

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

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

PROYECTO TÉCNICO DE ENFOQUE INVESTIGATIVO

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SIMULADOR DE LLUVIA PARA EL  
LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UPS-CUENCA”

Autores:

Juan Diego Ochoa Cabrera  
Jonathan Rodrigo Macas Sandoval

Tutor:

Ing. Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque

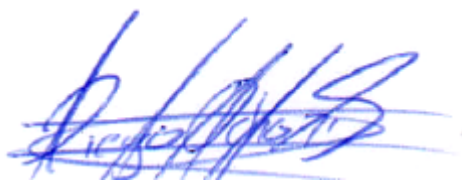
Cuenca, Ecuador  
2018

## Cesión de Derechos del Autor

Nosotros, Juan Diego Ochoa Cabrera con C.I: 0105411755 y Jonathan Rodrigo Macas Sandoval con C.I: 0705386787 manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud que somos autores del trabajo de titulación “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SIMULADOR DE LLUVIA PARA EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UPS-CUENCA”, 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 hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca Mayo del 2018



Juan Diego Ochoa Cabrera  
C.I: 0105411755



Jonathan Rodrigo Macas Sandoval  
C.I: 0705386787

## **Certificación**

Yo declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SIMULADOR DE LLUVIA PARA EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UPS-CUENCA”, realizado por Juan Diego Ochoa Cabrera y Jonathan Rodrigo Macas Sandoval, obteniendo el Proyecto técnico de enfoque investigativo, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca Mayo del 2018

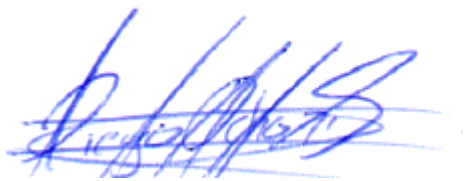
A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, loopy initial 'F' followed by several cursive strokes, likely representing the name Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque.

Ing. Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque  
CI: 0102257482

## **Declaratoria de Responsabilidad**

Nosotros, Juan Diego Ochoa Cabrera con C.I: 0105411755 y Jonathan Rodrigo Macas Sandoval con C.I: 0705386787 autores del trabajo de titulación “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SIMULADOR DE LLUVIA PARA EL LABORATORIO DE ALTA TENSION DE LA UPS-CUENCA” certificamos que el total contenido del proyecto técnico es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca Mayo del 2018



Juan Diego Ochoa Cabrera  
C.I: 0105411755



Jonathan Rodrigo Macas Sandoval  
C.I: 0705386787

## Agradecimientos

*Queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos en primer lugar a Dios, por habernos dado salud y vida para culminar un éxito más en nuestras vidas, a nuestras familias y amigos por el apoyo que nos han brindado durante todo el tiempo de estudios, a nuestro tutor del proyecto técnico Ing. Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque, por su ayuda y colaboración en todo lo necesario en la realización de este proyecto, al Ing. Pablo Robles docente universitario, por brindar todo su conocimiento, experiencia, apoyo y tiempo de una manera desinteresada en su colaboración con nuestra investigación, siendo clave en los resultados obtenidos.*

***Juan, Jonathan***

## **Dedicatoria**

*Agradezco a Dios por permitirme cumplir esta meta en mi vida, a mis padres por el sacrificio y apoyo incondicional que me brindaron, de manera especial a mi mami Rosa Cabrera ella es el pilar y sentido de mi vida. A mi tía Teresa Cabrera, mi hermano Geovanny que me ayudaron en los momentos más difíciles. En la memoria de mi hermano Edwin Patricio Ochoa, gracias por dejarme esos bellos recuerdos que compartimos, es difícil no volver a verte ni disfrutar de tu alegría, pero siempre estás presente en mi corazón. Gracias por todo...*

***Juan Diego Ochoa Cabrera***

*Primeramente, a Dios por haberme dado salud y permitir llegar hasta este punto pudiendo alcanzar mis objetivos, a mis padres Julia y Rodrigo pilares fundamentales en mi vida, mi hermano Cristhian un amigo eterno, mis primas, mi núcleo familiar más allegado, amigos incondicionales por haberme apoyado en todo momento con sanos valores y demás personas que me vieron formar desde niño, a todos ellos gracias infinitas...*

***Jonathan Rodrigo Macas Sandoval***

## Resumen

Desde sus comienzos la simulación de lluvia se ha visto como una herramienta de trabajo, la cual busca representar una parte importante del ciclo hidrológico de forma experimental y se construyen con el fin de acelerar los estudios en diferentes áreas de investigación, el uso de simuladores de lluvia se ha acrecentado por la facilidad que presenta al replicar la lluvia natural, por lo cual se ha convertido en una herramienta de gran ayuda en áreas de estudio en estados húmedos, aplicado en alta tensión.

Para fortalecer la investigación en ambientes húmedos, se diseña un simulador de lluvia para el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca (UPS), el laboratorio posee una área de trabajo de  $2 \times 4 \text{ m}$ , con un generador clase Marx para pruebas en AC y DC con un voltaje RMS de  $100 \text{ kV}$ ; por las características que posee el laboratorio se construye un simulador de lluvia tipo aspersión basándose en las normas IEEE std 4-2013 y ANSI 60.1-2015, al existir normalmente efectos naturales en los aisladores que están expuestos a la intemperie y a altas tensiones, es necesario realizar diferentes ensayos como: descargas parciales, descargas de impulso tipo rayo (BIL) y frecuencia industrial a un aislador tipo pin 56-1, estas pruebas se realizan para determinar el comportamiento y efectos que se generen al estar sometidos en ambientes secos y húmedos.

Siguiendo las normas, se procede a medir las precipitaciones que da el simulador de lluvia, obteniendo una precipitación de  $1 \frac{\text{L}}{\text{min}}$  para una área de  $1 \text{ m}^2$  en el prototipo; con esta precipitación se procede a realizar las pruebas antes mencionadas en ambiente húmedo. El aislador presenta descargas parciales a tensiones mayores de  $50 \text{ kV}$  para este ambiente y en seco a tensiones mayores de  $70 \text{ kV}$ , en la prueba de impulso tipo rayo se obtuvo un Bil promedio de  $108.47 \text{ kV}$  con separación de las esferas de  $7.7 \text{ mm}$  en ambiente seco y en húmedo un Bil promedio de  $106.75 \text{ kV}$  con separación de las esferas de  $8.5 \text{ mm}$ , mientras que en la prueba de frecuencia industrial el aislador cumple con la norma de fabricación,

Los resultados obtenidos en las pruebas del simulador validan la aplicación de la cámara construida en el laboratorio, por lo tanto, es factible someter los diferentes materiales a ensayos en ambientes húmedos en media tensión.

# ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos.....	V
Dedicatoria .....	VI
Resumen.....	VII
ÍNDICE GENERAL .....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS .....	XIV
NOMENCLATURA .....	XVI
1    Introducción.....	3
2    Marco Teórico .....	4
2.1    Simuladores de lluvia en la actualidad.....	4
2.2    Tipos de Simuladores de lluvia para pruebas y ensayos .....	4
2.2.1    Simuladores por aspersión .....	4
2.2.2    Características, ventajas y desventajas del simulador de lluvia .....	5
2.3    Normas de un simulador de lluvia para pruebas eléctricas .....	6
2.3.1    Precipitación .....	7
2.4    Normas para elaboración de precipitación de agua lluvia.....	7
2.4.1    Proceso del agua lluvia según la norma establecida .....	7
2.5    Niveles de tensión que se aplican en los aisladores en el Ecuador .....	8
2.6    Aislador.....	8
2.6.1    Tipo de aisladores según su diseño .....	8
2.6.2    Ensayos eléctricos en aisladores .....	10
2.7    Tipos de contaminación en aisladores eléctricos .....	10
2.7.1    Niveles de contaminación .....	10
2.8    Pruebas de aisladores en ambiente seco y húmedo .....	12
2.8.1    Prueba en seco.....	12
2.8.2    Prueba en húmedo .....	12
2.8.3    Método estándar .....	12
2.9    Impulso estándar de rayo .....	13
2.10    BIL .....	13
2.10.1    BIL estadístico .....	13
2.10.2    BIL convencional.....	13



2.10.3	Prueba para determinar el BIL .....	13
2.10.4	Funcionamiento del circuito.....	15
2.11	Descargas parciales (DPs).....	15
2.11.1	Tipos de descargas parciales .....	15
2.11.2	Prueba para determinar las DP's .....	15
2.11.3	Circuito convencional .....	16
2.11.4	Circuito no convencional .....	17
2.12	Tensión de descarga.....	17
2.12.1	Prueba de tensión de descarga .....	17
3	Diseño del prototipo .....	18
3.1	Condiciones del laboratorio en la actualidad .....	18
3.2	Implementación y diseño de un simulador de lluvia.....	19
3.3	Propuesta y solución de prototipo a diseñar.....	19
3.4	Proceso de circulación .....	20
3.5	Ensamble del prototipo .....	20
3.6	Partes del simulador de lluvia .....	22
3.6.1	Fuente de energía .....	22
3.6.2	Fuente de abastecimiento .....	23
3.6.3	Sistema de bombeo .....	24
3.6.4	Red de distribución .....	25
3.6.5	Estructura de soporte del simulador de lluvia elaborado .....	26
3.6.6	Válvulas de regulación.....	26
3.6.7	Aspersores.....	27
3.6.8	Sistema de recirculación .....	27
3.7	Diseño del soporte del aislador base .....	28
3.8	Sistema de regulación de presión a los aspersores.....	28
3.9	Materiales y costos del prototipo .....	29
3.10	Seguridad y consideraciones técnicas del laboratorio de AT.....	32
4	Análisis de resultados .....	33
4.1	Regulación de la resistividad del agua.....	33
4.1.1	Proceso de obtener la resistividad requerida en el agua según la norma IEEE std 4-201333	
4.1.2	Resultado final una vez mejorada las propiedades de resistividad del agua .....	36
4.2	Medición de precipitación.....	37
4.2.1	Medición de precipitación en el área de la cabina de prueba.....	37

4.2.2	Medición de precipitación en el área del objeto de prueba .....	37
4.3	Pruebas y análisis de resultados .....	38
4.3.1	Corrección atmosférica .....	38
4.4	Prueba del BIL .....	39
4.4.1	Prueba del BIL en ambiente seco.....	40
4.4.2	Prueba del BIL en ambiente húmedo.....	42
4.5	Descargas Parciales.....	45
4.5.1	Descargas parciales en ambiente seco.....	45
4.5.2	Descargas parciales en ambiente húmedo.....	51
4.6	Tensión de descargas .....	57
4.6.1	Tensión de descargas en ambiente seco .....	57
4.6.2	Tensión de descargas en ambiente húmedo .....	59
5	Conclusiones y Recomendaciones.....	61
5.1	Conclusiones.....	61
5.2	Recomendaciones.....	63
6	Bibliografía.....	63
7	Anexos .....	66
7.1	Anexo 1 .....	66
7.1.1	Datasheet de los aspersores COOLNEET PRO .....	66
7.2	Anexo 2 .....	67
7.2.1	Datasheet de las propiedades Técnicas del material grilon.....	67
7.3	Anexo 3 .....	68
7.3.1	Datasheet del aislador pin 56-1 .....	68
7.4	Anexo 4.....	69
7.4.1	DPs en ambiente seco .....	69
7.5	Anexo 5.....	71
7.5.1	DPs en ambiente húmedo.....	71
7.6	Anexo 6.....	74
7.6.1	TD en ambiente seco.....	74
7.7	Anexo 7.....	75
7.7.1	TD en ambiente húmedo .....	75

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Funcionamiento que realiza el simulador de lluvia por aspersión.....	5
Figura 2 Esquema que compone el simulador de lluvia adecuado a la norma IEEE Std4 e IEC 60.1 ...	6
Figura 3 Aisladores rígidos.....	9
Figura 4 Aislador tipo retenida. ....	9
Figura 5 Aislador tipo rollo.....	9
Figura 6 Aislador tipo suspensión.....	10
Figura 7 Aislador tipo pin. ....	10
Figura 8 Conductividad superficial en aisladores en escenarios secos y húmedos.....	12
Figura 9 Impulso estandar de rayo.....	13
Figura 10 Diagrama de impulso de tensión. ....	14
Figura 11 Diagrama de impulso de tensión que posee el laboratorio de la UPS. ....	14
Figura 12 Circuito directo.....	16
Figura 13 Circuito indirecto.....	16
Figura 14 Circuito de calibración.....	17
Figura 15 Área de trabajo del laboratorio de alta tensión de la UPS-Cuenca.....	18
Figura 16 Interior del área de trabajo del laboratorio .....	19
Figura 17 Propuesta de diseño elaborado para el laboratorio de AT, simulado mediante inventor.....	19
Figura 18 Proceso de circulación y recirculación de agua tratada .....	20
Figura 19 Elementos principales para la fabricación del prototipo de diseño establecido.....	21
Figura 20 Fuente de energía (breakers) y ubicación del tablero de control. ....	22
Figura 21 Esquema de control de las bombas de agua.....	23
Figura 22 Tanque cilíndrico plastigama 220 litros. ....	23
Figura 23 Bombas de ½ Hp para la aspersión y drenado de la cabina.....	25
Figura 24 Tuberías y tomas rápidas para la red de distribución de la cabina. ....	25
Figura 25 Diseño de la cabina del simulador de lluvia previo a ensamble (1), después del ensamblado (2).....	26
Figura 26 Válvula 1: desvió o retorno, Válvula 2: presión hacia los aspersores. ....	26
Figura 27 Aspersores Coolnet, utilizados para la pulverización de agua.....	27
Figura 28 Acople del sistema de drenado de la cabina. ....	27
Figura 29 Diseño de soporte del aislador base.....	28

Figura 30 Regulación de la precipitación, mediante la presión de las válvulas.....	29
Figura 31 Medición de conductividad de la muestra, el cual es inversamente proporcional a $384,61 \text{ ohm} \cdot \text{m}$ de resistividad. ....	33
Figura 32 Elementos requeridos para el mejoramiento de la resistividad del agua. ....	34
Figura 33 Peso exacto de NaCl medido en la balanza analítica.....	34
Figura 34 Mezcla del nuevo compuesto en el agitador magnético. ....	35
Figura 35 Lectura de la muestra modificando el parámetro de conductividad. ....	35
Figura 36 Peso exacto de NaCl necesarios para mejorar la resistividad del abastecimiento de agua del laboratorio de AT.....	35
Figura 37 Resultado final de la resistividad una vez modificando la conductividad. ....	36
Figura 38 Temperatura.....	38
Figura 39 Humedad relativa.....	39
Figura 40 Presión. ....	39
Figura 41 Circuito del BIL en ambiente seco. ....	40
Figura 42 Adquisición de datos. ....	41
Figura 43 Impulso tipo rayo a 130kV en ambiente seco.....	42
Figura 44 Impulso tipo rayo a 140kV en ambiente seco.....	42
Figura 45 Circuito del BIL en ambiente húmedo. ....	42
Figura 46 Humectación del pin 56-1.....	43
Figura 47 Impulso tipo rayo a 130kV en ambiente húmedo.....	44
Figura 48 Impulso tipo rayo a 140kV en ambiente húmedo.....	45
Figura 49 Circuito Directo de DP en ambiente seco.....	45
Figura 50 Elementos de la adquisición de datos. ....	46
Figura 51 Captura del osciloscopio a 60kV. ....	47
Figura 52 Corriente; Señal original (azul), señal filtrada (roja).....	47
Figura 53 Determinación de la DP; señal (negra).....	48
Figura 54 Captura del osciloscopio a 85kV.....	48
Figura 55 Corriente; Señal original (azul), señal filtrada (roja).....	49
Figura 56 Determinación de la DP; señal (negra).....	49
Figura 57 Captura del osciloscopio a 91kV.....	50
Figura 58 Corriente; Señal original (azul), señal filtrada (roja).....	50

Figura 59 Determinación de la DP; señal (negra).....	51
Figura 60 Circuito Directo. ....	51
Figura 61 Humectación del pin 56-1.....	52
Figura 62 Captura del osciloscopio a 45kV. ....	53
Figura 63 Corriente; Señal original (azul), señal filtrada (roja).....	53
Figura 64 Determinación de la DP; señal (negra).....	54
Figura 65 Captura del osciloscopio a 60kV. ....	54
Figura 66 Corriente; Señal original (azul), señal filtrada (roja).....	55
Figura 67 Determinación de la DP; señal (negra).....	55
Figura 68 Captura del osciloscopio a 70kV. ....	56
Figura 69 Corriente; Señal original (azul), señal filtrada (roja).....	56
Figura 70 Determinación de la DP; señal (negra).....	57
Figura 71 Circuito de tensión de descarga. ....	57
Figura 72 Elementos de la adquisición de datos. ....	58
Figura 73 Tensión de descarga a 100,1kV en ambiente seco. ....	59
Figura 74 Tensión de descarga en el aislador a 100,1kV en ambiente seco. ....	59
Figura 75 Circuito de tensión de descarga en ambiente húmedo. ....	60
Figura 76 Humectación del pin 56-1.....	60
Figura 77 Tensión de descarga a 60,6kV en ambiente húmedo.....	61
Figura 78 Tensión de descarga en el aislador a 60,6kV en ambiente húmedo. ....	61

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ventajas y desventajas encontradas en un simulador de lluvia.....	6
Tabla 2 Condiciones de precipitación (procedimientos estándar y convencionales).....	7
Tabla 3 Valores promedios de resistividad y conductividad con la que se encuentra el agua en sus diferentes estados líquidos. ....	8
Tabla.4 Valores de voltajes existentes en las redes eléctricas ecuatoriana .....	8
Tabla 5 Relación entre niveles de contaminación y distancia de fuga específica.....	11
Tabla 6 Descripción de cada elemento que conforma la figura 19. ....	22
Tabla 7 Dimensión del soporte aislador base elaborado.....	28
Tabla 8 Material y costo para armado de cabina y circulación de agua.....	29
Tabla 8.1 Costo de base de la cabina en fibra de vidrio.....	30
Tabla 8.2 Costo de fabricación del soporte aislador base .....	30
Tabla 8.3 Costo de fabricación de las paredes de la cabina en vidrio templado .....	31
Tabla 8.4 Costo de material eléctrico.....	31
Tabla 8.5 Costo Total del prototipo diseñado .....	31
Tabla 9 Resultado final de la resistividad del abastecimiento antes y después de haber sido mejorado el parámetro de la conductividad .....	36
Tabla 10 Medición de precipitación en 1 minuto en el área de la cabina, (10 muestras realizadas cada presión). ....	37
Tabla 10.1 Promedio final de precipitación .....	37
Tabla 11 Medición de precipitación en 1 minuto en el área del objeto de prueba, .....	38
Tabla 11.1 Promedio final de precipitación .....	38
Tabla 12 BIL de impulso positivo del aislador pin 56-1 con corrección atmosférica .....	39
Tabla 13 Elementos del circuito del BIL en ambiente seco.....	40
Tabla 14 Elementos de la adquisición de datos. ....	41
Tabla 15 Datos del BIL.....	41
Tabla 16 Elementos del circuito del BIL en ambiente húmedo .....	43
Tabla 17 Datos del BIL en ambiente húmedo.....	44
Tabla 18 Elementos utilizados en ambiente seco para la DP.....	45
Tabla 19 Descripción de adquisición de datos .....	46
Tabla 20 Resumen de la prueba de DP en ambiente seco.....	46

Tabla 21 Elementos utilizados en ambientes húmedos para la DP .....	52
Tabla 22 Resumen de la prueba de DP en ambiente húmedo. ....	52
Tabla 23 Tensiones de falla del aislador pin 56-1 con corrección atmosférica .....	57
Tabla 24 Detalle del circuito de tensión de descarga.....	58
Tabla 25 Descripción de adquisición de datos.....	58
Tabla 26 Tensión de descarga en el aislador pin 56-1 en ambiente seco.....	59
Tabla 27 Detalle del circuito de tensión de descarga.....	60
Tabla 28 Tensión de descarga en el aislador pin 56-1 en ambiente húmedo .....	61

# NOMENCLATURA

**UPS.** – Universidad Politécnica Salesiana.

**AT.** – Alta Tensión.

**BIL.** – Nivel bajo de aislamiento.

**DPs.** – Descargas Parciales.

**TDs.** - Tensión de Descargas.

**AC.** – Corriente Alterna.

**DC.** – Corriente Continua.

**IEC.** – Comisión Electrotécnica Internacional.

**IEEE.** – Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

**ANSI.** – Instituto Nacional Estadounidense de Estándares.



# 1 Introducción

Los simuladores de lluvia aparecen en los años 30 y 40, y su origen se halla en las dificultades metodológicas y conceptuales de las mediciones tomadas con los infiltrometros de cilindro y con los cálculos de infiltración a partir de balances hidrológicos. Desde sus comienzos, la simulación de lluvia se ha visto como una herramienta de trabajo, la cual busca representar una parte importante del ciclo hidrológico de una manera experimental y se construyeron con el fin de acelerar los estudios en diferentes áreas de investigación, el uso de simuladores de lluvia se ha acrecentado por la facilidad que presenta al replicar la lluvia natural, lo cual, lo ha convertido en una herramienta de gran ayuda en áreas de estudio del ciclo hidrológico y en donde se requiera realizar ensayos en estados húmedos.[1]

La importancia de un simulador de lluvia se genera a partir de la necesidad de estudiar determinadas áreas del ciclo climático (condiciones húmedas), en este caso se analiza el estado húmedo bajo condiciones de laboratorio y se analiza de manera cuantitativa la distribución del agua que cae sobre los aisladores eléctricos y así poder identificar las características que se producen al estar en contacto con la humedad y la condición climática.[2]

Siendo un instrumento ideal para pruebas y ensayos, se puede analizar los efectos que se produce al entrar en contacto con la humedad que ocasiona la precipitación de la lluvia en un aislador eléctrico sometido a un alto voltaje; teniendo en cuenta que un simulador de lluvia permite controlar la duración de precipitación de agua, se logra ajustar los diferentes parámetros con la finalidad de cumplir con las normas establecidas para este tipo de ensayos.[3]

Dado que el conocimiento y la investigación en alta tensión para ambientes húmedos es importante para los estudiantes y docentes de ingeniería eléctrica o afines, la UPS sede Cuenca ve la necesidad de implementar el simulador de lluvia para cubrir el déficit que ocasiona al no contar con este equipo.

La construcción de este equipo es necesario para ajustar los ensayos a normas específicas como son la IEC 60-2015 y la IEEE std.4-2013, las cuales indican que se debe tener condiciones de precipitación de agua contralada según el procedimiento de prueba a realizar, obteniendo resultados cercanos a las precipitaciones de lluvia natural.[3]

Los ensayos en humedad permiten determinar descargas parciales, tensiones de descarga, BIL y temas de investigación ajustados a situaciones reales de precipitaciones.[2] Los ensayos en humedad son muy importantes para determinar el tiempo de vida, condición máxima que soporta, condiciones críticas de operación, efectos en condiciones húmedas en aisladores y diferentes tipos de materiales; fortaleciendo los temas de enseñanza, experimentación e investigación de estudiantes y docentes.

## 2 Marco Teórico

Desde sus comienzos la simulación de lluvia se ha visto como una herramienta de trabajo, la cual busca representar una parte importante del ciclo hidrológico de manera experimental y se construyeron con el fin de acelerar los estudios en diferentes áreas de investigación, el uso de simuladores de lluvia se ha acrecentado por la facilidad que presenta al replicar la lluvia natural, siendo una herramienta de gran ayuda en áreas de estudio del ciclo hidrológico en estados húmedos.[1]

### 2.1 Simuladores de lluvia en la actualidad

Fueron desarrollados a partir de la necesidad de estudiar condiciones climáticas que suelen darse, en este caso estados húmedos, bajo condiciones de laboratorio al poder semejar características de lluvia y analizar de una manera cuantitativa la distribución del agua que cae sobre aisladores eléctricos y así poder identificar efectos que se producen al entrar en contacto con la humedad que se somete un aislador, en relación con la condición climática.[2] La Universidad Simón Bolívar de Venezuela cuenta con un prototipo para tales ensayos desde el año de 1985, en donde se ha venido efectuando pruebas de tensión de descarga en aislamientos eléctricos, brindando apoyo limitado a las industrias del sector eléctrico.[2] Cabe referir que este laboratorio se acoge a todas las normas establecidas por entidades de control y regulación, considerados para ensayos en ambientes húmedos, en este caso la precipitación de lluvia es por replica de goteo, debido a la gran dimensión que posee el laboratorio, da la facilidad para elaborar tales ensayos eléctricos a precipitaciones indicadas en la normativa IEEE Std4-2013, vigente hasta la fecha.[2] Otro ejemplo es el del simulador realizado por la Universidad T Singhua Shenzhe en China, mismo que se realiza por el método de simulación de lluvia por aspersión, el cual indica que contiene una pequeña cámara de temperatura y humedad controlable para ejecutar el método de pulverización y llegar en algunos casos a producir neblina, siendo de gran ayuda para hacer ensayos eléctricos en aisladores humedecidos, mediante la pulverización a pequeñas partículas de gota del simulador correspondiente.[4]

### 2.2 Tipos de Simuladores de lluvia para pruebas y ensayos

Los simuladores de lluvia se pueden dividir en dos grupos según la forma de gota: en el primero se encuentra los simuladores de lluvia por goteo y en el segundo los simuladores por aspersión.

