiempo de frente $T1 = 1.2\ \mu s$ (Figura 64 y Figura 68) y un tiempo de medio valor $T2 = 50\ \mu s$ (Figura 65 y Figura 69) la cual tiene forma de $1.2/50\ \mu s$. En las pruebas de impulso tipo rayo para el elemento 3 realizadas, el fallo por disrupción eléctrica se dio (Figura 66 y Figura 70), el elemento no soporto todas las pruebas.

4.3.3.3.1. Positivo

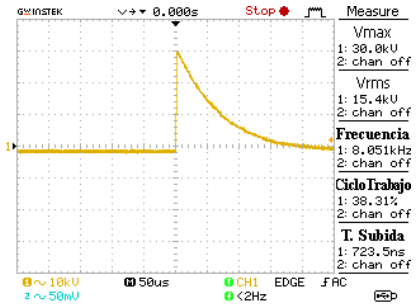


Figura 63 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 3.
Fuente: Elaboración propia.

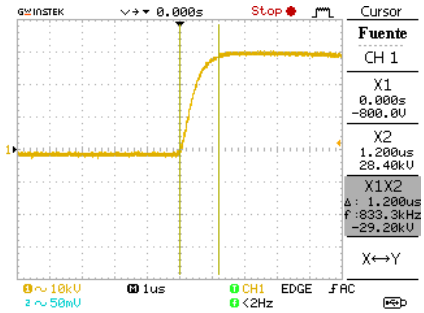


Figura 64 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 3 donde se muestra el tiempo de 1,20us.
Fuente: Elaboración propia.

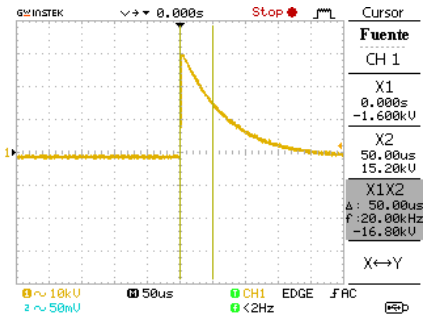


Figura 65 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 3 donde se muestra el tiempo de 50us.
Fuente: Elaboración propia.

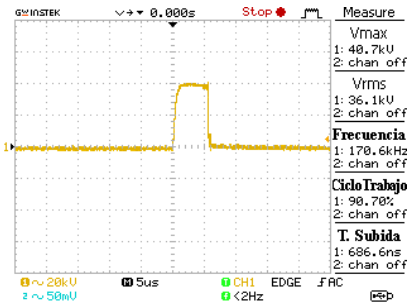


Figura 66 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 3 donde se muestra la disrupción eléctrica.
Fuente: Elaboración propia.

4.3.3.3.2. Negativo

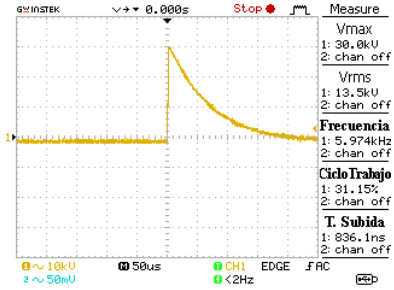


Figura 67 Curva de tensión de impulso tipo rayo negativo del elemento 3.
Fuente: Elaboración propia.

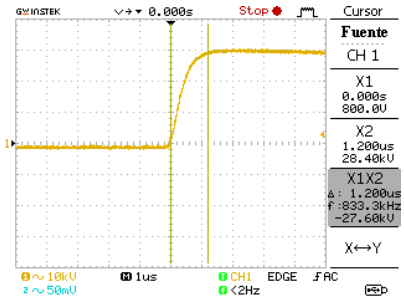


Figura 68 Curva de tensión de impulso tipo rayo negativo del elemento 2 donde se muestra el tiempo de 1,20us.
Fuente: Elaboración propia.