- **Simuladores por goteo:** los cuales se caracterizan por reducida complejidad técnica, el sistema forma gotas en las puntas de estructuras empleadas según normas vigentes, el peso de la gota de agua produce la precipitación por gravedad.[5]
- **Simuladores por aspersión:** consiste en un sistema de boquillas pulverizadoras que producen gotas de agua a presión.[1]

#### 2.2.1 Simuladores por aspersión

Por lo general en este tipo de simuladores se desarrollan en espacios que están comprendidos en  $1m^2$ , la precipitación inicial con la que sale el agua es controlada mediante una llave de retorno, como se explica en la **Figura 1**. [5]

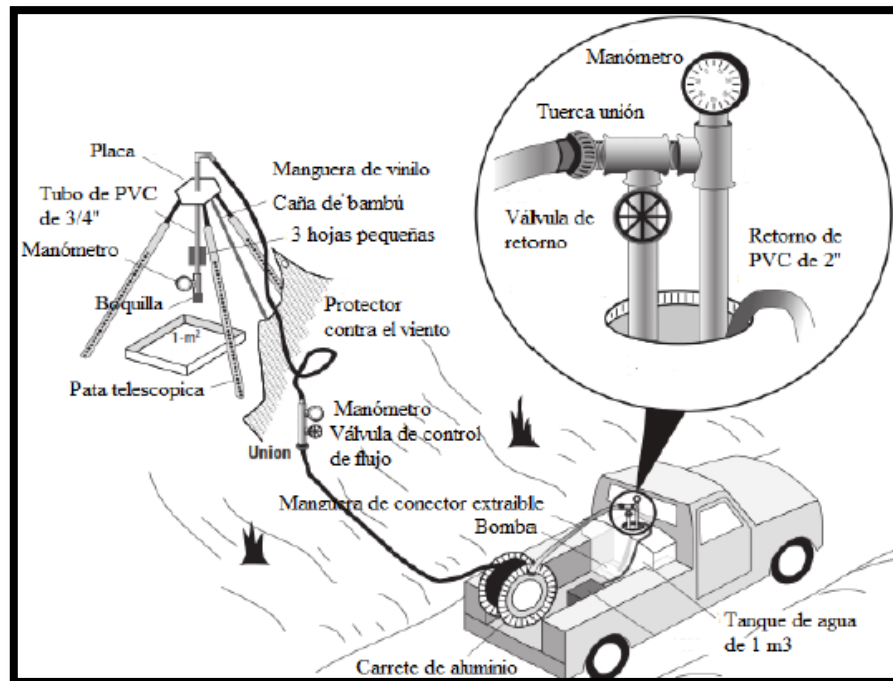


Figura 1. Funcionamiento que realiza el simulador de lluvia por aspersión.[5]

Las diferentes intensidades dependen mucho de la altura que se coloque los aspersores, a través de las válvulas de control de presión se regula la precipitación necesaria.[5]

El instrumento de regular la presión que emplea el método por aspersión es ideal para análisis de efectos que se producen con la humedad, ocasionada por la precipitación de la lluvia sobre un aislador eléctrico, siendo posible controlar la duración de la precipitación, cumpliendo con las normas establecidas para ensayos de estado húmedo.[2]

### 2.2.2 Características, ventajas y desventajas del simulador de lluvia

Para obtener las características de la lluvia es conveniente replicar aspectos fundamentales tales como:

- ✓ Lluvia uniforme y distribución aleatorio del tamaño de gota que se produce.
- ✓ Velocidad de impacto y energía cinética que ocasiona una gota de lluvia natural al caer sobre el objeto de prueba (precipitación de lluvia).
- ✓ Replicar diferentes intensidades y duración de lluvia que se suele ocasionar.[5]

Ventajas	Desventajas
Portabilidad de movilización.	No reproduce al 100% una lluvia natural.
Reproduce lluvia las veces necesarias para pruebas a elaborar.	Replica de lluvia sobre un área determinada.
Facilita la misma replica de lluvia en varios ensayos que se efectúen.	Es afectado por el viento (se suele proteger las paredes con un protector, vidrio o plástico)
Permite controlar variables fundamentales como precipitación, duración.	Las mediciones obtenidas en pruebas en pequeñas áreas no pueden extrapolarse al 100% a un área más extensa debido a que cada área puede provocar un efecto de ambiente diferente.

Tabla 1. Ventajas y desventajas encontradas en un simulador de lluvia.[5]

## 2.3 Normas de un simulador de lluvia para pruebas eléctricas

El método por goteo es utilizado en grandes áreas de trabajo, como se observa en la **Figura 2**, donde se considera como ejemplo una área de  $4m^2$  de espacio, con un objeto de prueba máximo de  $2m^2$ , las gotas replicadas tienen una inclinación de  $45^\circ$ . [3][6]

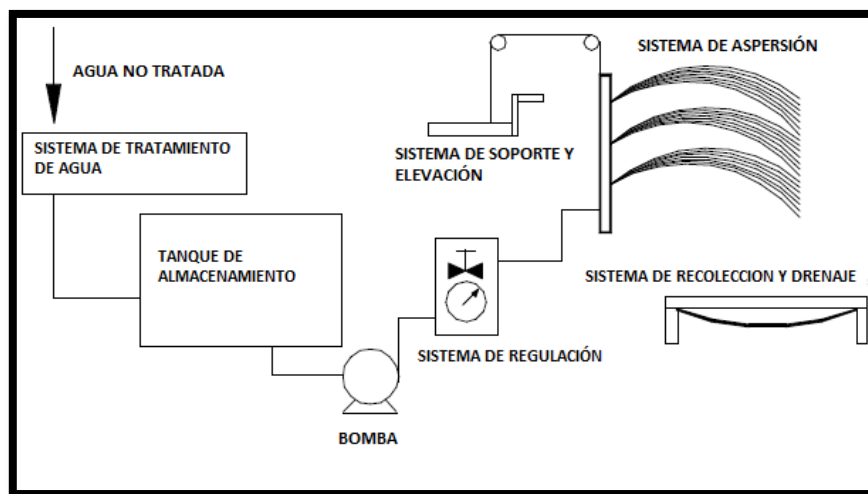


Figura 2. Esquema que compone el simulador de lluvia adecuado a la norma IEEE Std4 e IEC 60.1.[2]

El prototipo a implementar es por aspersión, donde las pruebas se elaboran en  $1m^2$  y la precipitación es regulada a través de válvulas de presión, obteniendo muestras de precipitación de  $1 \frac{l}{m}$ . [3]

### 2.3.1 Precipitación

La precipitación es un fenómeno natural que se produce por parte del ciclo hidrológico del ambiente, en el cual caen partículas de agua al suelo por efecto de la gravedad e inclinación apreciable comúnmente a 45°. La intensidad que cae la lluvia se mide en milímetros por hora, el caudal de la lluvia o intensidad de las precipitaciones puede cambiar rápidamente en condiciones naturales, escogiendo un único valor de intensidad a replicar.[1]

## 2.4 Normas para elaboración de precipitación de agua lluvia

Para elaborar este tipo de ensayos es necesario contar con un líquido que se asemeje a las características de la lluvia, replicando los parámetros que posee el agua los necesarios para elaborar pruebas eléctricas. Siendo la resistividad con la que se encuentra el líquido el aspecto principal para la elaboración de ensayos eléctricos en estado de humedad, la cual debe estar apegada a la norma IEEE Std4, indicando una resistividad de 100 ohm-m, con un margen de error considerable del  $\pm 5\%$ , a una temperatura entre 15° a 25°. Como se detalla en la **Tabla 2**. [3]

Procedimiento	Tasa de precipitación (mm / min)			Parámetros de agua recolectados		Duración de la prueba de resistencia húmeda (s)
	Componente Vertical	Componente Horizontal	Límites para cualquier medición individual	Temperatura (°C)	Resistividad Ohm-m [uS/cm]	
Procedimiento de prueba estándar	1.0 a 2.0	1.0 a 2.0	$\pm 0.5$ promd.	Ambiente $\pm 15$	100 $\pm 15$	60
Práctica europea previa	3 $\pm$ 0.3	-	3 $\pm$ 0.75	Ambiente $\pm 15$	100 $\pm 10$	60
Práctica previa en USA	5 $\pm$ 0.5	-	5 $\pm$ 1.25	Ambiente $\pm 15$	178 $\pm 27$	10

Tabla 2. Condiciones de precipitación (procedimientos estándar y convencionales). [3]

### 2.4.1 Proceso del agua lluvia según la norma establecida

Para llegar al compuesto que exige la norma establecida se utiliza agua destilada, partiendo con agua potable se realiza el proceso de destilación, elaborado a través de máquinas que filtran el agua y la convierten mediante un proceso interno en agua destilada o a su vez recolectando el líquido y dejarlo en reposo por 3 días, una vez realizado este proceso se regula el compuesto de resistividad que posee el agua a lo presentado en la **Tabla 2**, teniendo en cuenta que para obtener el valor de la resistividad es lo inverso de la conductividad y viceversa. Los parámetros que componen el agua en sus diferentes estados se detalla en la **Tabla 3**. [7]

	Conductividad [S/m]	Resistividad [Ohm-m]
Agua Ultra pura	0,0000055	182000,00
Agua Destilada	0,0001	10000,00
Agua Potable	0,005	200,00
Agua de Mar	5,3	0,19
Gran lago salado, USA	15,8	0,06

Tabla 3. Valores promedios de resistividad y conductividad con la que se encuentra el agua en sus diferentes estados líquidos.[7]

## 2.5 Niveles de tensión que se aplican en los aisladores en el Ecuador

Los niveles de tensión que se emplea en las redes ecuatorianas son de baja, media y alta tensión, considerando como ejemplo la red domiciliaria el nivel básico de tensión, la cual comprende entre los 120 V y los 220 V a una frecuencia de 60Hz.[8] Por detrás del voltaje de baja existen redes de media y alta tensión, los cuales van desde la salida de la estación generadora, consecutivamente, a las redes transmisoras y subtransmisoras, hasta llegar a cada punto de consumo, siendo los niveles de tensión los siguientes:

<b>Alta Tensión</b>	40kV- 69 kV- 138 kV- 230 kV
<b>Media Tensión</b>	600 V- 40 kV
<b>Baja Tensión</b>	120 V – 600 V

Tabla 4. Valores de voltajes existentes en las redes eléctricas ecuatoriana.[8]

## 2.6 Aislador

El aislador realiza el trabajo de dar un soporte rígido o flexible a conductores o equipos de manera mecánica, cumpliendo la función de aislar eléctricamente conductores, equipos respecto a tierra y con respecto a otros conductores. Los aisladores son elaborados en porcelana, vidrio y de materiales compuestos, ofreciendo la máxima estabilidad térmica a su tensión más alta.[9][10]

### 2.6.1 Tipo de aisladores según su diseño

**Aisladores rígidos o de soporte:** se caracterizan por soportar grandes esfuerzos de compresión y de flexión, puede ser de una sola pieza o de varias piezas cementadas entre sí en forma de campanas, el material utilizado para la fabricación es la porcelana.[10][11]



Figura 3. Aisladores rígidos [Fuente autor]

**Aisladores tipo retenida:** utilizados para voltajes de media tensión, comprendidos entre los 6.3kV, según la norma ANSI 54.2, respectivamente.[12]

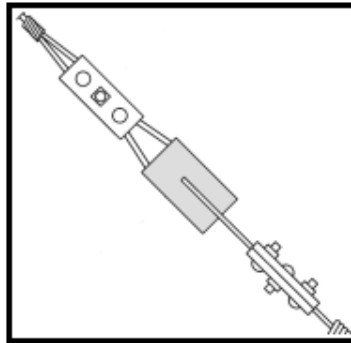


Figura 4 Aislador tipo de retenida.[12]

**Aisladores tipo rollo:** empleados en baja tensión, comprendidos entre los 0, 25kV, encontrando el conductor de neutro, las 3 fases diferentes y el cable de la luz piloto en algunos casos, su fabricación se basa en la norma ANSI 53.2.[12]

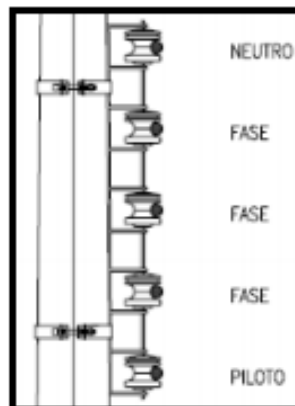


Figura 5 Aislador tipo rollo.[12]

**Aisladores de campana o suspensión:** fabricados en vidrio o porcelana, los cuales pueden formar cadenas de aisladores ya que poseen elementos metálicos para su articulación.[10][11] Según la norma ANSI 52.1 y ANSI 52.2 este tipo de aislador se puede utilizar en niveles de tensión comprendidos desde los 13.2 kV, 33 kV, 34.5 kV, 44 kV.[13]



Figura 6 Aislador tipo suspensión [Fuente autor]

**Aisladores tipo espiga o pin:** generalmente son de porcelana, elaborados en una o dos piezas (pin simple o pin doble), se utiliza en las líneas de distribución en estructuras tangentes como angulares según la norma ANSI 56.3 .[10][11] Los cuales son empleados para tensiones desde los 22kV, 33kV, 34.5 kV y hasta los 63 kV.[13]



Figura 7 Aislador tipo pin [Fuente Autor]

## 2.6.2 Ensayos eléctricos en aisladores

Se realizan para verificar la capacidad del aislador, además de cumplir el trabajo de aislar la línea de tierra durante su funcionamiento normal, en el que está sometido a una tensión senoidal de frecuencia industrial y ante sobretensiones temporarias. Este ensayo consiste en someter al elemento durante un minuto a una tensión senoidal de 60 Hz, cuyo valor eficaz depende de la tensión nominal del aislador y viene especificado en la norma según el aislador a utilizar. teniendo en consideración las pérdidas óhmicas y dieléctricas durante toda la vida de servicio, considerando la norma ANSI C29.1 para tales ensayos.[14]

## 2.7 Tipos de contaminación en aisladores eléctricos

La contaminación en aisladores se produce por acumulación de diferentes partículas, dependiendo de la zona climática en la que se encuentren sometidos (lluvia, aire, polución, nieve, hielo, etc.). La cual se clasifican en inorgánica, orgánica y acuosa.[15][16]

- **Inorgánica:** en este grupo se encuentra los gases de combustión o humo, vapores químicos, polvo, ceniza, polvo de industrias etc.[15]
- **Orgánica:** se tienen al polen, bacterias, gérmenes, hongos etc.[15]
- **Acuosa:** se tiene todo referido con el agua como: lluvia, vapor, neblina, rocío, humedad etc.[15]

### 2.7.1 Niveles de contaminación

En la **Tabla 5** se detalla las distancias de fuga mínima según los niveles de contaminación en el ambiente.



Nivel de contaminación	Ejemplos de ambientes típicos	Distancia de fuga mínima específica mm / kV
<b>Ligero</b>	<p>Zonas sin industrias y con baja densidad de casas equipadas con plantas de calefacción</p> <p>Áreas con baja densidad de industrias o casas pero sometidas a frecuentes vientos y / o lluvias</p> <p>Áreas agrícolas (a)</p> <p>Áreas montañosas</p> <p>Todas estas áreas estarán situadas a una distancia mínima de 10 km a 20 km del mar y no estarán expuestas a los vientos directamente del mar. (b)</p>	27,7
<b>Medio</b>	<p>Áreas con industrias que no producen humo particularmente contaminante y / o con densidad promedio de casas equipadas con plantas de calefacción</p> <p>Áreas con alta densidad de casas y / o industrias pero sometidas a frecuentes vientos y / o lluvias</p> <p>Áreas expuestas al viento del mar pero no demasiado cerca de las costas (al menos a varios kilómetros de distancia) (b)</p>	34,6
<b>Espeso</b>	<p>Áreas con alta densidad de industrias y suburbios de grandes ciudades con alta densidad de plantas de calefacción que producen contaminación</p> <p>Zonas cercanas al mar o, en cualquier caso, expuestas a vientos relativamente fuertes del mar (b)</p>	43,3
<b>Muy espeso</b>	<p>Áreas generalmente de extensión moderada, sometidas a polvos conductores y al humo industrial que producen depósitos conductivos particularmente espesos</p> <p>Áreas generalmente de extensión moderada, muy cerca de la costa y expuestas al rocío de mar o a los vientos muy fuertes y contaminantes del mar</p> <p>Áreas desérticas, caracterizadas por la falta de lluvia durante largos períodos de tiempo, expuestas a fuertes vientos que transportan arena y sal, y sometidas a condensación regular</p>	53,7
<p><b>(a)</b> El uso de fertilizantes por pulverización o la quema de residuos de cultivos puede conducir a un mayor nivel de contaminación debido a la dispersión por el viento</p> <p><b>(b)</b> Las distancias desde la costa dependen de la topografía del área costera y de las condiciones extremas del viento.</p>		

Tabla 5. Relación entre niveles de contaminación y distancia de fuga específica. [17]

## 2.8 Pruebas de aisladores en ambiente seco y húmedo

### 2.8.1 Prueba en seco

Esta prueba se realiza a temperatura ambiente, el objeto de ensayo debe estar seco y limpio, la aplicación de tensión debe ser según la prueba a realizar.[3][6]

### 2.8.2 Prueba en húmedo

En los aisladores que están sometidos a condiciones de contaminación ambiental el efecto de la humedad es aún mayor, debido a que la capa de contaminación absorbe humedad y con ello aumenta considerablemente la conductividad superficial, por lo tanto, el aumento de la corriente superficial es apreciable en el comportamiento de los aisladores sometidos a tales pruebas.[16]

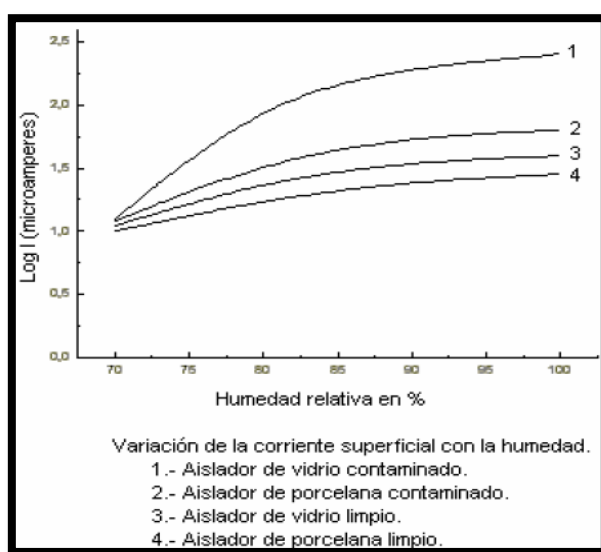


Figura 8. Conductividad superficial en los aisladores en escenarios secos y húmedos.[16]

En esta prueba se pretende ver el funcionamiento o reacción de un objeto en condiciones similares de la lluvia, para lo cual existe 3 métodos diferentes como se observa en la **Tabla 2**.

Siendo el método estándar el recomendado para ensayos de todos los tipos de tensiones de prueba y todos los objetos diseñados para la intemperie.[3]

### 2.8.3 Método estándar

El objeto debe estar totalmente limpio sin grasas u otro material contaminante, lavando de tal forma con un detergente neutro y ser enjuagado con abundante agua, luego se debe humedecer el objeto previamente durante 15 minutos con agua limpia. Se procede a rociar el objeto con agua, la misma que contiene resistividad y temperatura descrita en la **Tabla 2**, la cual puede ser medido con una muestra recogida del depósito de agua antes que toque el objeto de ensayo, dicho rociado debe caer en forma de gotas evitando la nubosidad y la niebla, el rociado debe ser aproximadamente igual en intensidad de forma horizontal y vertical. El procedimiento de las diferentes pruebas a realizar en húmedo deber ser el mismo

que el especificado para pruebas en seco, al menos que se especifique lo contrario por la norma del objeto de prueba.[3][6]

## 2.9 Impulso estándar de rayo

Es conocido como el impulso 1.2/50, debido a que asciende a una tensión de cresta en un tiempo frontal de  $1.2 \mu\text{s}$  y cae a  $0.5 \mu\text{s}$  de la tensión de cresta, en un tiempo de  $50 \mu\text{s}$  conocida como tiempo de cola, como se puede observar en la **Figura 19**. [18][19]

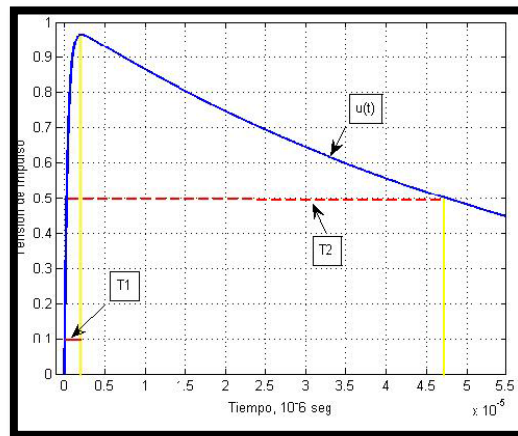


Figura 9. Impulso estándar de rayo.[19]

## 2.10 BIL

Es el nivel básico de aislamiento (BIL), indica la resistencia máxima del aislador frente a un impulso de tensión tipo cresta de rayo estándar.[18][20]

### 2.10.1 BIL estadístico

El aislante presenta un 90% de probabilidad de resistencia frente a los valores de cresta de un impulso de rayo en condiciones específicas, se aplica especialmente al aislante autoregenerable.[18]

### 2.10.2 BIL convencional

Cuando se aplica varias veces el valor de cresta de un impulso tipo rayo a un aislante este no debe presentar una descarga disruptiva, por lo cual es aplicable especialmente al aislante no autoregenerable.[18]

### 2.10.3 Prueba para determinar el BIL

Se determina mediante la prueba de impulso de tensión, esta consiste en aplicar un impulso tipo rayo al aislador mediante el circuito que se muestra en la **Figura 10**, donde el objeto a prueba se coloca en paralelo a  $Cb$ , definiendo el número de muestras estadísticas ya que el impulso de rayo es aleatorio y genera una función de Gauss, estas muestras se debe tomar en impulsos positivos y negativos.[19][20]

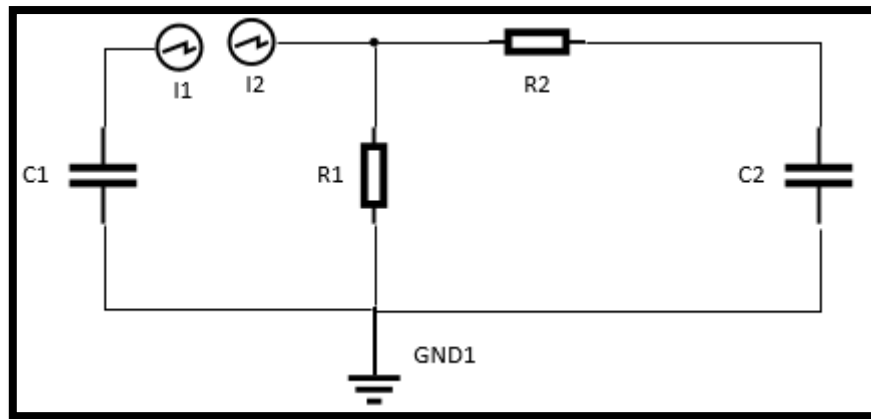


Figura 10. Diagrama de Impulso de tensión.[4]

Donde:

### C1: Condensador de Impulso

**C2:** Condensador de carga

**R1:** resistencia de cola

**R2:** Resistencia de frente

**$L_1 L_2$ : Explosor de esferas**

En la **figura 11**, se puede observar un esquema más detallado para la generación del impulso de tensión, para el laboratorio que posea la UPS.

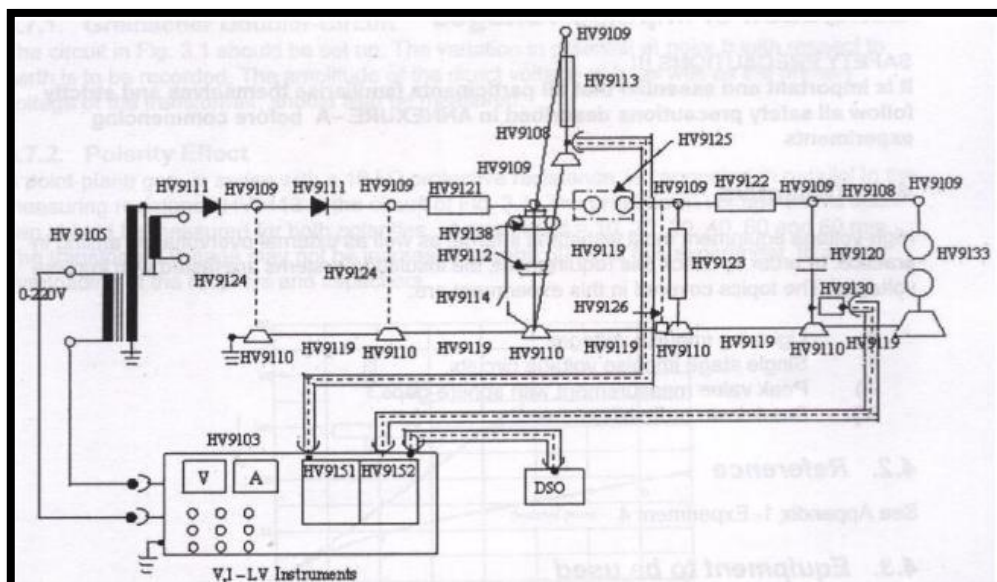


Figura 11. Diagrama de Impulso de tensión que posee el laboratorio de la UPS.[21]

#### **2.10.4 Funcionamiento del circuito**

El funcionamiento comprende en cargar al capacitor  $C1$  mediante una fuente CD a un nivel determinado de tensión, luego se aísla la fuente de CD. La descarga de  $C1$  depende de la separación de  $l_1$   $l_2$  ya que funcionan como interruptor, al descargar pasa por  $R2$  la cual controla el tiempo de frente de onda de impulso cargando el capacitor  $C2$ , cuando los dos capacitores alcanzan la misma tensión estos comienzan a cargarse por medio de  $R1$ , siendo  $R1$  el responsable del tiempo de cola, el objeto a prueba debe estar en paralelo a  $C2$  para ser aplicado el impulso tipo rayo.[19][20]

### **2.11 Descargas parciales (DPs)**

Es un fenómeno transitorio de ionización, que se produce por alguna pequeña imperfección del aislamiento sea este líquido o sólido, originando un exceso de campo eléctrico o estrés, el cual rompe la rigidez dieléctrica y genera pequeños impulsos de corriente en tiempos de micro y nanos segundos, llevando a la descomposición del dieléctrico. Las causas más comunes que dan origen a las DP son: impurezas, grietas, burbujas, huecos etc.[22][23][24]

#### **2.11.1 Tipos de descargas parciales**

Se clasifican según la zona de la DP, estas pueden ser: Descargas superficiales, descargas de corona, descargas internas.[22][23][24]

##### **2.11.1.1 Descargas superficiales**

La DP ocurre entre el aislante y el aire, esto se da por la contaminación y la humedad que puede existir en el medio ambiente, haciendo aparecer campos eléctricos tangenciales provocando la DP, a la vez causando daño en el aislante como grietas y flameo del aislador.[22][23][24]

##### **2.11.1.2 Descargas de corona**

Produciéndose dentro de gases dieléctricos líquidos, conductores de alta tensión que están en contaminación o lluvia, ocasionando un fuerte campo eléctrico, el cual produce la DP en forma de corona.[22][23][24]

##### **2.11.1.3 Descargas internas**

La descarga ocurre en aislantes sólidos y líquidos que poseen una baja rigidez dieléctrica, causada por huecos, fisuras, burbujas, fallas constructivas, etc., acumulando campos eléctricos que producen la DP. Este tipo de descarga es la más dañina y difícil de diagnosticar, por lo que no presenta señales visibles o auditivas, llegando a la explosión o flameo del aislante.[22][23][24]

#### **2.11.2 Prueba para determinar las DPs**

Se necesita un circuito que tenga un camino de baja impedancia para el pulso de corriente y poder ubicar correctamente los diferentes sensores y transductores para la medición. Para ello se tiene dos métodos el convencional de la norma IEC 60270, 200 y el no convencional de la norma IEC 62478, siendo el convencional el más utilizado.[23]

### 2.11.3 Circuito convencional

La norma IEC 60270 indica dos circuitos para determinar las descargas parciales en aislantes, el directo y el indirecto, la diferencia de estos circuitos está en la impedancia de medida con respecto al objeto de ensayo, como se puede observar en la **Figura 12 y Figura 13**. En el circuito directo la impedancia de medida  $Z_m$  está en serie con el objeto de prueba, mientras que en el indirecto esta serie con el condensador de acoplamiento  $C_k$ . [9]

Las partes de los circuitos son:

**AC:** Fuente de Alta tensión sin interferencias

**$Z_n$ :** Impedancia de filtro, anula las perturbaciones hacia la fuente AC

**$C_a$ :** Objeto de ensayo, se comporta como un capacitor.

**$C_k$ :** Condensador de acoplamiento, facilita el paso de los impulsos de corriente de alta frecuencia.

**$Z_m$ :** Impedancia de medida, fluye el pulso de DP.

**$m_1$ :** Instrumento de medida de DP.

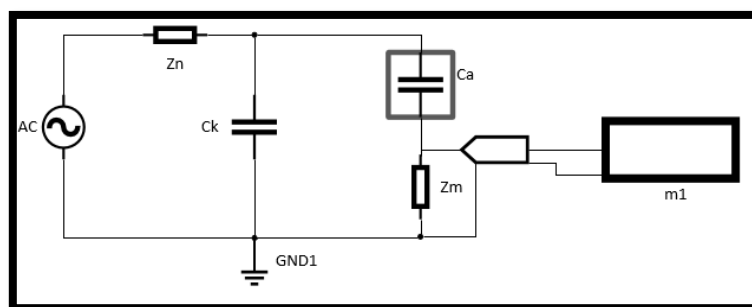


Figura 12.

Circuito directo.[9]

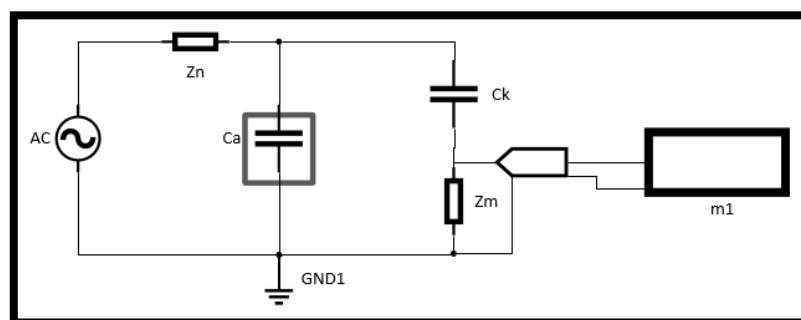


Figura 13. Circuito indirecto.[9]

Se puede utilizar los dos circuitos, sin embargo, el circuito recomendado es el indirecto, ya que en caso de falla del objeto de prueba la impedancia de medida no queda expuesta a la

tensión aplicada, teniendo una seguridad en los equipos de medición y de las personas.[9][23][24]

Los circuitos se basan en la integración de pulsos de corriente, la cual se puede resolver en el dominio de la frecuencia y del tiempo, dando como resultado un valor llamado carga aparente, esta carga es similar al pulso de corriente que provoca la DP.[9][22]

Antes de efectuar la prueba se debe hacer el proceso de calibración de escala, el cual es inyectar un valor de carga eléctrica determinada a la resistencia de medición  $R_m$ , como se observa en la **Figura 14**, el valor obtenido es el resultado entre  $U_o * C_o$ , esto proporciona condiciones apropiadas para la detección de descargas parciales dentro del objeto de prueba, a una tensión de prueba de DP especificada.[9][22][24]

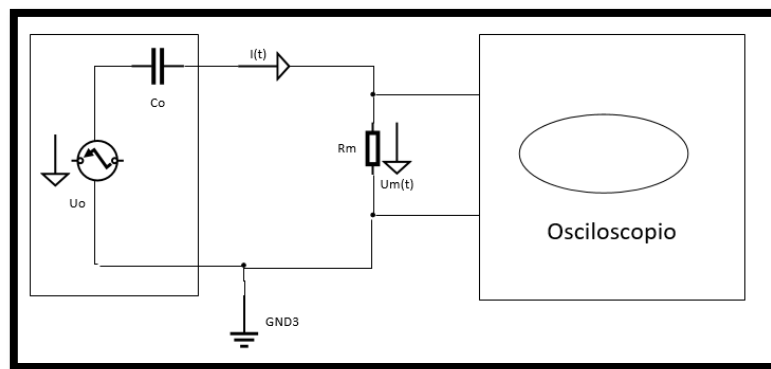


Figura 14.

calibración.[9]

Circuito de

Establecida la debida calibración se procede armar el circuito requerido, donde el funcionamiento es aumentar lentamente la tensión de la fuente AC hasta que aparezcan DP en el objeto de prueba.

### 2.11.4 Circuito no convencional

Este método se especifica en la norma IEC 62478, que consiste en la recopilación de las diferentes técnicas para determinar las DP de forma no convencional, poseen tres rangos de medida: alta frecuencia HF, muy alta frecuencia VHF, y ultra alta frecuencia UHF, como rango es utilizado según el objeto a prueba. Este método se basa en el análisis del dominio del tiempo, algunos métodos son detección óptica, técnicas de detección EMI etc.[15][22][23]

## 2.12 Tensión de descarga

También conocida como tensión de descarga a frecuencia industrial, es el valor RMS del voltaje de baja frecuencia, que produce una descarga disruptiva bajo condiciones específicas en un aislador, a lo cual se considera baja frecuencia entre 15 y 100 hertzios.[5]

### 2.12.1 Prueba de tensión de descarga

En la norma ANSI/NEMA C29.1 indica que se puede subir el voltaje rápidamente hasta un 75% del valor de la descarga que se espera, continuando lentamente hasta que se produzca la

descarga con un tiempo no menor de 5s ni mayor de 30s. Se repite el proceso mínimo 5 veces para sacar una media aritmética, las repeticiones tienen que ser en un tiempo de entre 15 segundos a 5 minutos.[25]

## 3 Diseño del prototipo

### 3.1 Condiciones del laboratorio en la actualidad

El laboratorio de alta tensión de la UPS-Cuenca en la actualidad cuenta con un área de trabajo considerable para pruebas eléctricas, el cual posee un generador clase Marx para pruebas en AC y DC, con un voltaje RMS de 100 kV, comandado a través de un banco de trabajo para pruebas controladas, posee una pértiga de seguridad para descargas manuales cada vez que se requiera entrar al área de trabajo a manipular el circuito en pruebas elaboradas.

Por seguridad y protección se ha implementado una jaula de Faraday de 5,28x4,20m alrededor del área de trabajo, en su interior costa con una superficie de placa metálica plana de 4x2m, siendo un elemento de gran importancia, debido a que es el área en donde se asentarán los equipos de trabajo, además de servir como placa conductora; en la **Figura 15 y 16** se observa los diferentes equipos que se encuentran en el área de trabajo. Todas las protecciones y equipos de trabajo están conectados y puestos a tierra por seguridad.



Figura 15. Área de trabajo del laboratorio de alta tensión de la UPS-Cuenca. [Fuente autor]



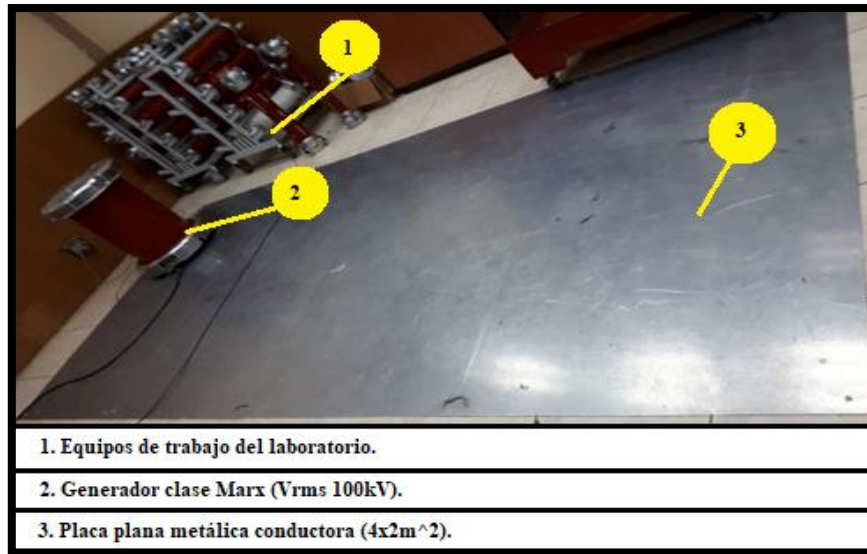


Figura 16. Interior del área de trabajo del laboratorio. [Fuente autor]

### 3.2 Implementación y diseño de un simulador de lluvia

Considerando las normas y parámetros que conlleva el implementar un simulador de lluvia, se formula una propuesta de diseño a través de un prototipo, para lo cual se considera el espacio físico que cuenta el laboratorio de alta tensión de la UPS, además del tipo de simulador de lluvia, en caso se pretende replicar las condiciones de precipitación por aspersiones sobre un objeto o espécimen de prueba para estudio.

### 3.3 Propuesta y solución de prototipo a diseñar

Para la propuesta de diseño y construcción de un simulador de lluvia, se considera la metodología de la **Figura 17**, utilizada para realizar las pruebas eléctricas en ambiente húmedo, en este caso el objeto de prueba seleccionado es el aislador eléctrico (tipo pin 56-1).

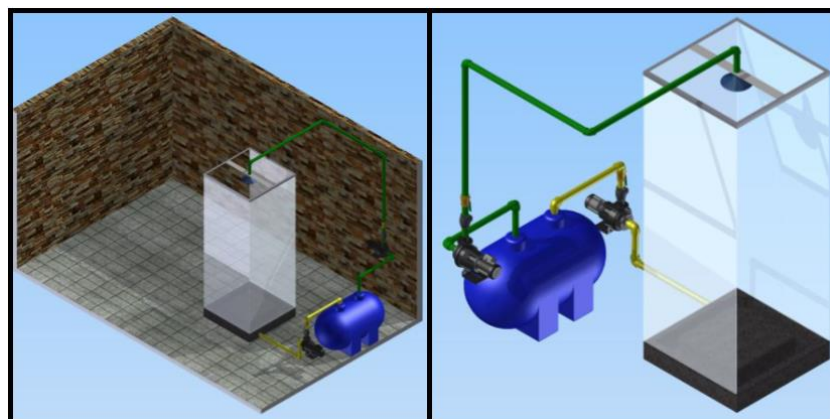
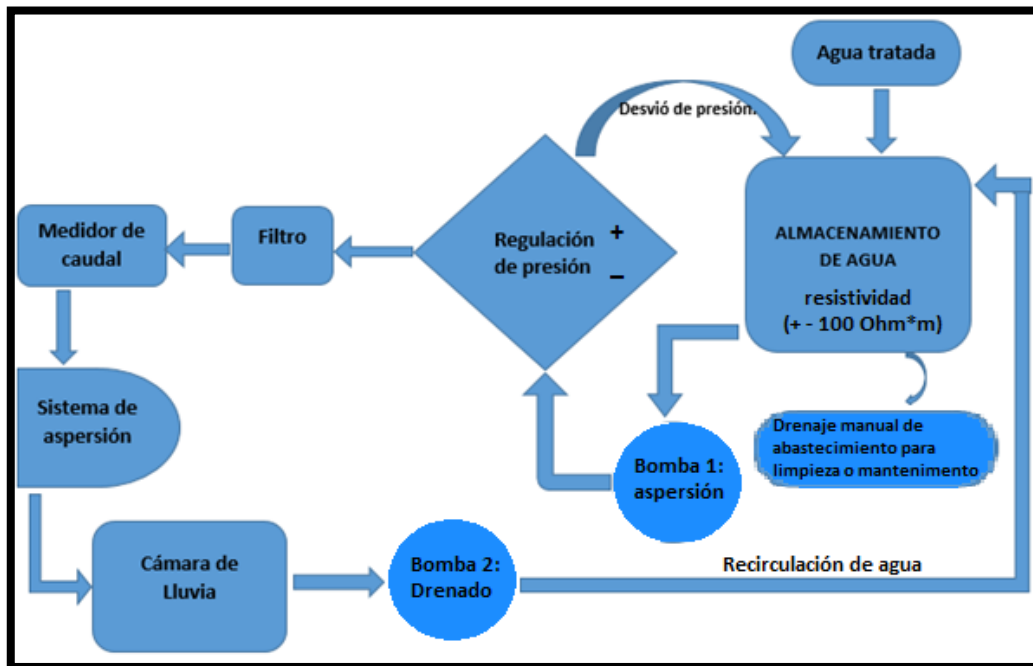


Figura 17. Propuesta de diseño elaborado para el laboratorio de AT, simulado mediante inventor [Fuente autor].

### 3.4 Proceso de circulación

Se elabora mediante el proceso de flujo y reflujo de agua ajustada para pruebas eléctricas, el cual cumple con las normas ANSI e IEEE std4, donde el agua que circula para la aspersión es recolectada y drenada al mismo lugar de almacenamiento, en la **Figura 18** se presenta el ciclo cerrado implementado en el diseño propuesto.



*Figura. 18 proceso de circulación y recirculación de agua tratada. [Fuente autor]*

### 3.5 Ensamble del prototipo

Los implementos para la elaboración del prototipo se observan en la **Figura 19**, siendo elementos básicos utilizados para llevar el agua del depósito hacia los aspersores, considerando que este proceso pasa por una etapa previa de regulación de presión.

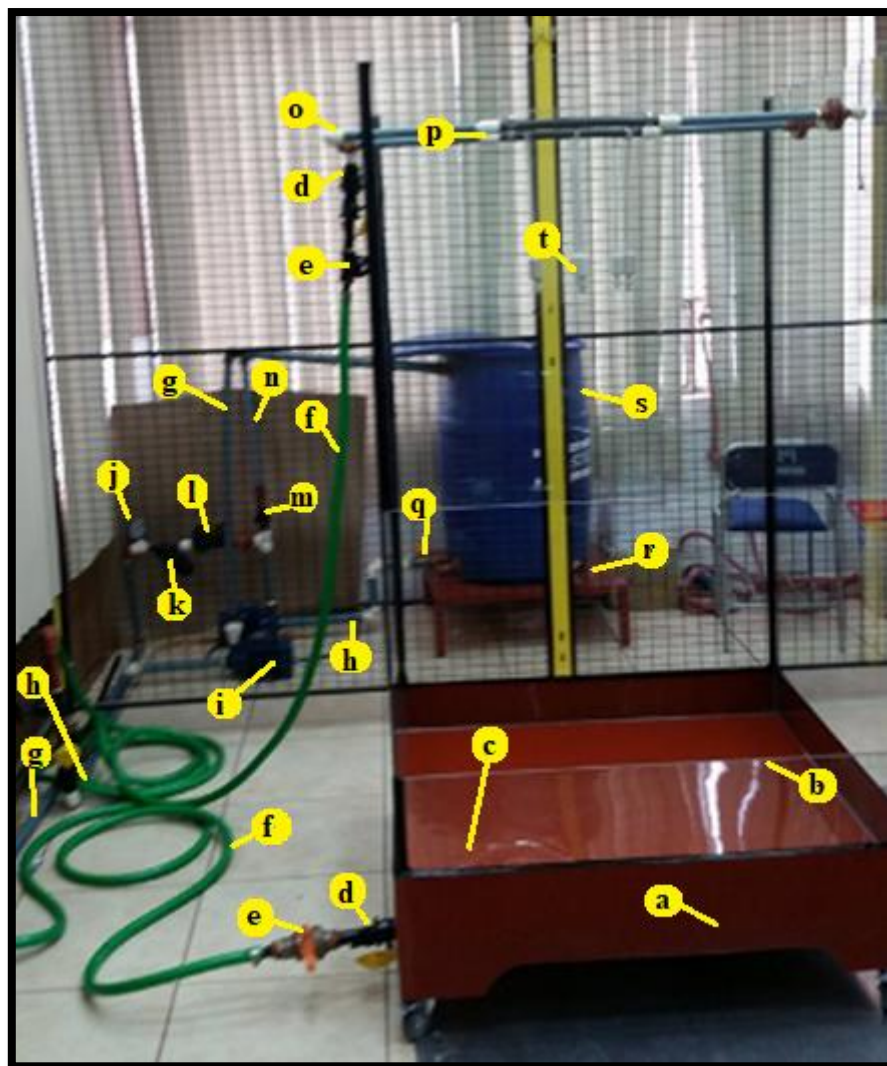


Figura 19.

principales para la fabricación del prototipo de diseño establecido. [Fuente autor]

Elementos

En la **Tabla 6** se presenta de manera detalla cada uno de componentes utilizados en el prototipo.

Objeto	Descripción del elemento
a	Base de cabina en fibra de vidrio de 5mm de espesor, de 1m <sup>2</sup> x 15cm de altura.
b	Cabina en vidrio templado de 1,60m de alto x 1m <sup>2</sup> de ancho.
c	Drenaje 3/4" para agua acumulada en la cabina.
d	Tomas rápidas 3/4" para acoples y desacoples de las tuberías flexibles (4 en total).
e	Llaves de paso 3/4", impide derrames de agua al acoplar las tuberías flexibles (4 en total).
f	Tuberías flexibles o mangueras de 3/4", (2 en total).
g	Tubería PVC rígida 3/4" transporta el agua desde el abastecimiento a los aspersores.
h	Tubería PVC rígida 3/4" recircula el agua acumulada en la cabina al abastecimiento.
i	Bombas Pedrollo de 1/2 Hp, para aspersión y drenado (2 en total).
j	Manómetro para visualización de presión deseada a través de las válvulas de regulación
k	Filtro de agua, evita impurezas al momento de circular el agua hacia los aspersores.
l	Caudalímetro, si no existiese la recirculación se puede tomar datos del caudal ocupado
m	Válvulas de regulación para ajustar la presión requerida para la precipitación deseada.
n	Tubería PVC rígida 3/4" para el desvío de agua no requerida al abastecimiento.
o	Codos de reducción de 3/4" a 1/2" para ingreso de tuberías a la cabina.
p	Tuberías y acoples de 1/2" previo a la instalación de los aspersores.
q	Llave de paso 3/4", para bloquear la circulación de agua para mantenimiento de bombas.
r	Llave de paso 3/4", para drenar el agua para mantenimiento o limpieza del abastecimiento.
s	Abastecimiento de agua tratada para pruebas, capacidad máxima 220 Litros.
t	Aspersores de agua, simulan la precipitación de agua por aspersión requerida (6 en total).

Tabla 6. Descripción de cada elemento que conforma la figura 19. [Fuente autor]

## 3.6 Partes del simulador de lluvia

### 3.6.1 Fuente de energía

La red común de 110V que posee el laboratorio es la encargada de suministrar la alimentación a las bombas de aspersión y drenado, el cual es comandado mediante un tablero de control para encendido de cada una de las bombas.



Figura 20. Fuente de energía (breakers) y ubicación del tablero de control. [Fuente autor]

### 3.6.1.1 Tablero de control

El diseño de control de las bombas de agua se realiza mediante contactores y luces de señalización, como se observa en la **Figura 21**, teniendo en cuenta la seguridad y comodidad para el operario.

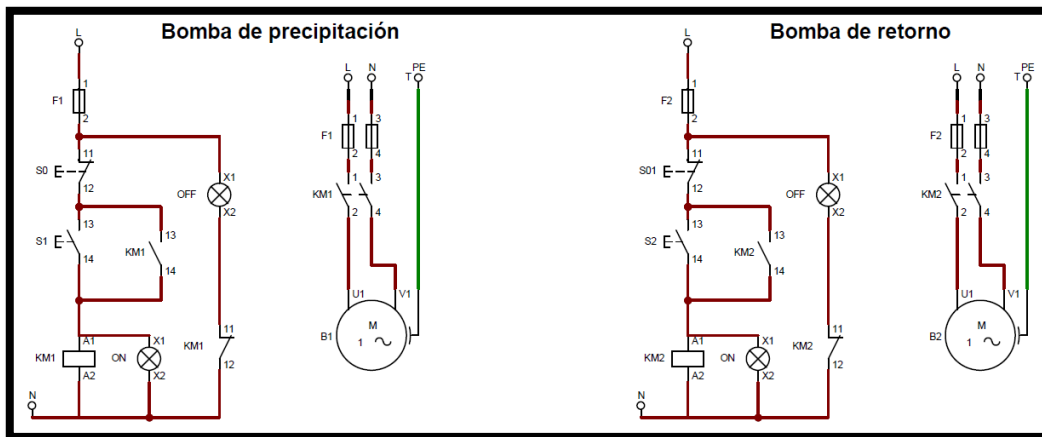


Figura 21. Esquema de control de las bombas de agua. [Fuente autor]

### Funcionamiento

El circuito elaborado es utilizado para encender y apagar una bomba cuando se requiera, teniendo como botón de encendido a  $S_1$  con su respectiva señalización lumínica *ON*, y para el apagado el botón  $S_0$  con su señal lumínica *OFF*. Este funcionamiento rige para la bomba de precipitación como la de retorno.

### 3.6.2 Fuente de abastecimiento

Cuenta con un tanque circular tipo plastigama de paredes lisas, para evitar proliferación de bacterias, la cual tiene una capacidad máxima de almacenamiento de 220 litros, el mismo que se llenará con la cantidad requerida.



Figura 22. Tanque cilíndrico plastigama 220 litros [Fuente autor]

### 3.6.3 Sistema de bombeo

#### 3.6.3.1 Calculo de la bomba de agua para la precipitación

Partiendo del caudal que se proyecta y rigiéndose según la norma IEEE std 4, se debe tener  $5 \frac{mm}{min}$  en  $1m^2$ , tomando el valor más alto de la norma se obtiene el siguiente resultado:

Donde:

$$Q = \text{Caudal}$$

$$V = 5 \frac{mm}{min}$$

$$A = 1m^2$$

$$Q = V * A$$

$$Q = 5 \frac{mm}{min} * 1m^2$$

$$Q = 5 \frac{mm}{min} * \frac{1m}{1000mm} * 1m^2$$

$$Q = 0.005 \frac{m^3}{min} * \frac{1min}{60sg}$$

$$Q = 8.33 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

Obtenido el caudal se procede al cálculo de la potencia de la bomba mediante la siguiente formula:

$$Pot = \varphi * g * h * Q$$

Donde

$$Pot = \text{Potencia}$$

$$\varphi = 996.59 \frac{kg}{m^3} \rightarrow \text{densidad del agua a } 25^\circ C$$

$$g = 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$h = 3m \rightarrow \text{Altura maxima del laboratorio AT}$$

$$Q = 8.33 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

$$Pot = 996.59 \frac{kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * 3m * 8.33 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

$$Pot = 2.44 \frac{kg * m^2}{s^3}$$

$$Pot = 2.44 W$$



Dando la potencia de la bomba es 2.44W, siendo de menor capacidad para conseguir en el mercado local, optando por la bomba que más se ajusta al requerimiento es una de  $\frac{1}{2} hp$ , ajustándose a los parámetros establecidos.

### 3.6.3.2 Bomba para el drenado de la cabina de prueba

Teniendo en cuenta que la precipitación no es elevada, se determina una bomba de  $\frac{1}{2} hp$  para el sistema del drenaje.

Se emplea para todo el prototipo 2 bombas pedrollo de  $\frac{1}{2} hp$ , para impulsar presión de líquido hacia los aspersores y del drenado de agua que se acumula en la cabina.

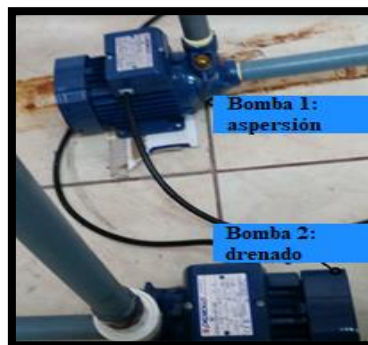


Figura 23. Bombas de  $\frac{1}{2} Hp$  para la aspersión y drenado de la cabina. [Fuente autor]

### 3.6.4 Red de distribución

Consta de implementos necesarios en el proceso de aspersión y drenado de la cabina de lluvia, principalmente para regular la presión y obtener la precipitación adecuada al momento de realizar los ensayos como se observa en la **Tabla 6**.