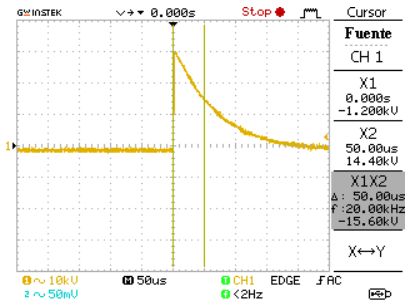


Figura 69 Curva de tensión de impulso tipo rayo negativo del elemento 3 donde se muestra el tiempo de 50us.
Fuente: Elaboración propia.

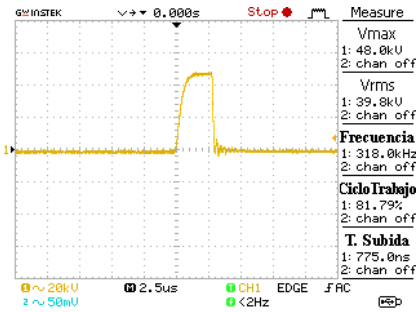


Figura 70 Curva de tensión de impulso tipo rayo negativo del elemento 3 donde se muestra la disrupción eléctrica.
Fuente: Elaboración propia.

4.3.3.4. Elemento 4

Las tensiones de impulso del rayo en positivo y negativo con un tiempo de frente $T1 = 1.2\ \mu s$ (Figura 72 y Figura 76) y un tiempo de medio valor $T2 = 50\ \mu s$ (Figura 73 y Figura 77) la cual tiene forma de $1.2/50\ \mu s$. En las pruebas de impulso tipo rayo para el elemento 4 realizadas, el fallo por disrupción eléctrica se dio (Figura 74 y Figura 78), es decir que el elemento no soporto todas las pruebas.

4.3.3.4.1. Positivo

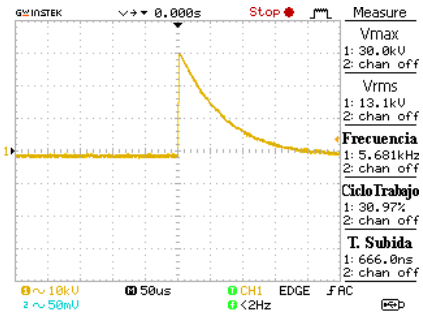


Figura 71 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 4.
Fuente: Elaboración propia.

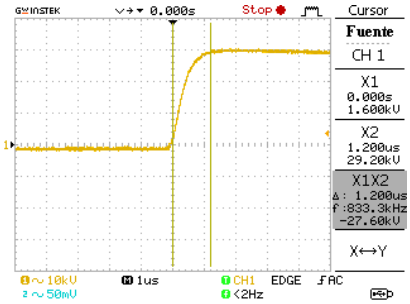


Figura 72 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 4 donde se muestra el tiempo de 1,20us.
Fuente: Elaboración propia.

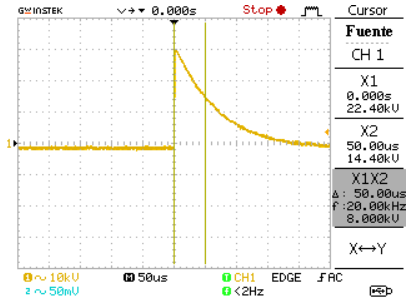


Figura 73 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 4 donde se muestra el tiempo de 50us.
Fuente: Elaboración propia.

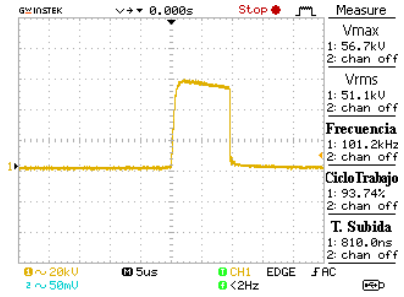


Figura 74 Curva de tensión de impulso tipo rayo positivo del elemento 4 donde se muestra la disrupción eléctrica.
Fuente: Elaboración propia.

4.3.3.4.2. Negativo

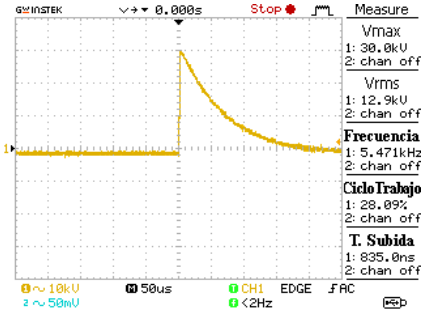


Figura 75 Curva de tensión de impulso tipo rayo negativo del elemento 4.
Fuente: Elaboración propia.