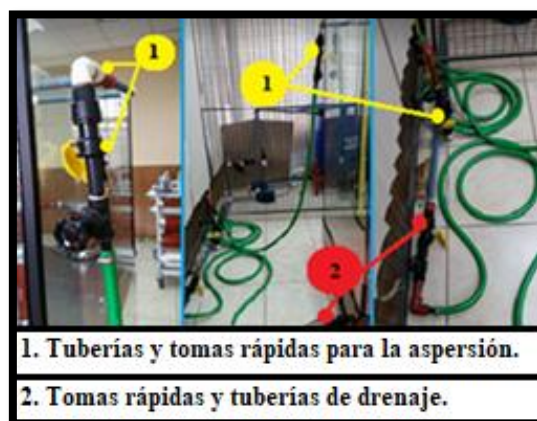


Figura 24. Tuberías y tomas rápidas para la red de distribución de la cabina. [Fuente autor]

### 3.6.5 Estructura de soporte del simulador de lluvia elaborado

Elaborado en una base de material aislante de fibra de vidrio de  $1m^2$ , la cual posee paredes de vidrio templado evitando así pequeñas brisas que pueden existir en el ambiente, cuenta con perforaciones circulares de 26 mm en la parte superior para la colocación de tuberías y de los aspersores suspendidos, además se incorpora unas ruedas de goma para la movilidad en el laboratorio, para su elaboración se utiliza los criterios de las normas IEEE Std 4 e IEC 60.1.



Figura 25. Diseño de la cabina del simulador de lluvia; previo a ensamblaje (1), después del ensamblado (2). [Fuente autor]

### 3.6.6 Válvulas de regulación

Permiten controlar el paso de agua proveniente del abastecimiento a los aspersores de la cabina, evitando derrames e infiltraciones al inicio de la red de distribución, además de regular la presión necesaria para obtener la precipitación requerida.



Figura 26. Válvula 1: desvió o retorno, Válvula 2: presión hacia los aspersores [Fuente autor]



### 3.6.7 Aspersores

Después de analizar variables de los aspersores existentes en el mercado, se opta por trabajar con los aspersores de la marca Coolnet, los cuales tienen una precipitación 7.5 l/h de aspersión cada uno, requirieron 6 aspersores para este prototipo, permitiendo pulverizar el agua a través de la presión de las válvulas de desvío y de paso, en la **Figura 27** se presenta los aspersores implementados en la cabina, mientras que en el **Anexo 1** se detalla las características del aspersor.



Figura 27. Aspersores Coolnet, utilizados para la pulverización de agua. [Fuente autor]

### 3.6.8 Sistema de recirculación

Se instala una tubería en un extremo de mayor desnivel de la cabina, el cual es utilizado para que el agua drene a través de un acople y el líquido acumulado es transportado al depósito, permitiendo que no exista pérdida ni derrame en el área de trabajo.

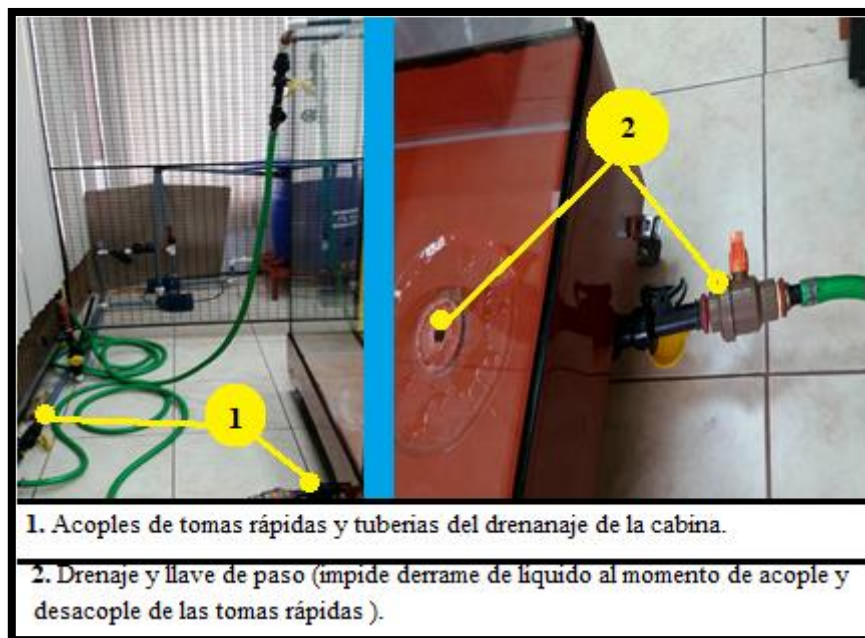


Figura 28. Acople del sistema de drenado de la cabina. [Fuente autor]

### 3.7 Diseño del soporte del aislador base

Los soportes de aislador base para pruebas que tiene el laboratorio son de medida estándar y por lo tanto resulta inconveniente el ingreso dentro de la cabina, siendo necesario la elaboración de un soporte acorde a la medida que posee la base del diseño, elaborando un soporte de 300 mm.

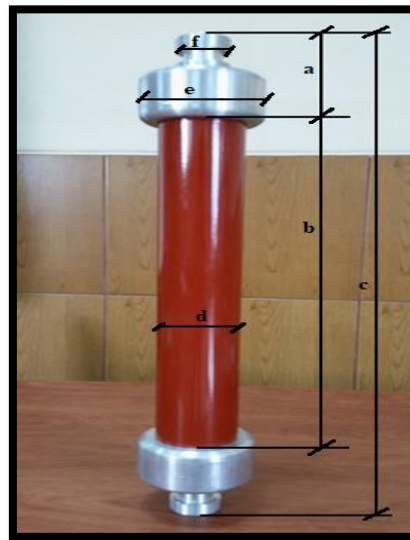


Figura 29. Diseño del soporte del aislador base. [Fuente autor]

El soporte del aislador base es una réplica de menor tamaño, elaborado para trabajar en conjunto con la cabina de lluvia, construido en material aislante grilon con una resistencia dieléctrica de 23 kV/mm (color café), sus extremos de contacto son fabricados en material conductor de aluminio (color gris), acoplándose al mismo nivel de los demás equipos de trabajo del laboratorio, en la **Tabla 7** se detalla las dimensiones del aislador replicado. En el **Anexo 2** se expresa las características técnicas del material grilon. [26]

Objeto	Dimensión (mm)
a	75
b	300
c	450
d	$\varnothing = 50$
e	$\varnothing = 80$
f	$\varnothing = 35$

Tabla 7. Dimensión del soporte aislador base elaborado. [Fuente autor]

### 3.8 Sistema de regulación de presión a los aspersores

Maniobrando las válvulas se regula el desvío y circulación de agua para obtener la presión deseada en los aspersores, dando las precipitaciones adecuadas según la norma IEEE std4, como se observa en la **Figura 30**.



Figura 30. Regulación de la precipitación, mediante la presión de las válvulas. [Fuente autor]

Para obtener la precipitación necesaria se debe tener un dato estadístico que ocurre en cada una de las presiones que se producen, las cuales son realizadas a través de las válvulas de regulación. Los datos de medición de presión y precipitación se pueden observar a detalle en las tablas del **Capítulo 3**.

### 3.9 Materiales y costos del prototipo

El proyecto fue financiado en su totalidad por la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, los costos y especificación de materiales se detalla a continuación, siendo su costo final especificado en la **Tabla 8.5**.

MATERIALES PARA ARMADO DE CABINA Y CIRCULACIÓN DE AGUA				
DESCRIPCIÓN	MEDIDA	CANTIDAD	VAL. UNIT	VAL. TOTAL
Conectores tanque 3/4	UNIDAD	4	2,678	10,712
Tubos plásticos 3/4	UNIDAD	3	11,338	34,0149
Válvula llave compuerta plástica ¾	UNIDAD	6	11,440	68,64
Caudalímetro	UNIDAD	1	17,860	17,86
Codos ¾	UNIDAD	6	0,715	4,29
Válvula mariposa 3/4	UNIDAD	3	3,120	9,36
Aspersores Coolnet pro	UNIDAD	6	2,550	15,3
Bush 3/4 1P Conector	UNIDAD	4	1,205	4,82
Sikaflex	UNIDAD	4	8,928	35,712
Manómetro	UNIDAD	1	12,500	12,5
Neplos politubo 1-3/4	UNIDAD	2	0,355	0,71
Abrazaderas 3/4	UNIDAD	4	0,715	2,86
Tanque cilíndrico plástico	UNIDAD	1	48,210	48,21
Bombas pedrollo 1/2 Hp	UNIDAD	2	71,430	142,86
Tomas rápidas + llaves Plasson 3/4	UNIDAD	4	16,720	66,88

Manguera flexible 3/4	METROS	15	0,880	13,2
Silicón simple	UNIDAD	1	4,370	4,37
Bush 3/8- 3/4	UNIDAD	2	1,785	3,57
Te 3/4	UNIDAD	2	0,980	1,96
Te 1/2	UNIDAD	1	0,580	0,58
Neplo perdido 1/2	UNIDAD	2	0,400	0,8
Neplo perdido 3/4	UNIDAD	1	0,540	0,54
Codos 1/2	UNIDAD	4	0,620	2,48
Teflones	UNIDAD	6	0,715	4,29
Bush 1- 1/2	UNIDAD	1	1,030	1,03
Tapa 3/4 hembra	UNIDAD	1	0,620	0,62
Nodo 3/4	UNIDAD	1	2,010	2,01
Base metálica para tanque plástico	UNIDAD	1	35,200	35,2
Tapa 3/4	UNIDAD	1	0,620	0,62
Trapeador	UNIDAD	2	6,250	12,5
Valde plástico	UNIDAD	1	4,020	4,02
Pasta Polimex	UNIDAD	6	3,572	21,432
Unión 3/4	UNIDAD	3	0,620	1,86
Nodo universal 3/4	UNIDAD	2	2,010	4,02
Neplos 15 cm	UNIDAD	2	0,980	1,96
Ruedas de goma para base cabina	UNIDAD	4	4,400	17,6
Neplo politubo 1- 1/2	UNIDAD	4	0,358	1,432
Filtro para circulación de agua	UNIDAD	1	26,400	26,4
Mano de obra conexión de tuberías	UNIDAD	1	167,200	167,2
Subtotal				804,4229
IVA 12%				96,530748
TOTAL				<b>\$ 900,95</b>

Tabla 8. Material y costo para armado de cabina y circulación de agua. [Fuente autor]

BASE DE CABINA	
DETALLE	VAL. TOTAL
Fabricación base de cabina en fibra de vidrio 1m <sup>2</sup> x 1m <sup>2</sup>	355
Acoples con ruedas para movilización	30
Total	<b>\$ 385,00</b>

Tabla 8.1. Costo de base de la cabina en fibra de vidrio. [Fuente autor]

FABRICACION AISLADOR BASE	
DETALLE	VAL. TOTAL
Fabricación aislador base para acople a la cabina	250
Total	<b>\$ 250,00</b>

Tabla 8.2. Costo de fabricación del soporte aislador base. [Fuente autor]

FABRICACION PAREDES DE CABINA	
DETALLE	VAL. TOTAL
Fabricación cabina en vidrio templado de 1m <sup>2</sup> x 1m <sup>2</sup> ajustable a la base de fibra de vidrio incluido puerta de la cabina en acrílico	680
Total	\$ 680,00

Tabla 8.3. Costo de fabricación de las paredes de la cabina en vidrio templado. [Fuente autor]

MATERIALES ELÉCTRICOS		
Nombre	Cantidad	Precio
Bornera riel JXB-2,5mm P/C 12-114 AWG	8	2,4
Cable concéntrico 2x12	50m	58,31
Luz piloto CHINT ND16-22D/4 22MM verde	2	3,58
Luz piloto CHINT ND16-22D/4 22MM rojo	2	3,58
Conector PE PG 13,5	3	1,64
Riel din CHINT	1	2,69
Breakers riel CHINT NB1 1P 10A	2	8,94
Plaqueta dexion adhesiva	10	1,6
Cinta espiral camco 3/4	1	9,33
Gabinete 30x20x16 CSP-32-16 Pesada	1	33,67
Pulsante CHINT NP2-Ea31 NO verde	2	6
Pulsante CHINT NP2-Ea31 NC rojo	2	6
Amarra plástica 100x2,5	10	0,9
Contactor CHINT NC1-1210 4HP	2	23,22
Contactor auxiliar CHINT	1	7,5
Canaleta plástica dexion	3	22,5
TOTAL		\$ 191,86

Tabla 8.4. Costo de material eléctrico. [Fuente autor]

DETALLE COSTO TOTAL DEL PROTOTIPO	
DETALLE	VAL. TOTAL
MATERIALES PARA ARMADO DE CABINA Y CIRCULACIÓN DE AGUA	\$900,95
BASE DE CABINA	\$385,00
FABRICACION PIEZA AISLADOR	\$250,00
FABRICACION PAREDES DE CABINA	\$680,00
MATERIALES ELÉCTRICOS	\$191,86
COSTO TOTAL DEL PROTOTIPO DE LA CABINA DEL SIMULADOR DE LLUVIA	\$2.407,81

Tabla 8.5. Costo Total del prototipo diseñado. [Fuente autor]

### **3.10 Seguridad y consideraciones técnicas del laboratorio de AT**

Para garantizar la utilización del prototipo elaborado es necesario conocer el sistema de seguridad y protección que posee, el cual es el siguiente:

- a. El laboratorio de alta tensión cuenta con un sistema de puesta tierra.
- b. Posee una malla de limitación del área de trabajo y la visualización de los que estén desarrollando la práctica, el mismo que están aterrados.
- c. Al momento de abrir la puerta se apaga todo el equipo, dado el caso en el que una persona quiera entrar en el instante que se esté realizando pruebas.
- d. Todos los equipos e implementos a intervenir en el mismo estarán puestos a tierra.
- e. Finalmente se garantiza la seguridad del caso, fundamentada en normas vigentes para este tipo de ensayos o pruebas eléctricas en ambientes húmedos, según las normas IEC 60, IEEE Std 4, ANSI C29.1. La construcción del simulador de lluvia será elaborada con materiales no conductores y contará con botón de paro general del sistema, garantizando así la seguridad de equipos y personas en caso de falla del simulador o derrame de líquido en el área de trabajo.

## 4 Análisis de resultados

### 4.1 Regulación de la resistividad del agua

Tomando como referencias a la norma IEEE std 4, se detalla que el componente químico del agua debe cumplir con una resistividad de  $\pm 100\Omega \cdot \text{metro}$  para ejecutar en pruebas de estado húmedo.

A través del laboratorio de química de la carrera de Ingeniería Ambiental de la UPS, se procedió a estudiar aspectos químicos del agua disponible, detallando de donde proviene y su regulación de resistividad requerida para ensayos eléctricos mediante los siguientes aspectos.

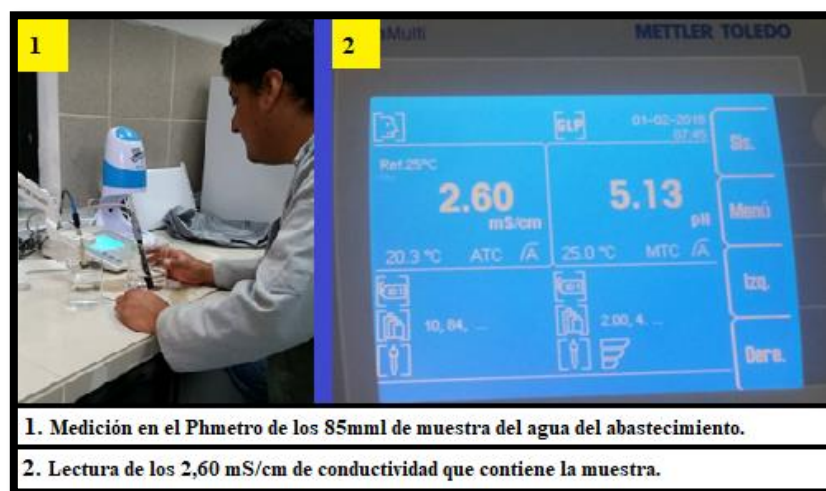


Figura 31.

Medición de conductividad de la muestra, el cual es inversamente proporcional a  $384,61 \Omega \cdot \text{metro}$  de resistividad. [Fuente autor]

El agua en su totalidad se la obtuvo de la red de agua potable de la localidad, mediante un equipo de filtrado se destila el agua y a su vez se transporta al sistema de abastecimiento, la cual se la deja reposar mínimo 3 días, en este caso se lo realizó con la cantidad de 134,59 litros. Una vez destilado el líquido se recolecta una muestra en un vaso de precipitación con 85 ml y se procede a llevarla al laboratorio, a través del Phmetro se mide la conductividad y mediante la inversa del valor medido se obtiene la resistividad de la muestra como se observa en la **Figura 31**, el cual contiene una conductividad de 2,60 mS/cm, siendo la inversa correspondiente el valor de  $384,61 \Omega \cdot \text{metros}$  que contiene el agua.

La resistividad obtenida del agua destilada es mayor a la que se requiere para pruebas eléctricas en humedad, precisando bajar el valor obtenido hasta llegar al rango recomendado por la norma IEEE std4.

#### 4.1.1 Proceso de obtener la resistividad requerida en el agua según la norma IEEE std 4-2013

Se procede en bajar el valor de la resistividad hasta llegar a lo que recomienda la norma IEEE std4, realizando las pruebas respectivas en el laboratorio de química, para los ensayos se utilizaron los siguientes materiales como detalla la **Figura 32**.

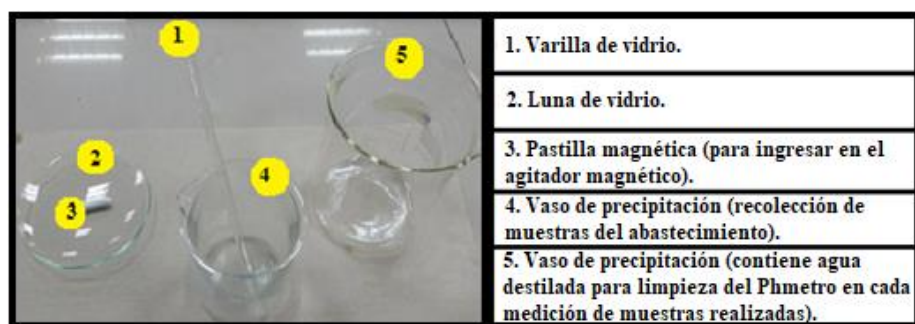


Figura 32. Elementos requeridos para el mejoramiento de la resistividad del agua. [Fuente autor]

Teniendo el valor del compuesto químico que contiene la muestra, se procede a modificar la conductividad con sal ( $\text{NaCl}$ ), el cual contiene propiedades químicas esenciales para disminuir la resistividad del agua.

Se elaboraron pruebas del porcentaje de gramos necesarios para la mejora de la resistividad del agua, realizando mezclas de pequeños incrementos de gramos de  $\text{NaCl}$  en cada muestra modificada, hasta llegar con la cantidad necesaria para mejorar el parámetro resistivo, utilizando para el trabajo la balanza analítica de gran precisión y el cual nos da el peso exacto en cada medición realizada como se observa en la **Figura 33**. Siendo el peso exacto de 0,012 *gramos* de  $\text{NaCl}$  requeridos para mejorar la muestra de 85 *ml* del recipiente.



Figura 33. Peso exacto de  $\text{NaCl}$  medido en la balanza analítica [Fuente autor]

A través del agitador magnético se mezcla el compuesto con la cantidad necesaria de  $\text{NaCl}$ , dando como resultado una mezcla más homogénea como se observa en la **Figura 34**.

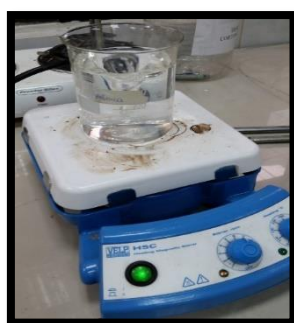




Figura 34. Mezcla del nuevo compuesto en el agitador magnético. [Fuente autor]

Una vez modificada la muestra se procede a medir en el Phmetro. Cumpliendo con el rango de resistividad requerido en la **Tabla 2**, como se observa en la **Figura 35**.



Figura 35. Lectura de la muestra

modificado el parámetro de conductividad. [Fuente autor]

Partiendo del parámetro exacto de modificación de la muestra, en la cual nos da  $105,263\Omega \cdot m$  de resistividad en 85 mml de agua, se procede hacer una relación de conversión con la cantidad de los 134,59 *litros* que contiene el abastecimiento para pruebas eléctricas del laboratorio de AT. Dando como resultado una conversión de 18,9876 *gramos* de *NaCl* necesarios para mejorar toda la cantidad, la cual se observa en la **Figura 36 y 37**.



Figura 36. Peso exacto para mejorar la abastecimiento de agua [Fuente autor]

de *NaCl* necesarios resistividad del del laboratorio de A.T.

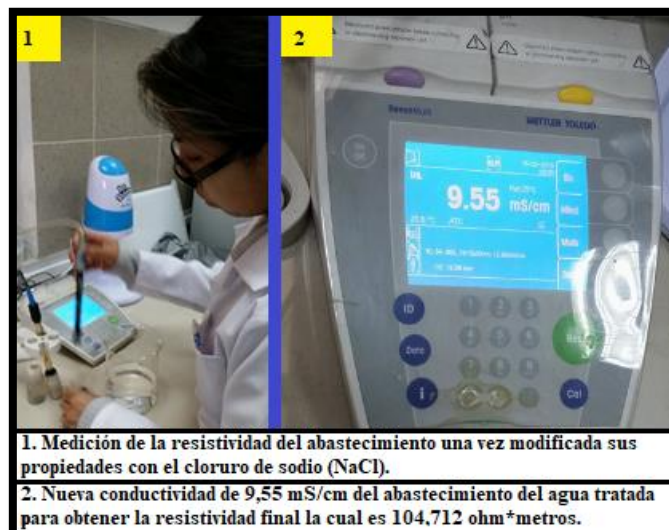


Figura 37. Resultado final de la resistividad una vez modificada la conductividad. [Fuente autor]

#### 4.1.2 Resultado final una vez mejorada las propiedades de resistividad del agua

En la **Tabla 9** se observa la conductividad y resistividad que posee el agua destilada, antes y después de haber sido mejorada la muestra.

Agua Destilada	Capacidad máxima del abastecimiento (220 Litros)	Conductividad (mS/cm)	Resistividad (ohm*m)	Resistividad recomendada por la norma IEEE std4 ( $\pm 100$ ohm/m)	Compuesto químico que se aplica para mejorar la resistividad (gramos)
Compuesto sin mejora	Aplicando con 134, 59 Litros	2,6	<b>384,61</b>	resistividad alta, no cumple la norma (X)	No se aplica ningún compuesto
Compuesto con mejora	Aplicando con 134,59 Litros	9,55	<b>104,712</b>	resistividad está en el rango, cumple la norma (✓)	Se aplica (18,99 g.) de NaCl para mejorar la resistividad

Tabla 9. Resultado final de la resistividad del abastecimiento antes y después de haber sido mejorado el parámetro de la conductividad. [Fuente autor]

## 4.2 Medición de precipitación

### 4.2.1 Medición de precipitación en el área de la cabina de prueba

La medición de la precipitación se desarrolla en el área de  $1m^2$ , para lo cual se obtiene 10 muestras en 5 presiones diferentes, dando como dato promedio estadístico la precipitación en 1 minuto, como se detalla en la **Tabla 10.1**.

PRESIÓN (BARES)		1	1,5	2	2,5	3
Nro. Mediciones en la cabina de $1 m^2$ (Precipitaciones (ml*min))	1ra	600	710	925	1000	1035
	2da	600	710	900	1000	1030
	3ra	615	700	890	1010	1015
	4ta	640	690	900	975	1050
	5ta	600	660	910	990	1040
	6ta	610	675	905	980	1045
	7ma	600	715	900	1000	1050
	8va	600	750	900	990	1030
	9na	575	700	910	1005	1050
	10ma	610	720	910	1000	1050

Tabla 10. Medición de precipitación en 1 minuto en el área de la cabina, (10 muestras realizadas por cada presión regulada). [Fuente autor]

PROMEDIO DE MEDICIONES	
Presión mediante Válvula 1 y 2	Precipitación(ml*min)
1 Bar de presión	605
1,5 Bar de presión	703
2 Bar de presión	905
2,5 Bar de presión	995
3 Bar de presión	1039,5

Tabla 10.1 Promedio final de precipitación. [Fuente autor]

### 4.2.2 Medición de precipitación en el área del objeto de prueba

Las pruebas se las desarrolla empleando la norma IEEE std4, donde recomienda realizar las mediciones en un recipiente mayor a los  $10cm \times 10cm$  en el lugar del objeto de prueba. Utilizando un recipiente de  $21,5 \times 16,5cm$  de medida, se obtuvo la precipitación promedio en 1 minuto como se observa en la **Tabla 11.1**.

PRESIÓN (BARES)		1	1,5	2	2,5	3
Nro. Mediciones en el área del objeto de prueba (21, 5x16, 5cm) (Precipitaciones (ml*min))	1ra	60	90	110	100	100
	2da	60	95	100	100	100
	3ra	60	90	100	100	100
	4ta	60	95	105	100	100
	5ta	60	95	100	100	100
	6ta	65	95	105	100	100
	7ma	60	90	100	100	100
	8va	60	90	105	100	100
	9na	65	90	105	100	100
	10ma	60	90	105	100	100

Tabla 11. Medición de precipitación en 1 minuto en el área del objeto de prueba. [Fuente autor]

Promedio mediciones en área (21, 5x16, 5cm)	
Presión mediante Válvula 1 y 2	Precipitación(ml*min)
1 Bar de presión	61
1,5 Bar de presión	92
2 Bar de presión	103,5
2,5 Bar de presión	100
3 Bar de presión	100

Tabla 11.1 Promedio final de precipitación. [Fuente autor]

Para presiones superiores a 2 bares la precipitación es la misma, tal como se observa en la **Tabla 11**, debido a que ocurre el efecto de pulverización comprimida, llegando a producirse el efecto de neblina en la cabina.

### 4.3 Pruebas y análisis de resultados

Antes de realizar las pruebas se debe seguir el procedimiento del ítem **1.8.1** para pruebas en seco y **1.8.2.1** para ambientes húmedos, donde es fundamental la elaboración de la corrección atmosférica. Las pruebas elaboradas en humedad se efectúan mediante precipitación por aspersión, aplicando una presión de 2 bares, es decir, con una precipitación de 1 litro en un minuto.

#### 4.3.1 Corrección atmosférica

Se realiza la corrección atmosférica según la norma ANSI/IEEE Std 4, para ello se toma las condiciones atmosféricas del laboratorio de AT de la UPS como se observa en las **Figuras 38,39,40**.



Figura 38. Temperatura. [Fuente autor]



Figura 39. Humedad relativa. [Fuente autor]

En la **Figura 39** el dato obtenido se pasa a humedad absoluta  $H_{ab} = 8.93 \frac{g}{m^3}$ .



Figura 40. Presión. [Fuente autor]

Con los valores de temperatura, presión y humedad absoluta se procede al cálculo de las constantes para la corrección atmosférica según la norma ANSI/IEE 4. teniendo un factor de corrección por densidad de aire  $Kd = 0.75$  y un factor de correlación de humedad de  $Kh = 1.026$ .

## 4.4 Prueba del BIL

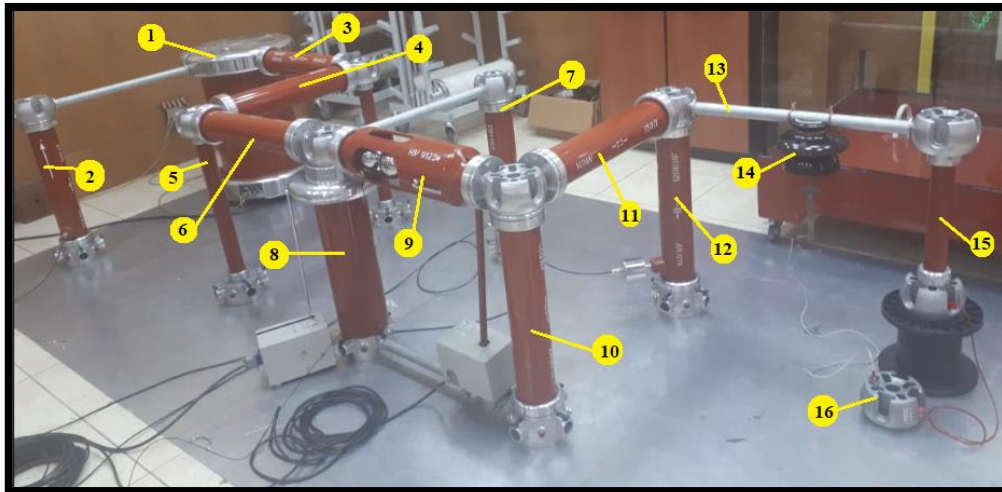
Se utiliza el método del BIL convencional, con el circuito de la **Figura 11**, el cual se implementará para ambientes en seco y húmedo. En la **Tabla 12** se detalla los valores una vez realizada la corrección atmosférica para el aislador pin 56-1. En el **Anexo 3** se observa el Datasheet del aislador seleccionado para los ensayos eléctricos.

Bil positivo estándar	Factor de correlación	Bil corregido
150kV	$\frac{Kd}{Kh} = 0.73$	110.27kV

Tabla 12. BIL de impulso positivo del aislador pin 56-1 con corrección atmosférica. [Fuente autor]

## 4.4.1 Prueba del BIL en ambiente seco

### 4.4.1.1 Armado del circuito



Figura

Circuito del BIL en ambiente seco. [Fuente auto]

41.

En la **Figura 41** se puede observar el esquema armado con los componentes del laboratorio de AT de la UPS y el detalle de cada uno de los elementos se presenta en la **Tabla 13**.

Numero	Descripción
1	Transformador de potencia HV 9105
2	Condensador de medida HV9141 de 100pF
3	Rectificador semiconductor HV9111 de 140kV 20mA
4	Rectificador semiconductor HV9111 de 140kV 20mA
5	Base de soporte
6	Resistencia de carga HV9121 de 10MΩ
7	Resistencia de medición HV9113 de 280MΩ
8	Condensador de alisado HV9112 de 25000pF
9	Explosor de esferas HV9125
10	Resistencia de cola de onda HV9123
11	Resistencia de frente de onda HV9122
12	Condensador de carga HV9120
13	Varilla de conexión HV 9108
14	Aislador tipo pin 56-1
15	Base de soporte
16	Copa de conexión a tierra

Tabla 13. Elementos del circuito del BIL en ambiente seco. [Fuente autor]

### 4.4.1.2 Adquisición de datos

Se coloca los instrumentos de medición en el tablero de AT, como se observa en la **Figura 33** y se detalla en la **Tabla 14**, el osciloscopio se configura a una atenuación de x200.

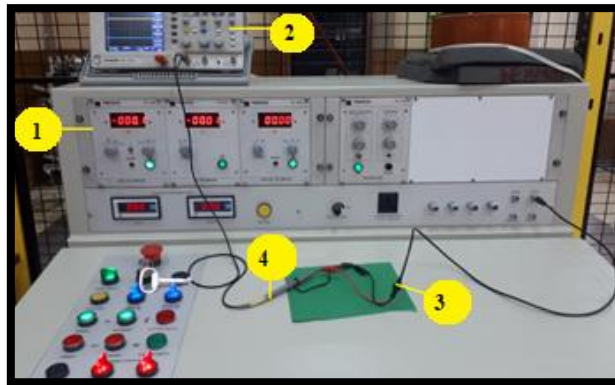


Figura 42. Adquisición de

datos. [Fuente autor]

Numero	Descripción
1	Tablero de control TERCO
2	Osciloscopio GwINSTEK GDS-1102A-U
3	Sonda atenuada x10
4	Sonda normal

Tabla 14. Elementos de la adquisición de datos. [Fuente autor]

Se efectuó 5 impulsos positivos tipo rayo al aislador pin 56-1, este proceso se repitió a dos tensiones de prueba como se observa en la **Tabla 15**, se generó el impulso a estas tensiones debido que es la capacidad máxima que puede dar el laboratorio de AT de la UPS, acercándose al valor deseado.

Numero de prueba	Tensión de prueba del transformador	Tensión en DC	BIL obtenido	Promedio del BIL	BIL corregido	Distancia de esferas
1	100.5kV	111.50	101.40	101.46kV	110kV	7.7mm
2		111.52	101.47			
3		111.58	101.50			
4		111.60	101.51			
5		111.54	101.45			
1	110.1kV	120.30	108.43	108.47kV	110kV	7.7mm
2		120.43	108.51			
3		120.33	108.45			
4		120.34	108.47			
5		120.40	108.50			

Tabla 15. Datos del BIL. [Fuente autor]

En la **Figura 43, 44** se observa los impulsos tipo rayo aplicados al aislador, el cual cumple con las condiciones de 1.2/50, teniendo como resultado que el aislador pin 56-1 no presentó ninguna descarga disruptiva al recibir los impulsos.

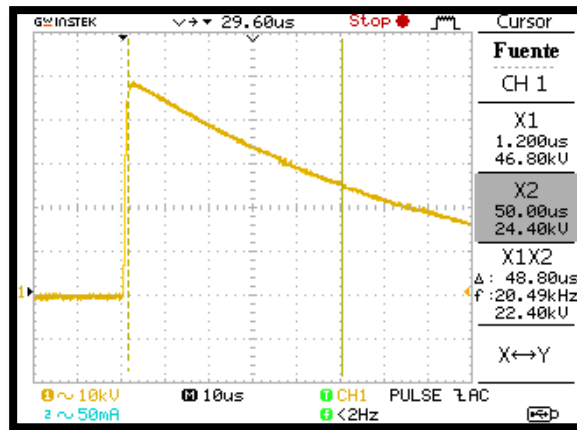


Figura 43. Impulso tipo rayo a 100.5kV en ambiente seco. [Fuente auto]

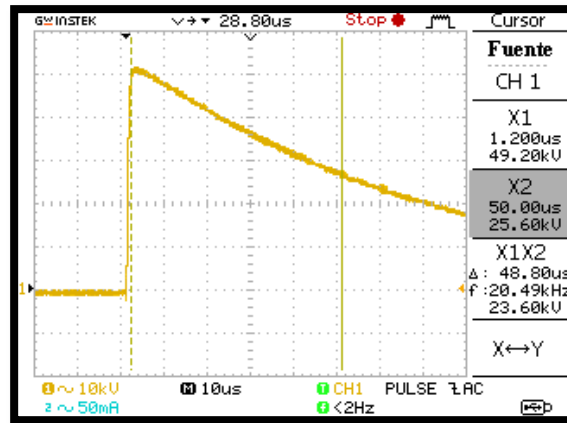


Figura 44. Impulso tipo rayo a 110.1kV en ambiente seco. [Fuente auto]

## 4.4.2 Prueba del BIL en ambiente húmedo

### 4.4.2.1 Armado del circuito

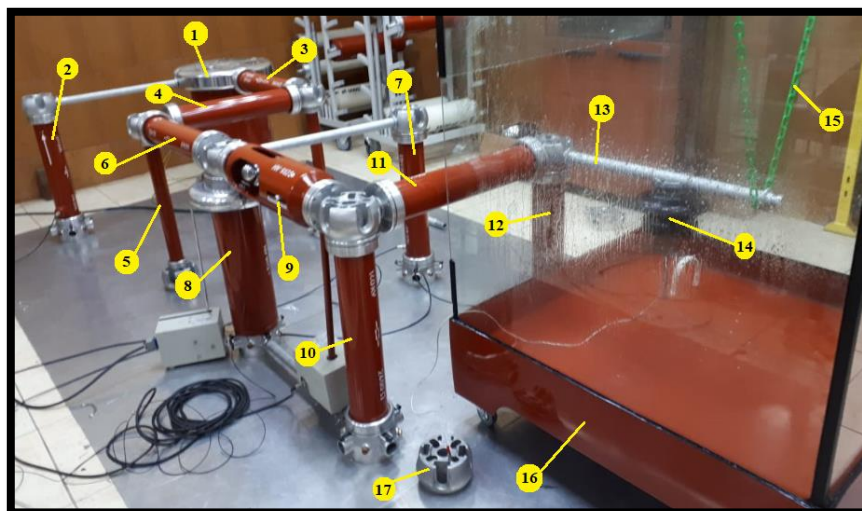




Figura 45. Circuito del BIL en ambiente húmedo. [Fuente auto]

En la **Figura 45** se puede observar el esquema armado con los componentes del laboratorio de AT de la UPS y el detalle en la **Tabla 16**.

Numero	Descripción
1	Transformador de potencia HV 9105
2	Condensador de medida HV9141 de 100pF
3	Rectificador semiconductor HV9111 de 140kV 20mA
4	Rectificador semiconductor HV9111 de 140kV 20mA
5	Base de soporte
6	Resistencia de carga HV9121 de 10MΩ
7	Resistencia de medición HV9113 de 280MΩ
8	Condensador de alisado HV9112 de 25000pF
9	Explosor de esferas HV9125
10	Resistencia de cola de onda HV9123
11	Resistencia de frente de onda HV9122
12	Condensador de carga HV9120
13	Varilla de conexión HV 9108
14	Aislador tipo pin 56-1
15	Cadena plástica de soporte
16	Simulador de Lluvia
17	Copa de conexión a tierra.

Tabla 16. Elementos del circuito del BIL en ambiente húmedo. [Fuente autor]

#### 4.4.2.2 Simulación de lluvia

Como se expresa en el método estándar el objeto de prueba (Pin 56-1) se humedece durante 15 minutos a la precipitación y resistividad indicada, a continuación, sin cortar la precipitación se procede a realizar la prueba del BIL.



Figura 46. Humectación del pin 56-1. [Fuente autor]

#### 4.4.2.3 Adquisición de datos

Se repite el mismo procedimiento que en el ambiente en seco, obteniendo los datos que se detalla en la **Tabla 17**.

Numero de prueba	Tensión de prueba del Transformador	Tensión en DC	BIL obtenido	Promedio del BIL	BIL corregido	Distancia de esferas
1	100.5kV	109.10	98.72	98.72kV	110kV	8mm
2		109.07	98.71			
3		109.05	98.69			
4		109.15	98.70			
5		109.18	98.75			
1	110.1kV	118.70	106.71	106.75kV	110kV	8.5mm
2		118.78	106.80			
3		118.72	106.75			
4		118.76	106.79			
5		118.70	106.71			

Tabla 17. Datos del BIL en ambiente húmedo. [Fuente autor]

En la **Figura 47, 48** se observa los impulsos tipo rayo aplicados al aislador los cuales cumplen con las condiciones de 1.2/50. Teniendo como resultado que el aislador pin 56-1 no presentó ninguna descarga disruptiva al recibir los impulsos; por efectos de la lluvia el BIL obtenido se reduce y la distancia entre esferas HV9125 aumento en relación con la prueba en ambiente seco.

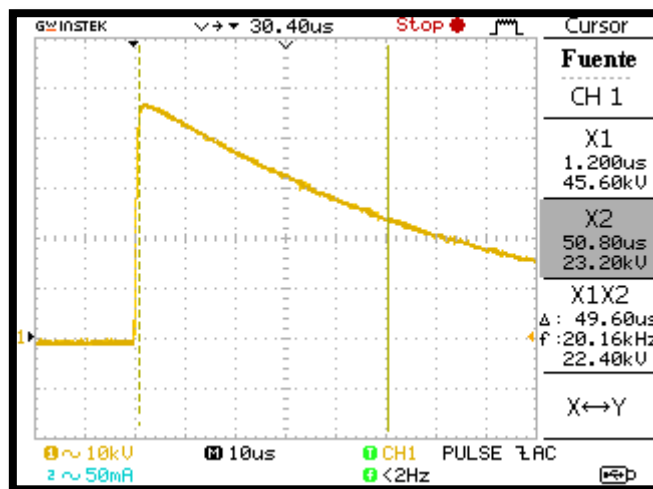


Figura 47. Impulso tipo rayo a 100.5kV en ambiente húmedo. [Fuente auto]

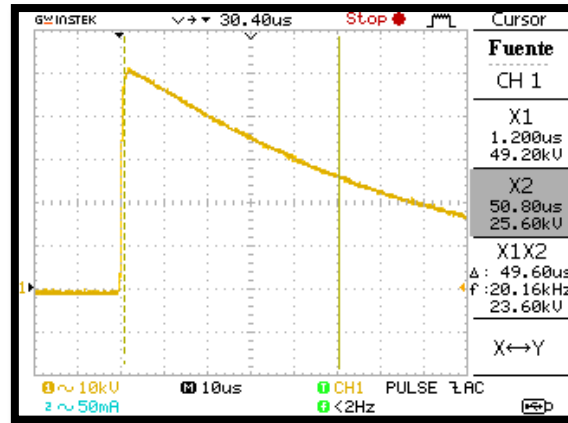


Figura 48. Impulso tipo rayo a 110.1kV en ambiente húmedo. [Fuente autor]

## 4.5 Descargas Parciales

Se procede según el ítem 1.11.3, utilizando el circuito de la **Figura 12**, esto será para la práctica en ambiente seco como en húmedo.

### 4.5.1 Descargas parciales en ambiente seco

#### 4.5.1.1 Armado del circuito

Se arma el circuito con los componentes del laboratorio de la UPS como se observa en la **Figura 49**, el detalle se encuentra en la **Tabla18**.

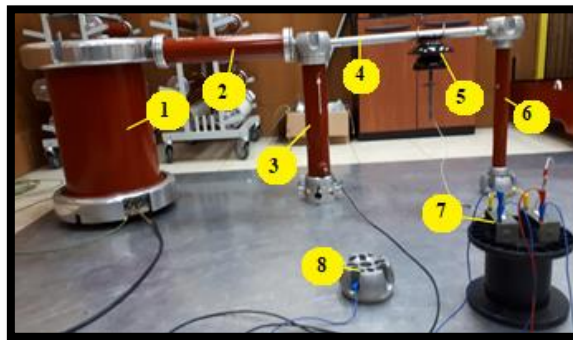


Figura 49. Circuito Directo de DP en ambiente seco. [Fuente autor]

Numero	Descripción
1	Transformador de potencia HV 9105
2	Resistencia de carga HV9121 de $10M\Omega$
3	Condensador de medida HV9141 de $100pF$
4	Varilla de conexión HV9108
5	Aislador tipo pin 56-1
6	Base de soporte
7	2 Resistencias en serie de $1K\Omega$ y $2K\Omega$ , para medir las corrientes de las DP en el aislador (Zn)
8	Copa de conexión a tierra.

Tabla 18. Elementos utilizados en ambiente seco para la DP [Fuente autor]

### 4.5.1.2 Adquisición de datos

Se coloca los instrumentos de medición en el tablero de AT, como se observa en la **Figura 50** y se detalla en la **Tabla 19**.

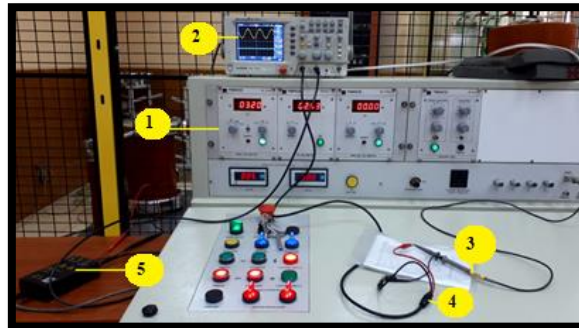


Figura 50. Elementos de la adquisición de datos. [Fuente autor]

Numero	Descripción
1	Tablero de control TERCO
2	Osciloscopio GwINSTEK GDS-1102A-U
3	Sonda atenuada x10
4	Sonda atenuada x1
5	Sonda diferencial de voltaje PROBE_GIE_500V

Tabla 19. Descripción de adquisición de datos. [Fuente autor]

Los datos se han tomado cada 5kV, las descargas parciales se presentan a partir de los 70kV; Llegando a tener DPs más pronunciadas y hasta la ruptura del aislamiento en voltajes mayores a los 90kV ver la **Tabla 20**. las imágenes de las diferentes pruebas se pueden observar en el **Anexo 4**.

KV	Descripción
0 a 70	No hay DP
70 a 90	DP
>90	Ruptura

Tabla 20. Resumen de la prueba de DP en ambiente seco. [Fuente autor]

### 4.5.1.3 Filtración de señales

Una vez detectadas las descargas parciales se procede a la filtración de las señales en MATLAB mediante un filtro digital de segundo orden, esto debido que se introducen ruido en el momento de la adquisición de datos.

Para el procesamiento de la data del CH1 y CH2 en el filtro digital la señal se debe multiplicar por un factor de corrección para tener el valor real, debido a la configuración que se realizó en el osciloscopio, para obtener el valor de la corriente de fuga del CH2 se debe dividir para la resistencia de  $3000\Omega$ .

a) *Filtración de 60kV*

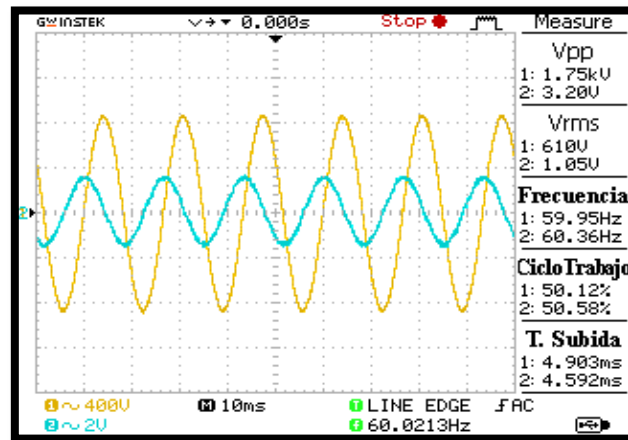


Figura 51. Captura del osciloscopio a 60kV. [Fuente autor]

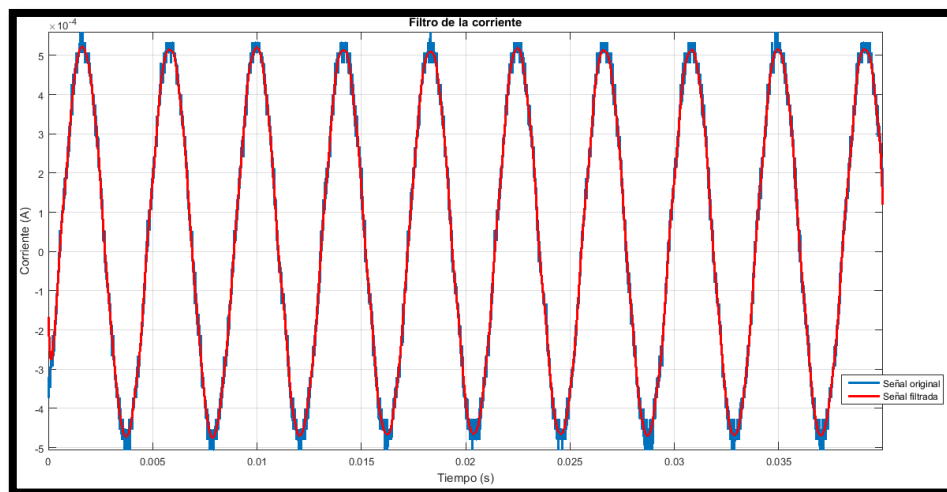


Figura 52. Corriente; Señal original (azul), señal filtrada (roja). [Fuente autor]

Filtrada la corriente **Figura 52**; Se crea una señal pura de igual frecuencia y amplitud para poder determinar las DPs, esto se da debido a la diferencia entre las dos señales; la original de color azul y la creada de color rojo como se observa en la **Figura 53**, dando como resultado la señal de color negro para determinar si existe o no alguna DP, en este caso no se observa la presencia de alguna DP.

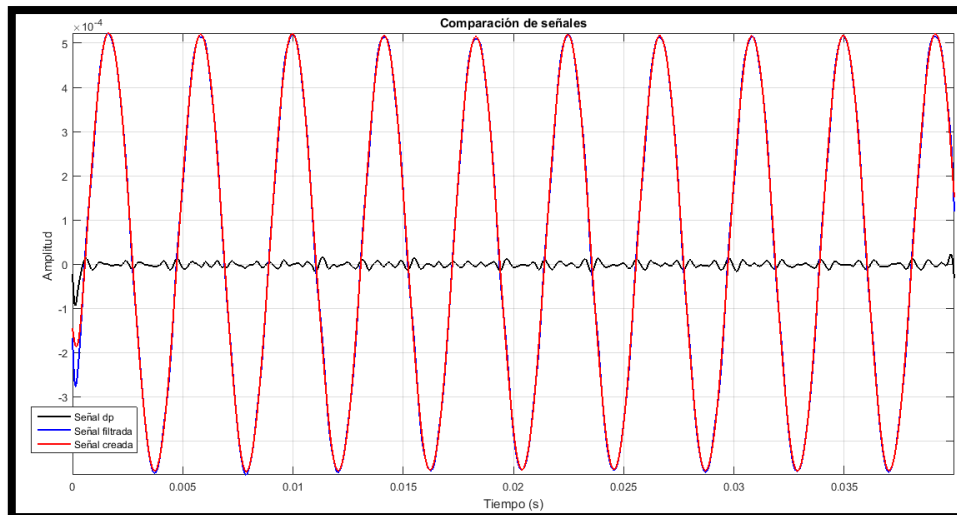


Figura 53.