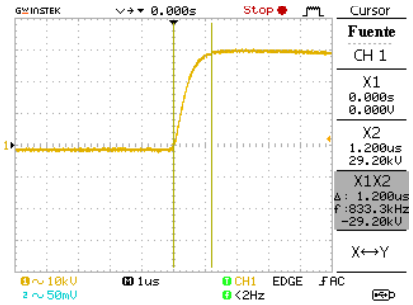


Figura 76 Curva de tensión de impulso tipo rayo negativo del elemento 4 donde se muestra el tiempo de 1,20us.
Fuente: Elaboración propia.

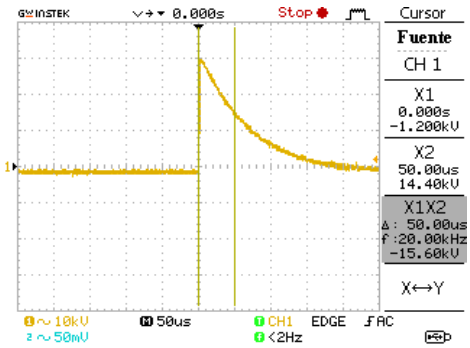


Figura 77 Curva de tensión de impulso tipo rayo negativo del elemento 4 donde se muestra el tiempo de 50us.
Fuente: Elaboración propia.

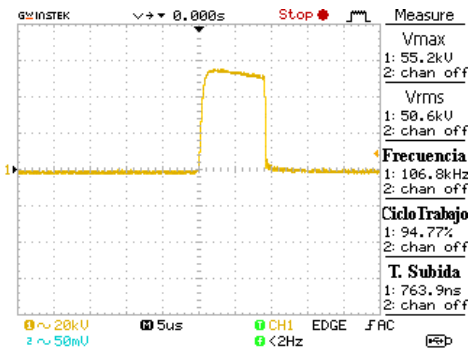


Figura 78 Curva de tensión de impulso tipo rayo negativo del elemento 4 donde se muestra la disrupción eléctrica.
Fuente: Elaboración propia.

4.3.3.5. Elemento 5

Las tensiones de impulso del rayo con un tiempo de frente $T1 = 1.2\ \mu s$ (Figura 80) y un tiempo de medio valor $T2 = 50\ \mu s$ (Figura 81) la cual tiene forma de $1.2/50\ \mu s$. En las pruebas de impulso tipo rayo para el elemento 5 realizadas, el fallo por disrupción eléctrica se dio (Figura 82), el elemento no soporto todas las pruebas.

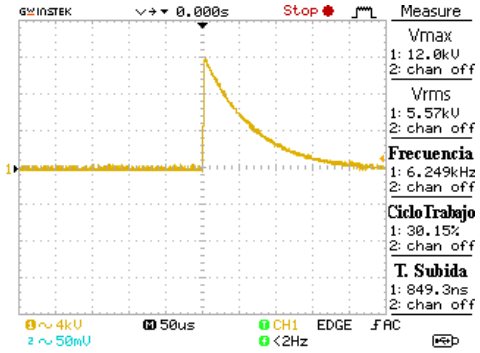


Figura 79 Curva de tensión de impulso tipo rayo del elemento 5.
Fuente: Elaboración propia.

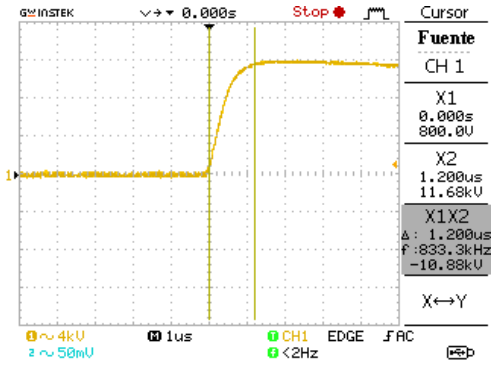


Figura 80 Curva de tensión de impulso tipo rayo del elemento 5 donde se muestra el tiempo de 1,20us.
Fuente: Elaboración propia.