*Determinación de la DP; señal (negra). [Fuente autor]*

### b) Filtración de 85kV

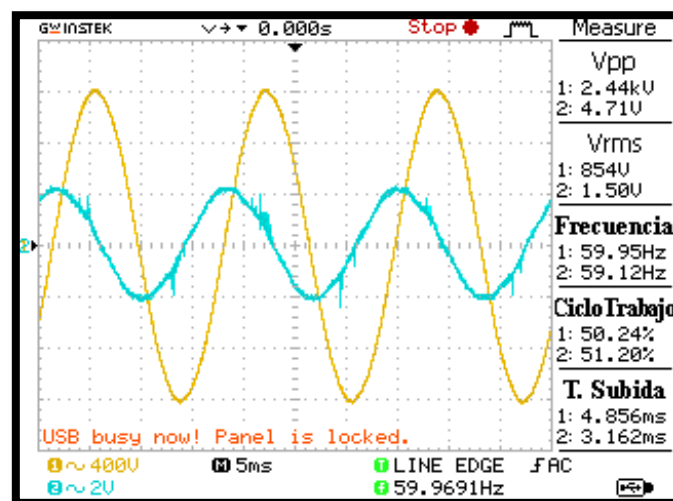


Figura 54. Captura del osciloscopio a 85kV. [Fuente autor]

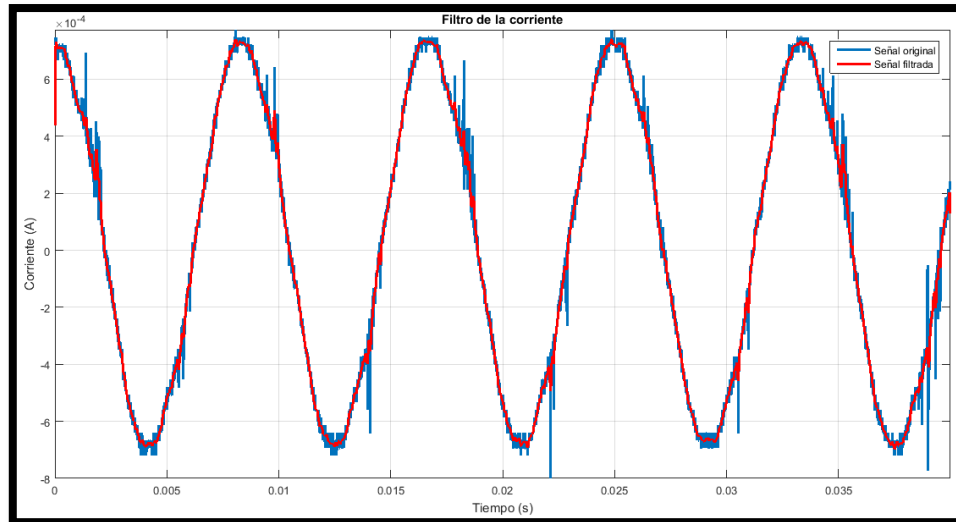


Figura 55. Corriente; Señal original (azul), señal filtrada (roja). [Fuente autor]

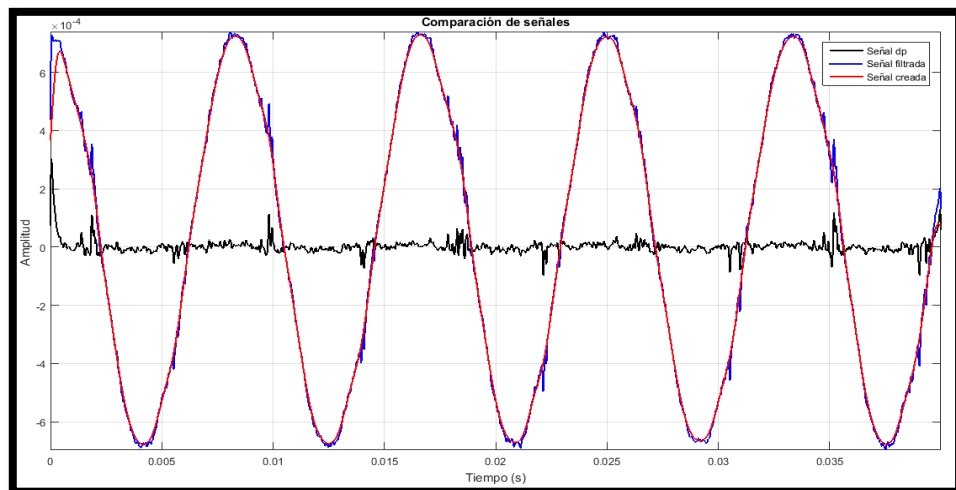


Figura 56. Determinación de la DP; señal (negra). [Fuente autor]

A este nivel de tensión ya se puede observar pequeños picos desde la captura del osciloscopio **Figura 54**, y se puede notar de mejor manera realizada la filtración de la corriente **Figura 55**, teniendo picos notables en la señal de color azul. Realizada la diferencia entre señales **Figura 56**, tenemos la señal de color negro donde hay la presencia de pequeñas DPs, picos positivos y negativos en el instante en que se produce la DP.

c) *Filtración de 91kV*

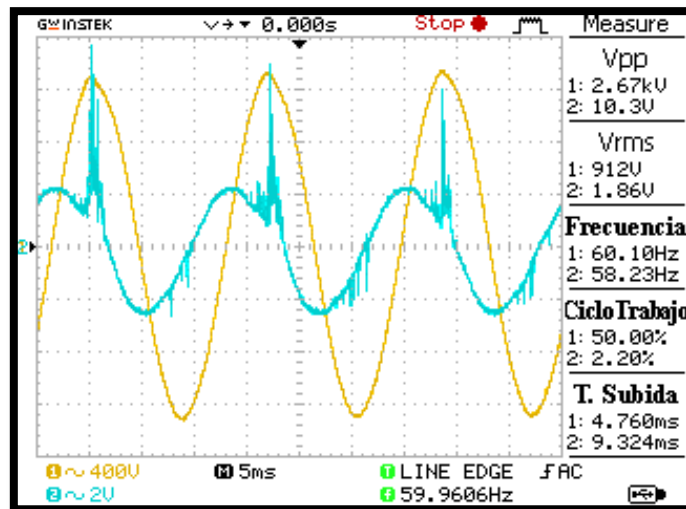
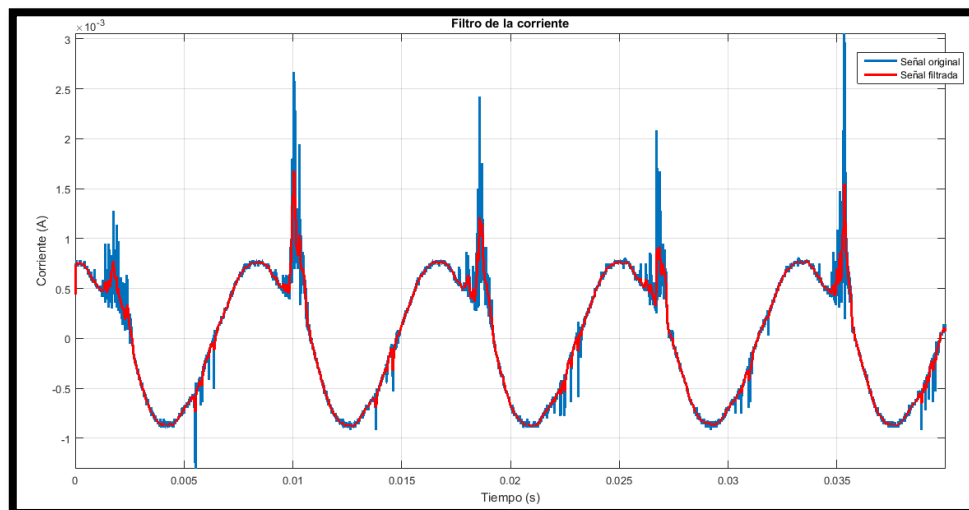


Figura 57. Captura

91kV. [Fuente autor]

del osciloscopio a



Figura

Corriente; Señal original (azul), señal filtrada (roja). [Fuente autor]

58.

En las **Figuras 57, 58** se nota claramente la presencia de picos, siendo evidente la presencia de DPs. Realizada la diferencia de señales **Figura 59**, se observa la señal de color negro los picos positivos muy pronunciados y picos negativos en el instante que se produce la DP.



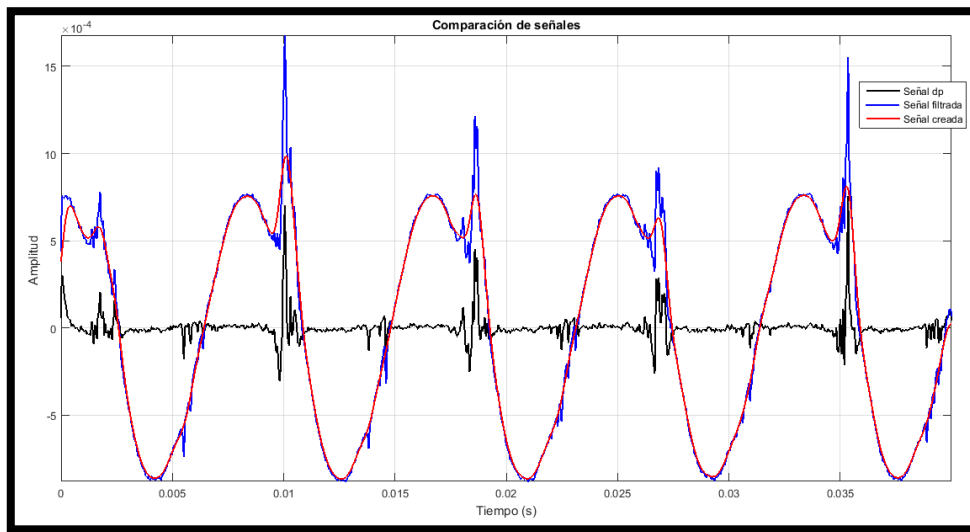


Figura 59. Determinación de la DP; señal (negra). [Fuente autor]

## 4.5.2 Descargas parciales en ambiente húmedo

### 4.5.2.1 Armado del circuito

Con los componentes del laboratorio de la UPS se arma el circuito determinado como se observa en la **Figura 60**, y el detalla en la **Tabla 21**

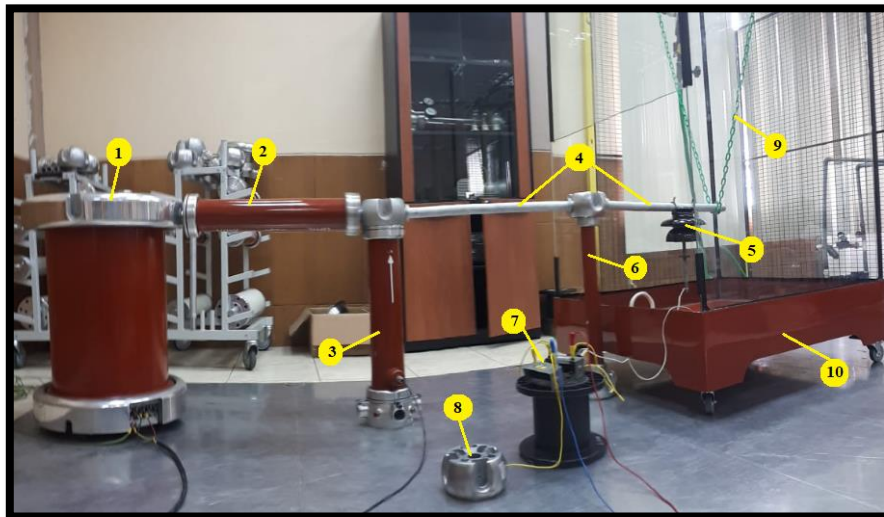


Figura 60. Circuito Directo. [Fuente autor]

Numero	Descripción
1	Transformador de potencia HV 9105
2	Resistencia de carga HV9121 de $10M\Omega$
3	Condensador de medida HV9141 de $100pF$
4	Varilla de conexión HV 9108
5	Aislador tipo pin 56-1
6	Base de soporte
7	2 Resistencias en serie de $1K\Omega$ y $2K\Omega$ , para medir las corrientes de las DP en el aislador
8	Copa de conexión a tierra.
9	Cadena plástica de soporte
10	Simulador de lluvia

Tabla 21. Elementos utilizados en ambientes húmedos para la DP. [Fuente autor]

#### 4.5.2.2 Simulación de la lluvia

Como se expresa en el método estándar, el objeto de prueba (Pin 56-1) se humedece durante 15 minutos a la precipitación y resistividad indicada, a continuación, sin cortar la precipitación se procede a realizar la prueba de descarga parcial.



Figura 61. Humectación del pin 56-1. [Fuente autor]

#### 4.5.2.3 Adquisición de datos

Los instrumentos de medición se colocan de igual que en ambiente seco ver **Figura 60**. Se toma los datos cada 5kV hasta la presencia de una DP, como se observa en la **Tabla 22** existe la presencia de DPs a tensiones superiores de 50kV; Llegando a tener DPs más pronunciadas y hasta la ruptura del aislamiento en voltajes mayores a los 65kV, las imágenes de las diferentes pruebas se pueden observar en el **Anexo 5**.

KV	Descripción
0 a 50	No hay DP
50 a 65	DP
>65	Ruptura

Tabla 22. Resumen de la prueba de DP en ambiente húmedo. [Fuente autor]

#### 4.5.2.4 Filtración de señales

Se procede de igual manera que en el ambiente seco.

##### a) Filtración de 45kV

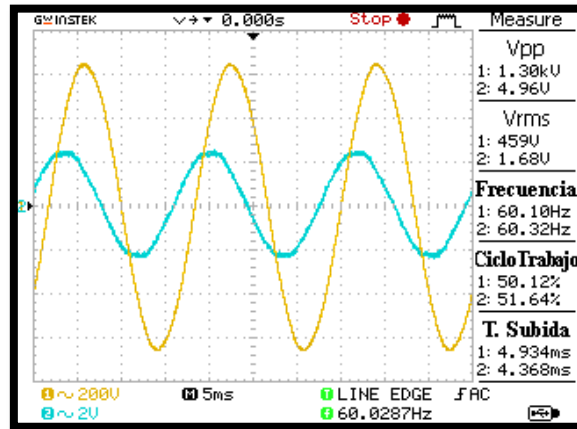
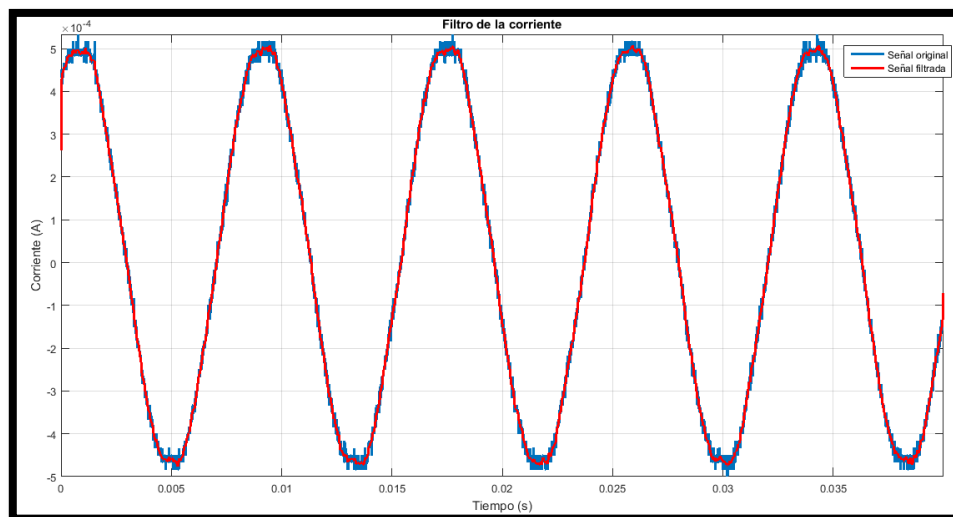


Figura 62. Captura del

[Fuente autor]

osciloscopio a 45kV.



Figura

Corriente; Señal original (azul), señal filtrada (roja). [Fuente autor]

63.

Realizada la filtración y diferencia de señales en la **Figura 64**, se observa la señal de color negro la cual no presenta DPs para este nivel de tensión.

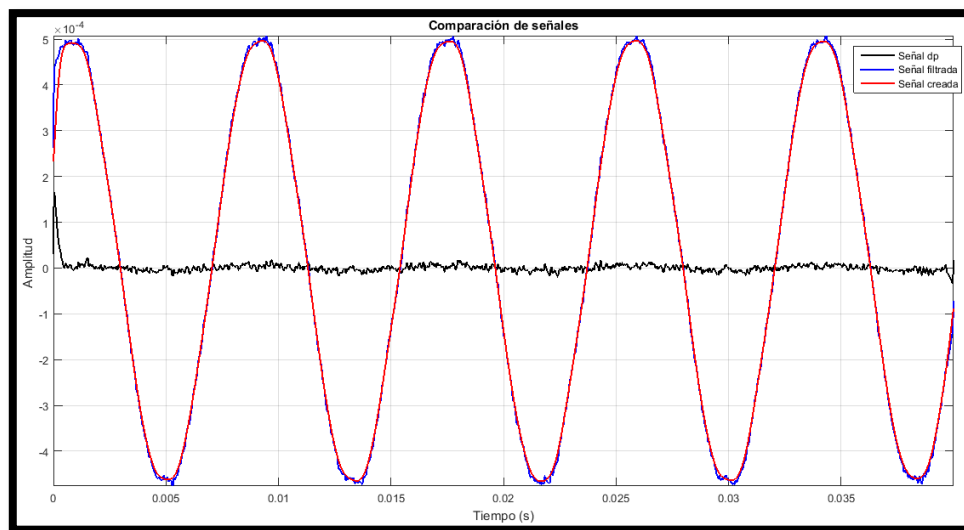


Figura 64. Determinación de la DP; señal (negra). [Fuente autor]

## b) Filtración de 60kV

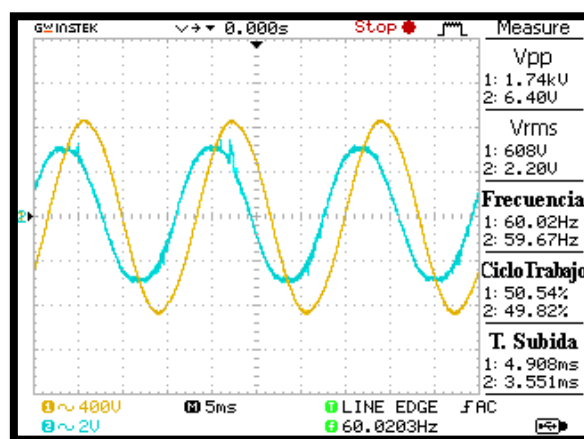


Figura 65. Captura del osciloscopio a 60kV. [Fuente autor]

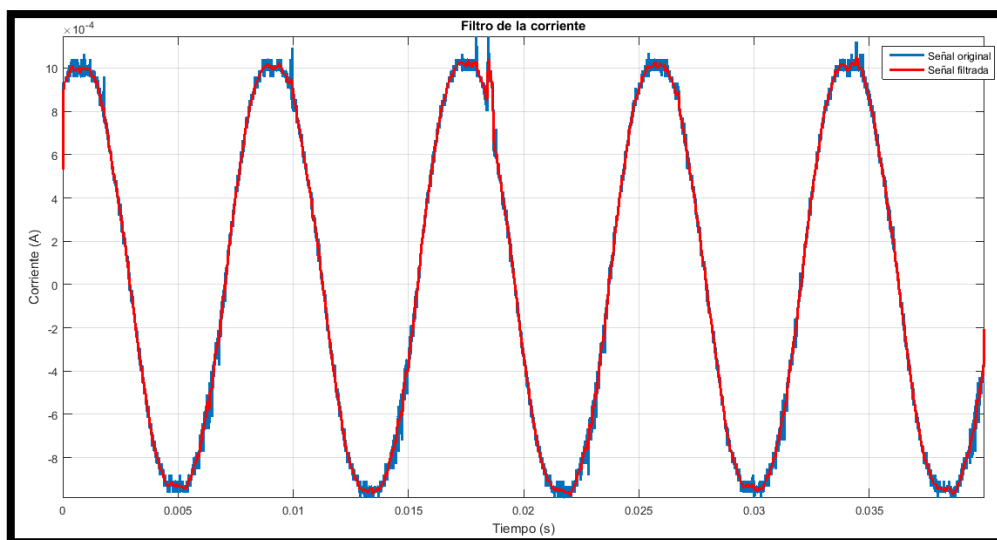


Figura 66. Corriente; Señal original (azul), señal filtrada (roja). [Fuente autor]

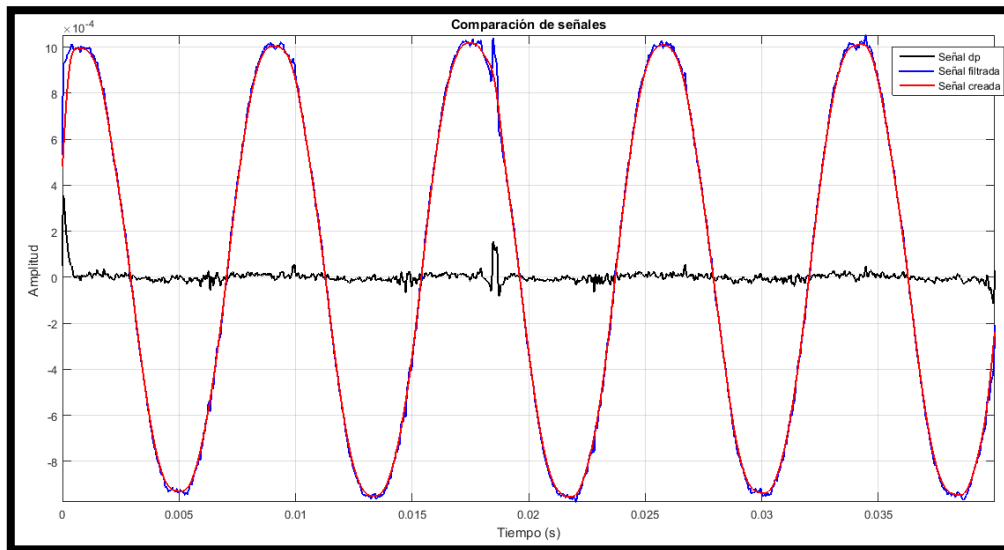


Figura 67. Determinación de la DP; señal (negra). [Fuente autor]

Realizada la filtración de la corriente **Figura 66**, la señal de color azul se observa una pequeña distorsión o pico. Dicho pico se puede observar mejor en la **Figura 67** en la señal de color negro, debido a la diferencia entre señales determinando el momento de la DP en el aislador.

### c) Filtración de 70kV

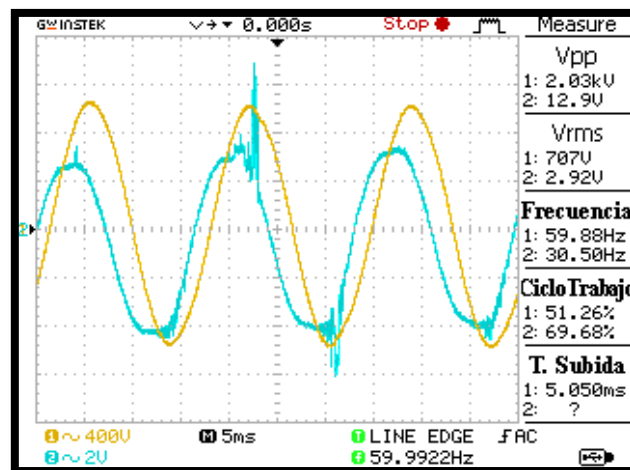
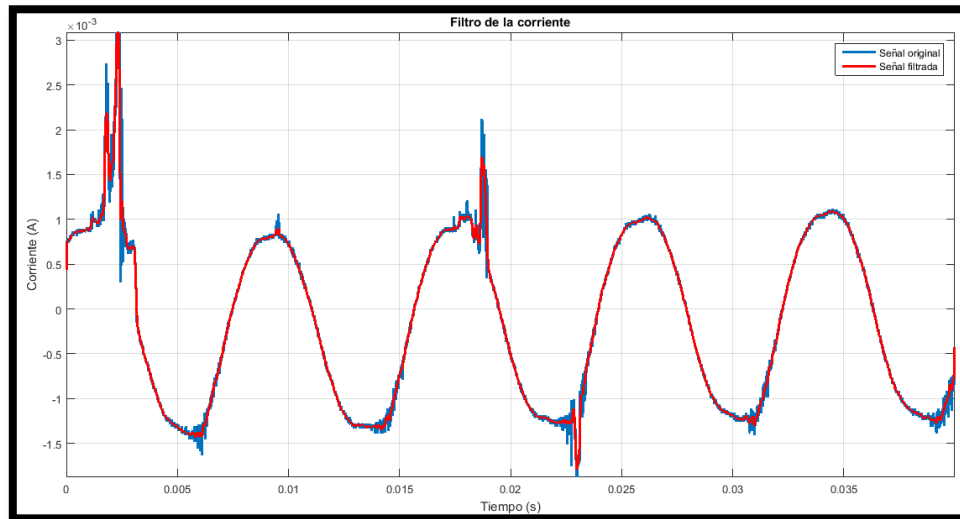


Figura 68. Captura del osciloscopio a 70kV. [Fuente autor]



Figura

Corriente; Señal original (azul), señal filtrada (roja). [Fuente autor]

69.

En las **Figuras 68, 69**, se nota claramente la presencia de picos siendo evidente la presencia de DPs. Realizada la diferencia de señales **Figura 70**, se observa la señal de color negro donde se determina las DPs con dos picos positivos muy pronunciados y un pico negativo en el instante que se produce la DP.

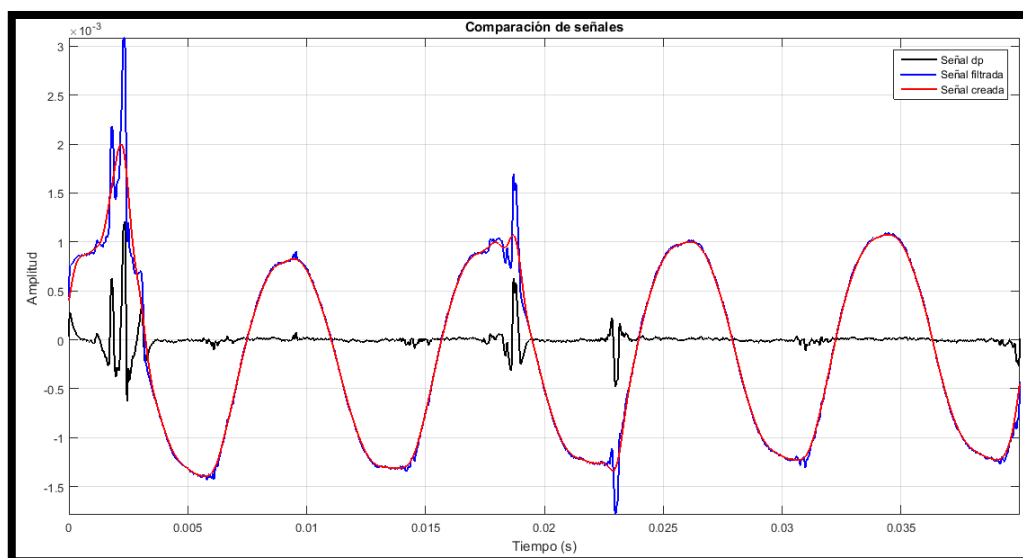


Figura 70. Determinación de la DP; señal (negra). [Fuente autor]

## 4.6 Tensión de descargas

Se procede a realizar la corrección atmosférica según la norma ANSI/IEEE 4. En la **Tabla 23** se detalla los valores realizada la corrección atmosférica para el aislador pin 56-1.

Ambiente	Voltaje estándar	Factor de correlación	Voltaje corregido
Seco	95kV	$\frac{Kd}{Kh} = 0.73$	69.84kV
Húmedo	60kV	$Kh = 1.026$	45.25kV

Tabla 23. Tensiones de falla del aislador pin 56-1 con corrección atmosférica. [Fuente autor]

### 4.6.1 Tensión de descargas en ambiente seco

#### 4.6.1.1 Armado del circuito

Con los componentes del laboratorio de AT se arma el circuito determinado como se observa en la **Figura 71**, y el detalla en la **Tabla 24**. El circuito utilizado es similar a la de DPs con la diferencia que se elimina la resistencia y se cierra directo a tierra.

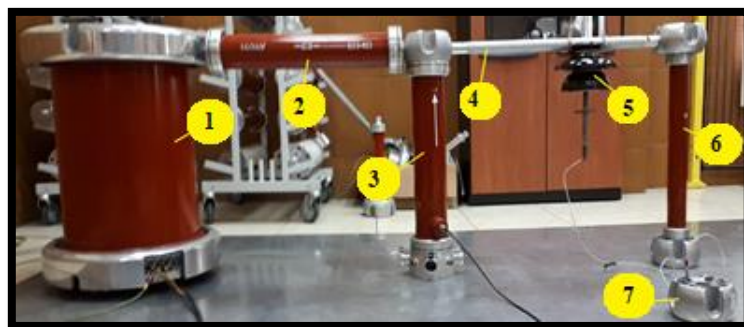


Figura 71. Circuito

de tensión de

descarga [Fuente autor]

Numero	Descripción
1	Transformador de potencia HV 9105
2	Resistencia de carga HV9121 de $10M\Omega$
3	Condensador de medida HV9141 de $100pF$
4	Varilla de conexión HV 9108
5	Aislador tipo pin 56-1
6	Base de soporte
7	Copa de conexión a tierra.

Tabla 24. Detalle del circuito de tensión de descarga [Fuente autor]

#### 4.6.1.2 Adquisición de datos

Se coloca los instrumentos de medición en el tablero de control de AT, como se observa en la **Figura 72** y se detalla en la **Tabla 25**.

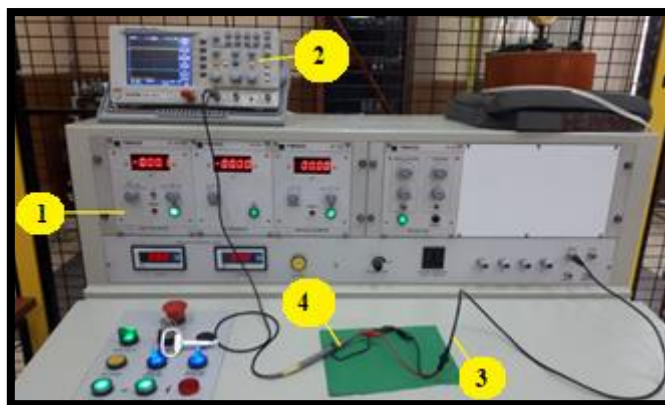


Figura 72. Elementos de la adquisición de datos. [Fuente autor]

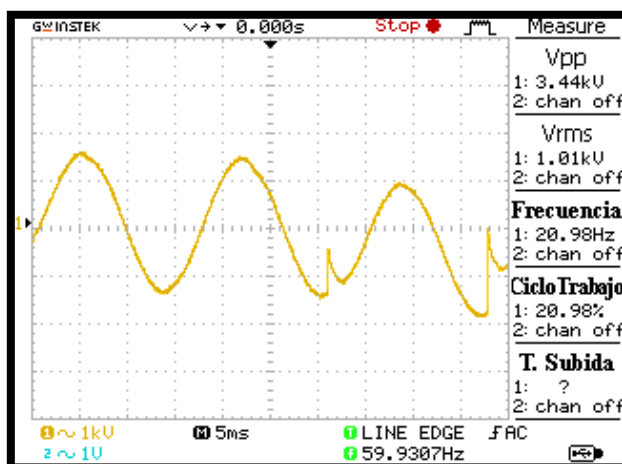
Numero	Descripción
1	Tablero de control TERCO
2	Osciloscopio GwINSTEK GDS-1102A-U
3	Sonda atenuada x10
4	Sonda atenuada x1
5	Sonda diferencial de voltaje PROBE_GIE_500V

Tabla 25. Descripción de adquisición de datos. [Fuente autor]

Se procede de acuerdo al ítem **1.12.1**, con una muestra estadística de 5 pruebas consecutivas como se observa en la **Tabla 25**. Obteniendo como resultado que el aislador pin 56-1 utilizado en la prueba cumple de acuerdo a la característica técnica de construcción para voltajes de falla en seco. La **Figura 73, 74** se observa una tensión de descarga a 100.1kV, las imágenes de las diferentes pruebas se encuentran en el **Anexo 6**. Para obtener el valor real de la tensión se debe multiplicar x100 al valor del osciloscopio.

Numero de prueba	Tensión de descarga	Promedio	Tensión corregida
1	100kV	99.7kV	69.84 kV
2	98.4kv		
3	100kV		
4	100.1kV		
5	100kV		

Tabla 26. Tensión de pin 56-1 en ambiente seco



descarga en el aislador [Fuente autor]



*Figura 73. Tensión de descarga a 100.1kV en ambiente seco. [Fuente autor]*



*Figura 74. Tensión de descarga en el aislador a 100.1kV en ambiente seco. [Fuente autor]*

## **4.6.2 Tensión de descargas en ambiente húmedo**

### **4.6.2.1 Armado del circuito**

Con los componentes del laboratorio de AT se arma el circuito determinado como se observa en la **Figura 75** y el detalle en la **Tabla 27**.



Figura 75. Circuito de tensión de descarga en ambiente húmedo. [Fuente autor]

Numero	Descripción
1	Transformador de potencia HV 9105
2	Resistencia de carga HV9121 de 10MΩ
3	Condensador de medida HV9141 de 100pF
4	Base de soporte
5	Varilla de conexión HV 9108
6	Aislador tipo pin 59-1
7	Cadena plástica de soporte
8	Simulador de lluvia
9	Copa de conexión a tierra.

Tabla 27. Detalle del circuito de tensión de descarga [Fuente autor]

#### 4.6.2.2 Simulación de lluvia

Como se expresa en el método estándar el objeto de prueba (Pin 56-1) se humedece durante 15 minutos a la precipitación y resistividad indicada, a continuación, sin cortar la precipitación se procede a realizar la prueba de descarga parcial.



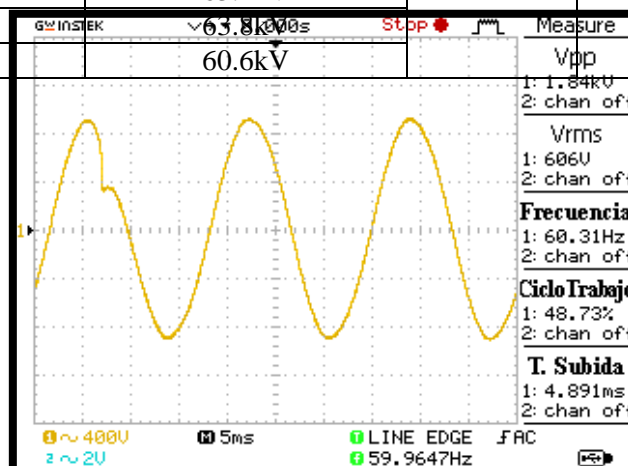
Figura 76. Humectación del pin 56-1. [Fuente autor]

#### 4.6.2.3 Adquisición de datos

Se procede de igual manera que en ambiente en seco y se obtiene las muestras estadísticas **Tabla 28**, el valor promedio cumple con las características técnicas de construcción para ambiente en húmedo para voltajes de falla. En la **Figura 77, 78** se observa una captura de una descarga de tensión a 60.6kV, la captura de las demás pruebas se encuentra en el **Anexo 7**.

Numero de prueba	Tensión de descarga	Promedio	Tensión de corregida
1	62.1kV	62.2kV	45.25kV
2	61.1kv		
3	63.4kV		
4	63.8kV	60.6kV	
5	60.6kV		

Tabla 28. Tensión de pin 56-1 en ambiente



descarga en el aislador húmedo. [Fuente autor]

*Figura 77. Tensión de descarga a 60.6kV en ambiente húmedo. [Fuente autor]*



*Figura 78. Tensión de descarga en el aislador a 60.6kV en ambiente húmedo. [Fuente autor]*

## **5 Conclusiones y Recomendaciones.**

### **5.1 Conclusiones.**

- De acuerdo a las dimensiones con las que cuenta el laboratorio de alta tensión de la UPS-Cuenca, se ha elaborado un prototipo de simulador de lluvia para pruebas eléctricas, las cuales validan la aplicación de la cámara de lluvia elaborado en  $1\text{m}^2$ , siendo factible someter diferentes materiales a ensayos eléctricos en humedad a media tensión, teniendo en cuenta que por intermedio de las válvulas se regula la precipitación requerida a través del método de aspersión, hasta alcanzar un nivel máximo de 2 bares de presión, ya que en adelante la precipitación será la misma en las

presiones superiores, produciendo el efecto de neblina por pulverización comprimida del agua.

- El soporte de aislador base diseñado para este prototipo resulto con inconvenientes a la hora de ser sometido a alta tensión mientras se produce la precipitación, dando problemas en la adquisición de datos, debido a que de grilon al ser de menor tamaño se producen descargas de frecuencia industrial por medio de este. Por ello se determina que el objeto de prueba debe estar suspendido por medio de una cadena de plástico dentro de la cabina.
- El aislador pin 56-1 en la prueba de tensión de descarga en ambiente seco cumple de acuerdo con las características de fabricación, resistiendo satisfactoriamente a dichas pruebas, mientras que al estar expuesto en un ambiente húmedo presenta fallas a tensiones superiores a la que fue construido, dando como resultado una alta confiabilidad y seguridad a la red de distribución de 22Kv.
- En las pruebas del BIL se realizó 5 impulsos tipo rayo en ambiente seco y húmedo, en estos dos ambientes no se presentaron descargas disruptivas debido que Bil máximo que se obtiene en el laboratorio de AT de la UPS es de 108.47kV en ambiente seco y 106.75kv en húmedo, cercano al valor requerido de 110kV. Lo que se afecta en esta prueba es la separación de las esferas cuando se encuentra en ambiente húmedo esta aumenta de 7.7mm a 8.5mm.
- Los resultados obtenidos se realizaron con un objeto en perfectas condiciones (nuevo), pero dichos resultados pueden variar de acuerdo con la condición del aislador, por lo cual se debe considerar el tiempo de uso y su deterioro.
- Los resultados obtenidos en pruebas en ambiente seco se presentan en la tabla 19, en la cual se puede observar que en tensiones de 70kV hay la presencia de DP's y la ruptura del aislador se da en tensiones superiores a los 90kV, mientras que los resultados de ambiente húmedo se presentan en la tabla 21, teniendo la presencia de DP's a tensiones de 50kV y la ruptura del aislador se da en tensiones superiores de 65kV.
- En las diferentes pruebas de ambiente húmedo la tensión se ve afectada o disminuida, debido que se reduce la distancia de aislamiento o fuga, esto sucede porque se forma una capa conductora de agua, en el faldón superior del aislador, mientras que el faldón inferior se encuentra relativamente seco, soportando toda la tensión desde borde donde se sujeta el cable hasta el final del faldón superior, produciendo que la ruptura o falla del aislador se de en voltajes menores que en ambiente en seco.
- La disminución de tensión en ambiente húmedo se ve afectada por la resistividad del agua que se utiliza en las pruebas, debido que, a menor resistividad mayor será la conductividad, para que los resultados obtenidos sean confiables es necesario regirse a la norma IEE std 4-2013.

## 5.2 Recomendaciones.

- Se recomienda que, al momento de requerir el agua para realizar pruebas eléctricas, la misma se la debe de regular a una resistividad de  $\pm 100\Omega * metros$  que exige la norma IEEE Std 4-2013.
- Un punto importante a tener en cuenta es la presión, la cual no es factible y recomendable elevar más del nivel máximo de 2 bares, por el hecho de que el área pequeña de trabajo que posee el laboratorio no permiten elaborar un prototipo de mayores dimensiones, tratando de producir una presión más alta para alcanzar una precipitación más elevada, siendo el diseño elaborado el ideal para el área que posee actualmente el laboratorio, dejando abierta la posibilidad de mejoras a futuro en el prototipo al momento que se considere ampliar más las dimensiones de trabajo del laboratorio de AT.
- La corrección atmosférica es un factor por considerar, debido que el elemento de prueba no siempre se utiliza en condiciones climáticas ópticas, esto varía considerablemente los valores predeterminados de construcción y funcionamiento.
- Antes de dar el pulso del BIL se debe ajustar la distancia entre esferas HV9125, para que no se accione el mismo por el efecto de campo generado del transformador y para que el impulso tipo rayo cumpla con las condiciones de 1.2/50  $\mu s$ .
- En las descargas parciales la adquisición y filtración de señales es de suma importancia, debido que es la base principal para descartar o determinar la existencia de DPs. Esto se corrobora en la adquisición de datos de la captura del osciloscopio **Figura 48**, donde no se puede observar un pico, mientras que, si se puede observar en la **Figura 49, 50** realizada la filtración de la señal.
- Este trabajo se puede continuar con pruebas en más elementos de alta tensión, como en los diferentes aisladores y pararrayos, determinando el efecto que causa al estar expuestos en un ambiente húmedo.

## 6 Bibliografía

- [1] D. Machado and S. De la Rosa, “Diseño y construcción de un simulador de lluvia para estudios hidrológicos,” *Univ. Dist. Fr. Jose Caldas, Bogota*, 2015.
- [2] E. Contreras and R. Boccardo, “Simulador de lluvia para ensayos de aislantes eléctricos de alta tensión,” *Universidad Simón Bolívar*, pp. 271–278.

- [3] IEEE, *IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques IEEE Power and Energy Society*. 2013.
- [4] K. Wang *et al.*, “Analysis on flashover performance of polluted porcelain insulators in high conductivity fog environment,” *Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, 2015.
- [5] J. Carreras, “Diseño y construcción de un simulador de lluvia,” Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, 2017.
- [6] IEC, “IEC Standard 60-1,” *Int. Electrotech. Comm.*, vol. 2000.
- [7] S. Malave, “Resistividad y Conductividad Standar del agua,” *Marzo*, 2011.
- [8] L. Landau, “Glosario de terminos Sistema Electrico Ecuatoriano,” *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki*, 2010.
- [9] IEC, “IEC 60270- High-voltage test techniques – Partial discharge measurements Techniques,” *Int. Electrotech. Comm.*, vol. 2000, no. 40, 2015.
- [10] R. Jimenes, V. Cantú, and A. Conde, “Aislamiento en líneas de transmisión aéreas,” *Directorio de la industria eléctrica de la República Mexicana*, pp. 1–19, 2014.
- [11] M. Pinazo *et al.*, “Contorneo y corriente de fuga de distintos aislamientos externos,” 2016.
- [12] S. Escobar, “Rediseño de la red de distribución para, el mejoramiento de la calidad de producto del ‘Barrio Osorio’, ubicado en el sector de cochapamba, al norte de Quito,” Universidad Politécnica Salesiana- sede Quito, 2008.
- [13] Grupo EPM, “Especificación técnica aisladores eléctricos,” 2015.
- [14] A. Bustos, “Ensayos de aisladores de porcelana y vidrio,” pp. 54–71, 2012.
- [15] A. León, “Consideraciones en la selección de aisladores bajo condiciones de contaminación,” *Electroporcelana Gamma S.A.*
- [16] P. Saltos, “El proceso de contaminación del aislamiento eléctrico externo,” *Curso Contam. Aisl. eléctrico*, p. 182, 2014.
- [17] IEEE Power and Energy Society, *IEEE 1313.2 Guide for the Application of Insulation Coordination*. 1999.
- [18] IEEE Power and Energy Society, “IEEE Standard for Insulation Coordination—Definitions, Principles, and Rules,” *Engineering*, vol. 1996, 1996.
- [19] O. Portocarrero, “Determinación de los protocolos de prueba en alta tensión a ser aplicados en equipos y materiales utilizados en nivel de hasta 22kV,” Universidad Politécnica Salesiana- Sede Cuenca, 2012.
- [20] S. Jaime and C. Ramíre, “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,” Universidad de el Salvador, 2009.
- [21] Terco-UPS, “Alta Tensión Experimentos Terco-UPS,” *Laboratorio de Alta Tensión Universidad Politécnica Salesiana*.
- [22] M. Quizhpi and F. Gómez, “Determinación de las Condiciones de fuga, descargas parciales y superficiales en aisladores mediante el análisis de corriente,” Universidad Politécnica Salesiana - Sede Cuenca, 2017.
- [23] M. Rojas, “Sensor de acoplamiento inductivo para la medida de pulsos de corriente de alta

- frecuencia. Aplicación para la medida y detección de descargas parciales,” Universidad Carlos III de Madrid, 2011.
- [24] R. Albarracin, “Medida de descargas parciales en radiofrecuencia,” Universidad Carlos III de Madrid, 2014.
- [25] ANSI, “Test Methods for Electrical Power Insulators ANSI C29.1,” *American National Standards Institute*, vol. 1988, New York.
- [26] Ijasa, “Tabla de propiedades técnicas de los polímeros,” *Rochling plásticos de ingeniera*.

## 7 Anexos

### 7.1 Anexo 1

#### 7.1.1 Datasheet de los aspersores COOLNEET PRO

##### NEBULIZADOR COOLNET PRO

El nebulizador Coolnet Pro está recomendado para la reducción de temperatura y la humidificación en invernaderos y en plataformas de enraizamiento.

##### » Características generales

- Proporciona un tamaño de gota promedio de 65micras.
- Rango de presión: 3,0-5,0 bar.
- Está fabricado con materiales plásticos resistentes a ácidos (AA).
- Diseñado sin puente para evitar que gotee.
- Pueden montarse boquillas cerradas para convertir el nebulizador a una, dos o tres salidas.
- No se requieren herramientas para desmontarlo.
- Dispone de accesorios y microtubo de gama gris para potenciar la luz difusa y reducir el calentamiento del agua.
- Las boquillas para el nebulizador Coolnet Pro son:

Boquilla verde claro	5,5 l/h
Boquilla plateada	7,5 l/h
Boquilla naranja	(tapón, cerrada)
- Existen tres configuraciones posibles:



##### » Válvula AD

- La válvula AD (antidrenante) previene el drenaje de los laterales y optimiza el riego por pulsos.
- Todos los componentes de la válvula AD son resistente a ácidos, lo cual hace viable aplicaciones de productos agroquímicos.
- La válvula AD, que se fabrica en varios modelos, con distintas presiones de apertura y cierre, tiene un modelo especial para su aplicación en Coolnet Pro: es la AD40 (con indicador naranja) que abre a una presión de 40 m.c.a. y cierra a 18 m.c.a.
- La válvula AD30 abre a una presión de 30 m.c.a. y cierra a 15 m.c.a. y se podría usar en aquellos casos que se requiera o permita mojar el cultivo.



## 7.2 Anexo 2

### 7.2.1 Datasheet de las propiedades Técnicas del material grilon



**TABLA DE PROPIEDADES TECNICAS**



NOMENCLATURA INTERNACIONAL			SUSTAMID 6	SUSTAMID 6 OL	SUSTAMID 6 MO	SUSTARN C	POLYSTONE P	POLYSTONE G	POLYSTONE M	TEFLON®
			NY 6	NY 6 + ACEITE	NY 6 + MOS2	POM Copo	PP Homo	PE-HMW	UHMW-PE	PTFE
<b>PROPIEDADES FISICAS</b>										
Densidad	g/cm³	Normas	1,14	1,15	1,14	1,41	0,91	0,95	0,93	2,18
Absorción de Humedad	%	DIN en ISO 62	2,50	2,00	2,50	0,20	< 0,10	0,00	0,00	0,00
Resistencia UV	---	---	☉	☉	●	☉	☉	☉	☉	---
Contacto con Alimentos	---	---	☉	☉	☉	☉	☉	☉	☉	☉
Resistencia al Desgaste	---	---	---	---	---	---	☉	☉	☉	☉
Rozamiento por Deslizamiento	---	---	---	---	---	---	☉	☉	☉	---
<b>PROPIEDADES MECANICAS</b>										
Tensión de Ruptura	MPa	DIN en ISO 527	75	70	80	67	32	22	20	---
Elongación de Ruptura	%	DIN en ISO 527	> 45	> 30	> 50	30	> 50	> 50	> 200	---
Modulo de elasticidad a la Tracción	MPa	DIN en ISO 527	3400	3300	3200	2800	1300	800	700	700
Resistencia al Impacto	KJ/m²	DIN en ISO 179	> 3,0	> 4,0	> 3,0	6,0	4,0	12,0	---	---
Resistencia a la Penetración de Esfera	MPa	DIN en ISO 2039-1	180	170	180	150	80	150	150	40
Dureza SHORE	Shore D	DIN en ISO 868	83	82	82	81	72	63	63	55
<b>ELABORACION</b>										
Tenacidad Embutido	---	---	---	---	---	---	☉	☉	☉	---
Adhesividad	---	---	---	---	---	---	☉	☉	☉	---
Capacidad de Soldadura	---	---	---	---	---	---	☉	☉	☉	---
<b>PROPIEDADES TERMICAS</b>										
Temperatura de Fusión	°C	DIN 53736	216	213	220	165	165	135	135	325
Capacidad de conducir Calor	W/Km	DIN 52612	0,25	0,25	0,23	0,31	0,2	0,4	0,4	0,25
Capacidad Calórica	kJ/(kg.K)	DIN 52612	1,7	1,7	1,7	1,5	1,7	1,9	1,9	1
Coefficiente de Dilatación Lineal Térmica	10⁻⁶/K	DIN 53752	80	80	90	110	160	190	190	20
Temperatura de Uso Prolongado	°C	---	-40/110	-40/110	-40/85	-50/100	-10/100	-50/80	-250/80	-200/260
Temperatura de Uso Corto	°C	---	170	160	160	140	150	100	130	260
Resistencia a Deformación Térmica	°C	DIN en ISO 75	95	90	95	110	90	67	79	---
<b>PROPIEDADES ELECTRICAS</b>										
Coefficiente Dieléctrico	---	IEC60250	3,7	---	---	3,5	2,2	2,3	2,3	2,1
Factor de Pérdida Dieléctrica	---	IEC60250	0,02	---	---	0,02	0,0002	0,0002	0,0001	0,0002
Resistencia Especifica de Paso	Ω cm	IEC60093	10¹⁵	10⁸	---	10¹³	10¹⁴	10¹⁴	10¹⁴	10¹⁵
Resistencia Superficial	Ω	---	10¹³	10⁹	---	10¹³	10¹⁴	10¹⁴	10¹⁴	10¹⁵
Rigidez Dieléctrica	KV/mm	IEC60243	20	20	---	40	45	45	45	289

☉ Malo

☉ Moderado

☉ Satisfactorio

☉ Bueno

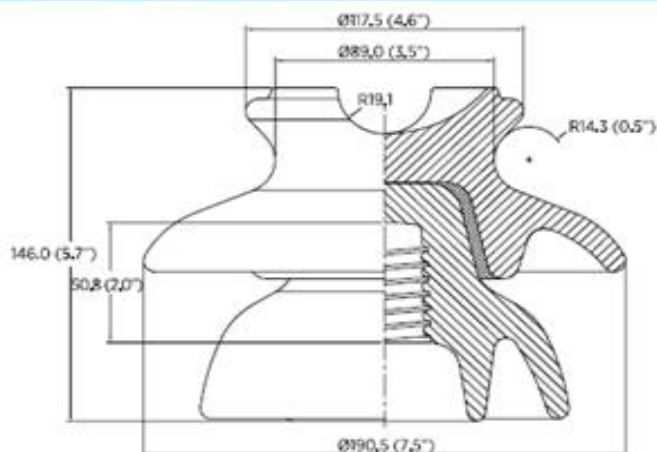
● Muy bueno

## 7.3 Anexo 3

### 7.3.1 Datasheet del aislador pin 56-1



#### AISLADORES TIPO PIN High voltage pin insulators



#### 8345-8346

NÚMERO DE CATÁLOGO	8345	8346
Clase ANSI C29.6	56-1	56-1
DISTANCIAS CRÍTICAS, mm		
Distancia de arco	178	178
Distancia de fuga	330	330
Altura mínima del espigo	152	152
VALORES MECÁNICOS		
Resistencia al cantilever, kN	11,1	11,1
VALORES ELÉCTRICOS, kV		
Voltaje típico de aplicación	23	23
Flameo de baja frecuencia en seco	95	95
Flameo de baja frecuencia en húmedo	60	60
Flameo crítico al impulso positivo	150	150
Flameo crítico al impulso negativo	190	190
Voltaje de perforación a baja frecuencia	130	130
RADIO INFLUENCIA		
Esmalte RF	NO	SI
Voltaje de prueba RMS a tierra, kV	15	15
RIV máximo a 1,000 kHz, µV	8,000	100
DATOS DE EMPAQUE		
Peso neto por unidad, kg	3,15	3,15

**Nota 1:** Dimensiones en mm (pulgadas).

**Nota 2:** Esmalte café o esmalte gris ANSI 70.

CATALOG NUMBER	8345	8346
ANSI Class C29.6	56-1	56-1
CRITICAL DISTANCE, mm		
Dry arcing distance	178	178
Leakage distance	330	330
Minimum pin height	152	152
MECHANICAL VALUES		
Cantilever strength, kN	11,1	11,1
ELECTRICAL VALUES, kV		
Typical application voltage	23	23
Low-frequency dry flashover	95	95
Low-frequency wet flashover	60	60
Critical impulse flashover, positive	150	150
Critical impulse flashover, negative	190	190
Low-frequency puncture voltage	130	130
RADIO INFLUENCE VOLTAGE DATA		
Conductive glaze	NO	SI
Low-frequency test voltage, RMS to ground	15	15
Maximum RIV at 1,000 kHz, µV	8,000	100
PACKING DATA		
Net weight, kg	3,15	3,15