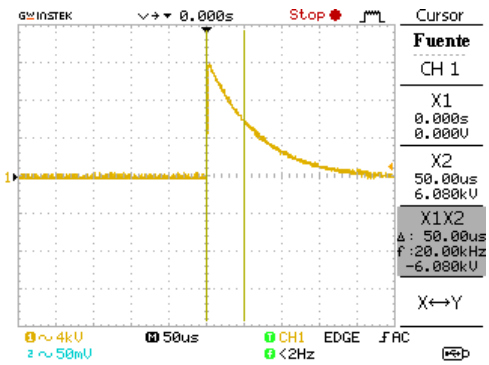


Figura 81 Curva de tensión de impulso tipo rayo del elemento 5 donde se muestra el tiempo de 50us.
Fuente: Elaboración propia.

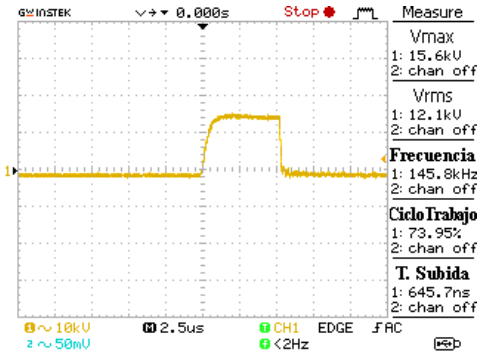


Figura 82 Curva de tensión de impulso tipo rayo del elemento54 donde se muestra la disrupción eléctrica.
Fuente: Elaboración propia.

5. Conclusiones

Se logró satisfactoriamente establecer la propuesta de la aplicación de ensayos disruptivos para la determinación del BIL a través de esferas espinterométricas en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana.

El planteamiento del diseño del circuito electrónica de la placa de la esfera espinterométrica fue correcto ya que cumple con el funcionamiento de la placa electrónica anterior.

Se verifico que el diseño de la tarjeta cumple con los requerimientos para ser utilizada como generador en las esferas espinterométricas. Los ensayos realizados en el laboratorio permitieron comprobar que los dispositivos evaluados de media tensión cumplen la normativa IEEE STD 4 bajo corrección atmosférica aplicada.

Los elementos electrónicos utilizados en la placa fueron buscados con detalle, primero para cumplir la funcionalidad y segundo, ya que, contando con un volumen de trabajo muy pequeño, los elementos deben caber con normalidad en la esfera espinterométrica. Se logró su correcta funcionalidad y con un costo muy bajo.

Los ensayos disruptivos realizados sirven para tener un valor referencial del nivel básico de asilamiento (BIL) en cada uno de los elementos de media tensión usados en la ciudad de Cuenca.

Las pruebas fueron realizadas siguiendo bajo la norma IEEE STD 4. Al trabajar en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana se deben seguir protocolos de seguridad, basándonos en el documento brindado titulado Alta Tensión Experimentos Terco-UPS.

Las gráficas probabilísticas brindan información acerca de lo que sucede en los elementos, ya que las disrupciones se vuelven más frecuentes a medida que se acerca al valor de corrección.

Las condiciones atmosféricas de prueba, aplicando la normativa de corrección, del laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca permiten realizar ensayos sobre elementos utilizados en niveles de 22kV.

Cuando se aplica el método de corrección atmosférica a los dispositivos de media tensión se utiliza el valor de impulso positivo de su hoja de datos, y de esta manera esta tensión de impulso se reduce, los ensayos de pruebas realizadas en cada dispositivo permitieron identificar que el elemento cumple con su aislamiento externo y que una vez superado su BIL su aislamiento externo empieza a fallar.

En la naturaleza de su funcionamiento los elementos de media tensión están sujetos a esfuerzos dieléctricos, efectos atmosféricos y otras condiciones externas de contaminación que hacen que su aislamiento externo y su BIL cambien. Los diferentes ensayos realizados, permitieron obtener la probabilidad de falla de un elemento cuando está sometido a condiciones naturales.

6. Recomendaciones

Al conocer el funcionamiento de la placa electrónica y demás componentes que integran la misma, esta debe permanecer siempre dentro del volumen de la esfera espinterométrica ya que el circuito debe ser totalmente individual o aislado al circuito de alta tensión, porque la función de la esfera espinterométrica es la de una jaula de Faraday lo que impide que campos eléctricos interfieran con el circuito eléctrico garantizando su funcionamiento.

Los componentes de la esfera deberán siempre conservar sus mismas características, debido a que los elementos fueron adquiridos para que cumplan con la funcionalidad y el ajuste necesario para el volumen de la esfera espinterométrica.

Si la batería cumple su vida útil, esta debe ser reemplazada con otra de las mismas características, puesto que deberá suplir la cantidad de corriente necesaria para su funcionamiento.

En la necesidad de cambiar el tipo de fuente de alimentación se deben usar tres baterías de 9V conectadas en paralelo para mantener el voltaje y aumentar la corriente para su funcionamiento.

Desconectar la fuente de alimentación de la placa electrónica, luego de cualquier aplicación para prolongar la vida útil de la batería y evitar un consumo por parte de los componentes de la placa electrónica.

Seguir el esquema de pruebas para evitar daños tanto en el banco de trabajo, como en los dispositivos de medición conectados al banco.

Alternar la resistencia de carga HV9121, cuando se realicen periodos de pruebas de impulso tipo rayo largos y seguidos.

Sujetar correctamente los cables de alimentación de la placa electrónica y del multiplicador de tensión en la bujía de encendido.

Para el diseño de la esfera se lo podría adecuar de cualquier manera, pero siempre teniendo en cuenta que la parte electrónica debe estar envuelta en una jaula de Faraday y tener una tierra no común con el circuito de alta tensión.

7. Bibliografía

GÓMEZ, S. E. (2009). *Desarrollo de una norma de pruebas en alta tensión basada en el generador de impulsos de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador.* EL SALVADOR: UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.

IEEE STANDARD. (2013). 4-2013 - IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques. *IEEE*.

Karppine, P. (2017). *Detection of High-Energy Particles in Both Space and Time Using FlexRIO.* Obtenido de National Instruments: http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-17368#

Medina, M. (2012). *Operación de un módulo didáctico para realizar descargas en aire y aplicación de pruebas de rigidez dieléctrica para aislantes gaseosos de interruptores de distribución con la utilización de laboratorio.* Obtenido de Biblioteca general de la Universidad Tecnica de Cotopaxi: http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/861

Pedersen, A. (Febrary de 1967). Calculation of spark breakdown or corona starting voltages in nonuniform fields. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Obtenido de IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems.

Pérez Formigó, M. (2010). *Modelado de descargas eléctricas en gases mediante redes neuronales.* Obtenido de Biblioteca de Ingeniería de la Universidad de Sevilla: http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70196/fichero/AnexoI%252FanexoI.pdf

RAMOS, C. G. (2004). *MEDICION DISTRIBUIDA DE DESCARGA PARCIALES* . MEXICO: MEXICO D.F. .

Saguay, M., & Torres, R. (2011). *Analisis de comportamiento de medios dieléctricos ante las altas tensiones eléctricas.* Obtenido de Repositorio Instucional de la Universidad de Cuenca: http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/687/1/te319.pdf

Valavala, M., & Kanchanapalli, B. (October de 2014). Measurement of air breakdown Voltage using standad sphere gap method. *Journal of Electrical Engineering*, 6.

IPC-2221 Printed Board Design. (1998). *Group*, (February).

Society, E. (2013). *Techniques* (Vol. 2013).

Terco Ab. (2011). Introduction to High Voltage Experiments, (January), 47.

8. Anexos

8.1. Anexo A: Carga digital de archivos, de las mediciones realizadas (2.045 elementos)

Vinculo:

https://www.dropbox.com/sh/xx3n2yrs4ldb6x0/AACM3k2U75dHn96rBumC5AIua?dl=0