**Note 1:** Dimensions in mm (in).

**Note 2:** ANSI 70 gray is standard. Brown available by request.

## 7.4 Anexo 4

### 7.4.1 DP's en ambiente seco

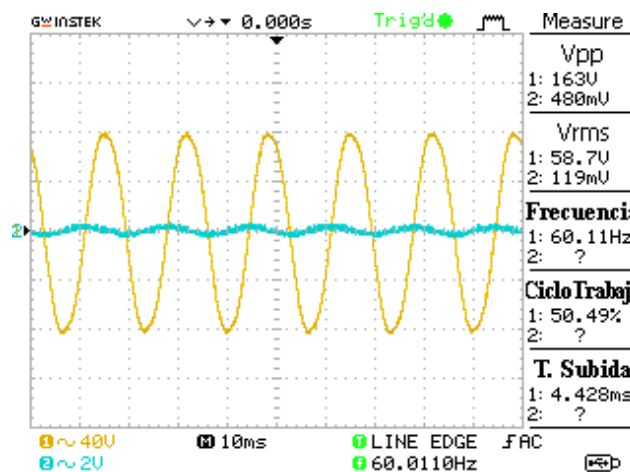


Figura 1. Prueba a 5kV

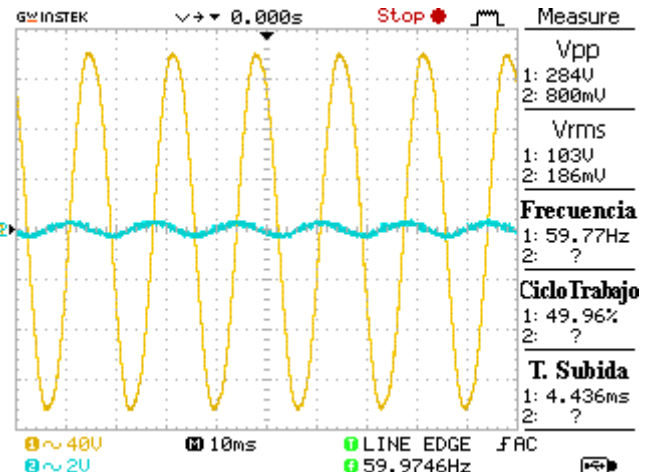


Figura 2. Prueba a 10kV

Figura 3. Prueba a 15kV

Figura 4. Prueba a 20kV

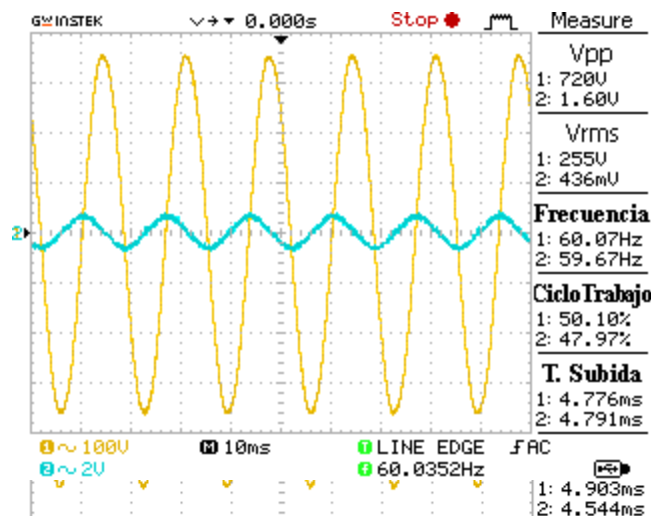


Figura 5. Prueba a 25kV

Figura 6. Prueba a 30kV

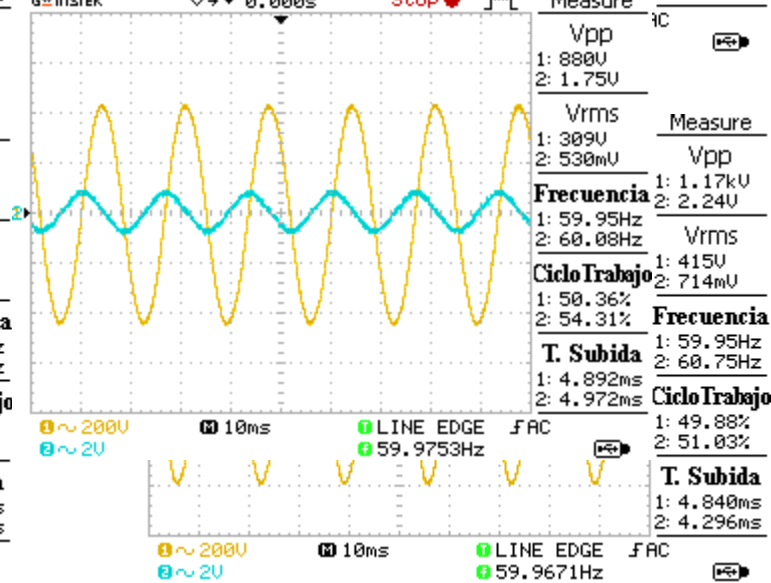
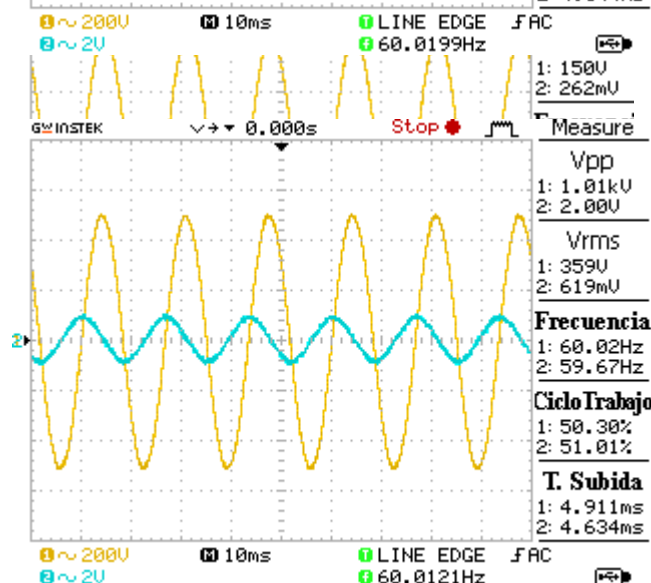
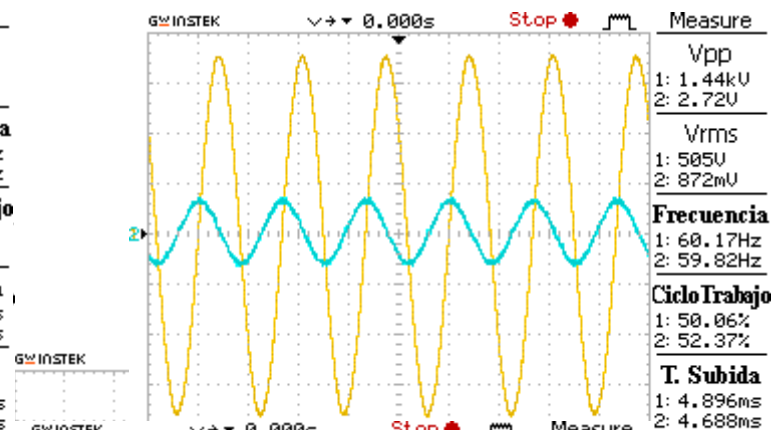


Figura 7. Prueba a 35kV

Figura 9. Prueba a 45kV

Figura 11. Prueba a 55kV

Figura 8. Prueba a 40kV

Figura 10. Prueba a 50kV

Figura 12. Prueba a 60kV

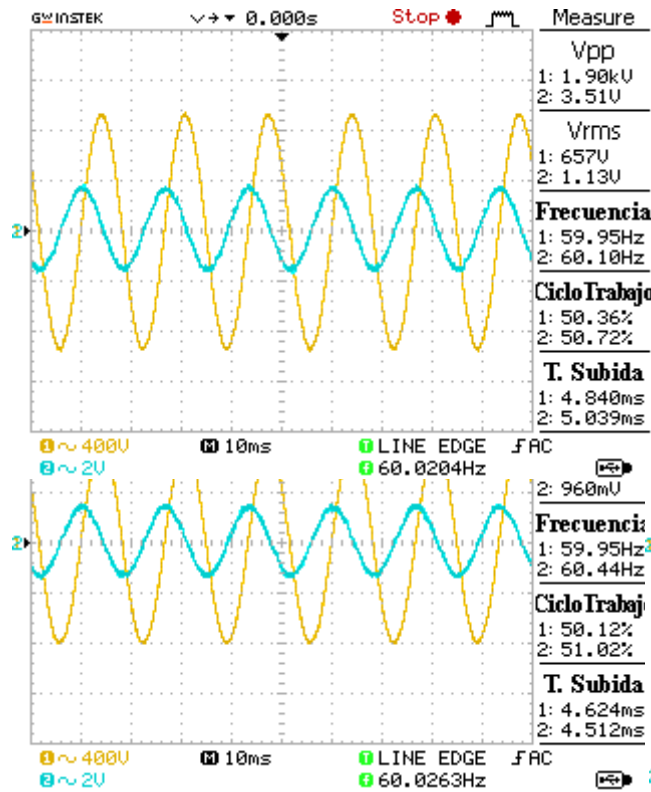


Figura 13. Prueba a 65kV

Figura 14. Prueba a 70kV

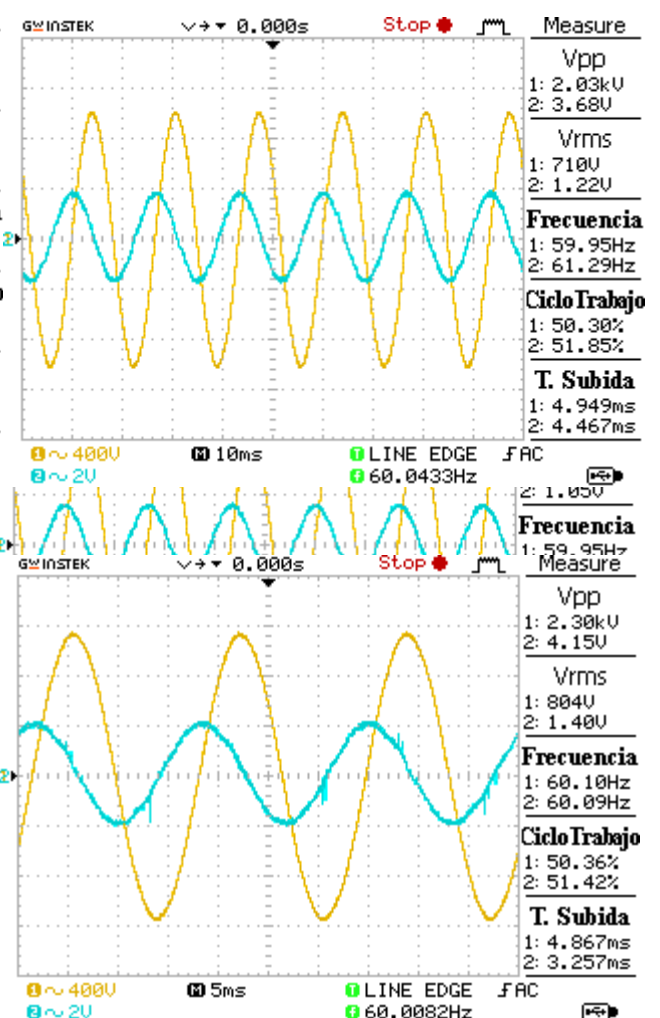
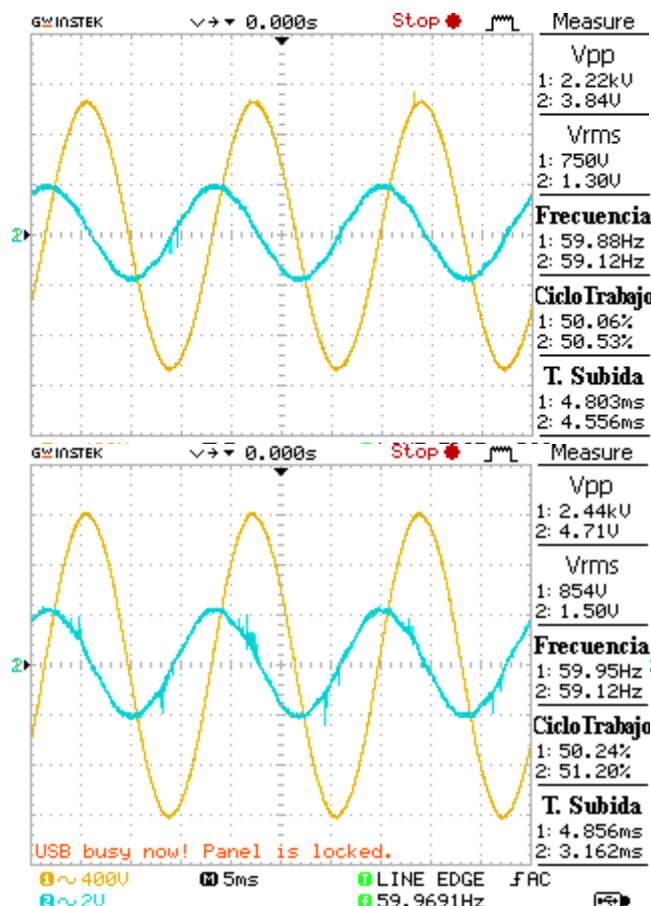
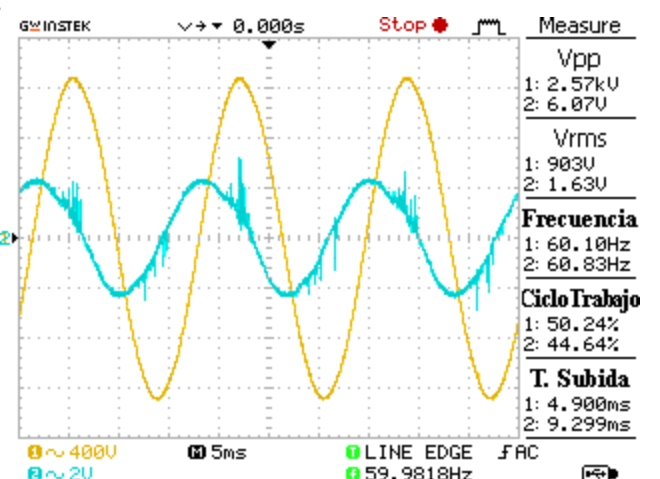


Figura 15. Prueba a 75kV

Figura 16. Prueba a 80kV

Figura 17. Prueba a 85kV

Figura 18. Prueba a 90kV



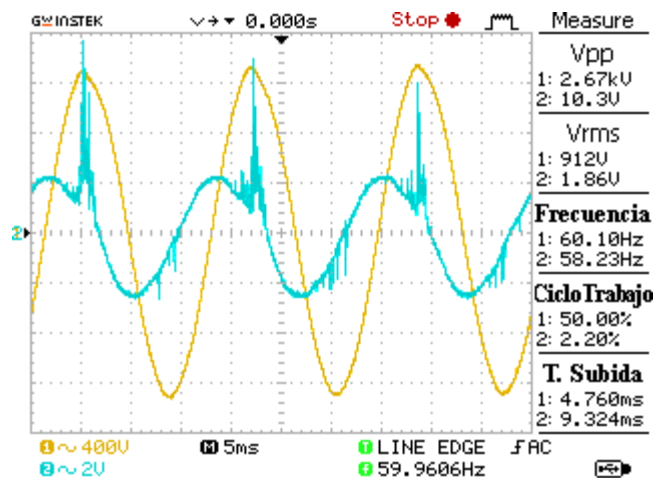


Figura 17. Prueba a 91 kV

## 7.5 Anexo 5

### 7.5.1 DPs en ambiente húmedo

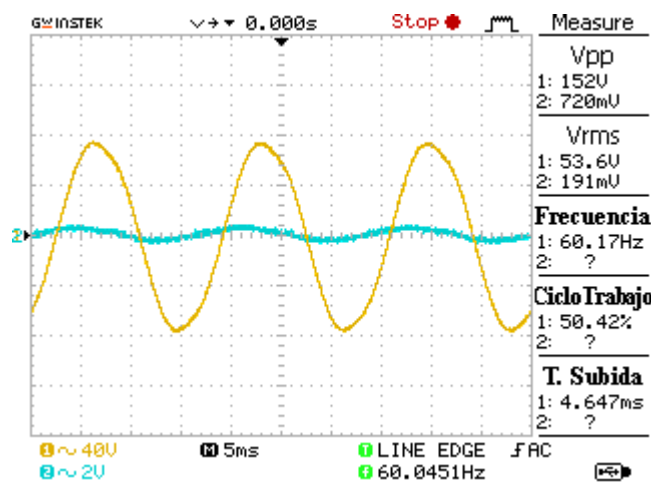


Figura 1. Prueba a 5kV

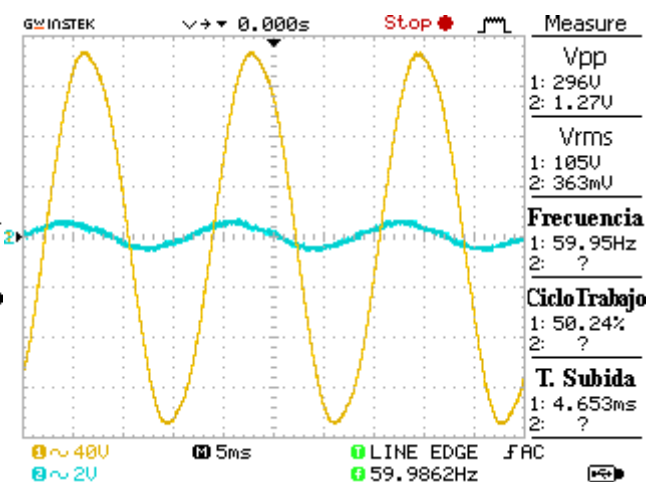
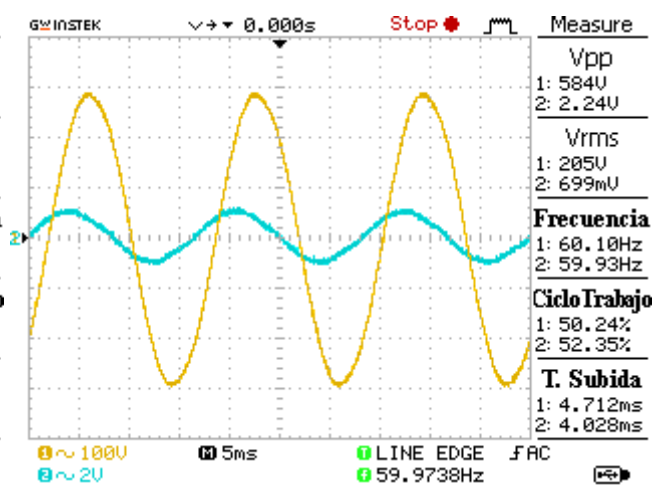
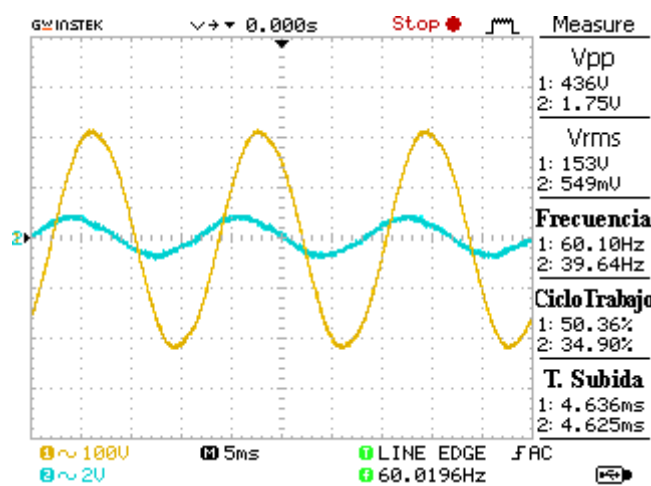


Figura 2. Prueba a 10kV

Figura 3. Prueba a 15kV

Figura 4. Prueba a 20kV



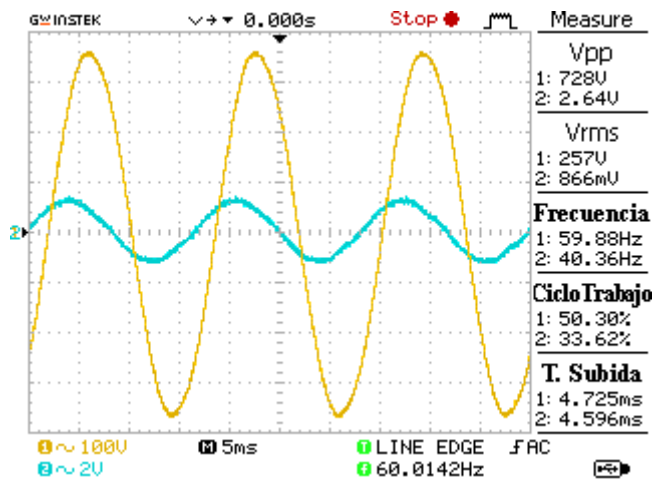


Figura 5. Prueba a 25kV

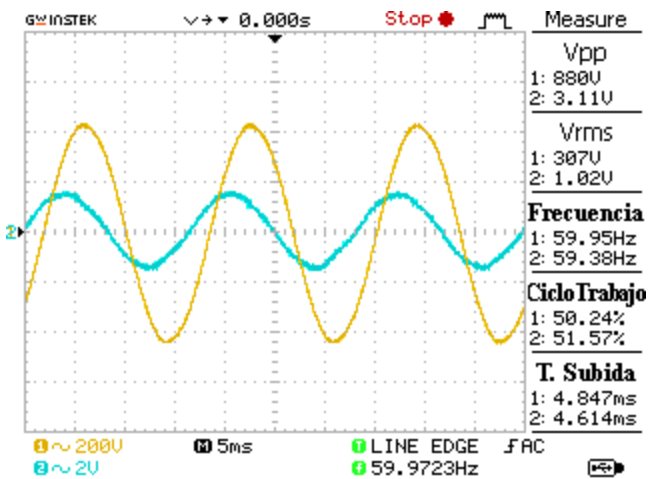


Figura 6. Prueba a 30kV

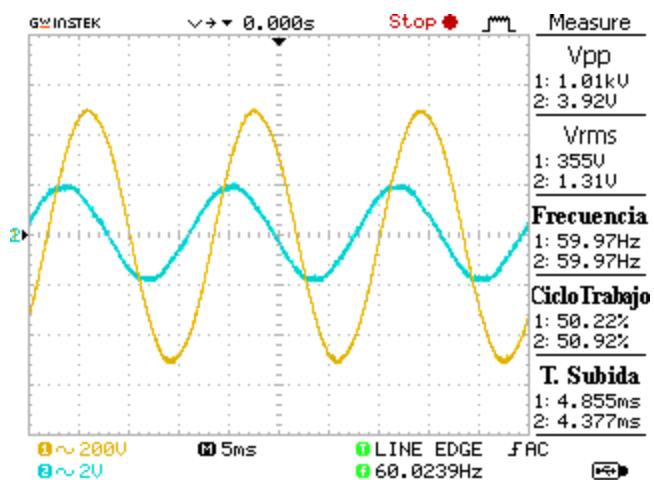


Figura 7. Prueba a 35kV

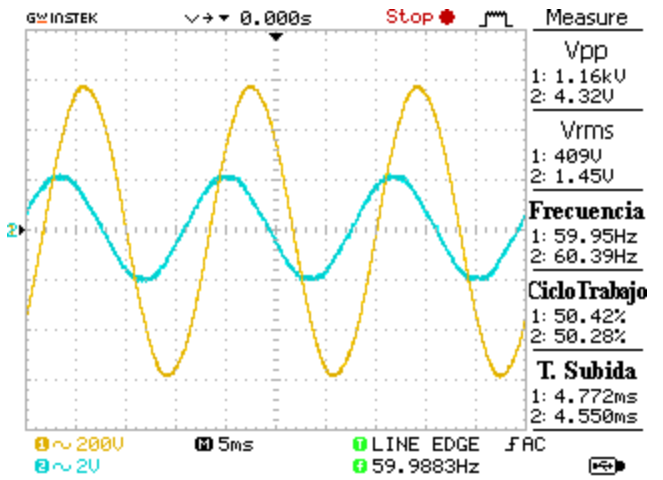


Figura 8. Prueba a 40kV

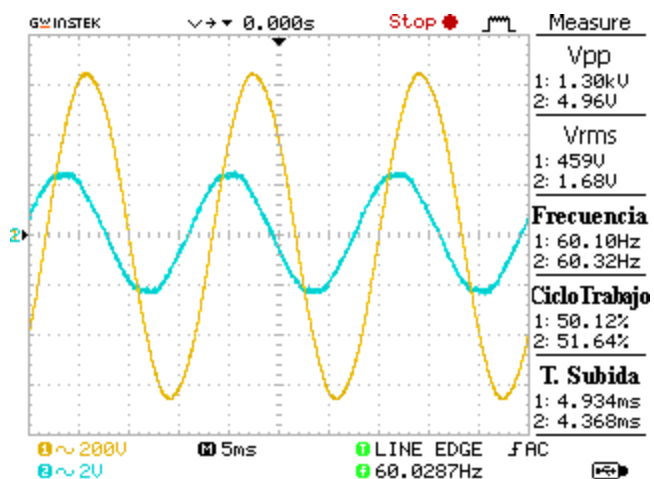


Figura 9. Prueba a 45kV

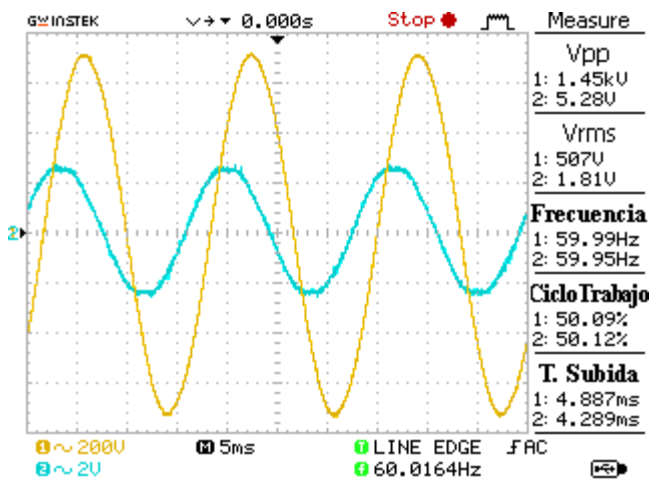


Figura 10. Prueba a 50kV



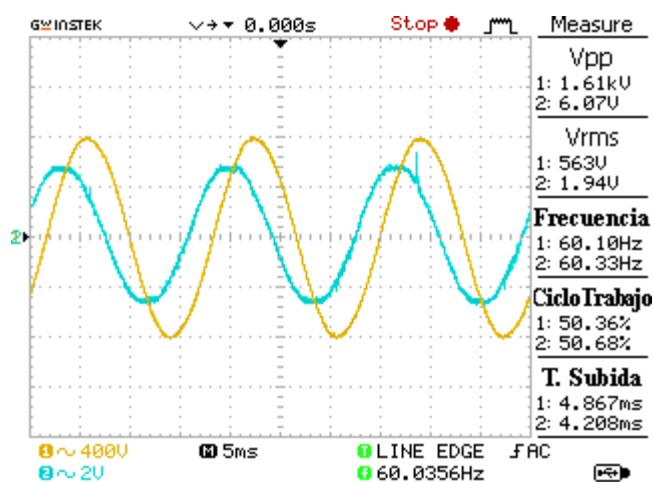


Figura 11. Prueba a 55kV

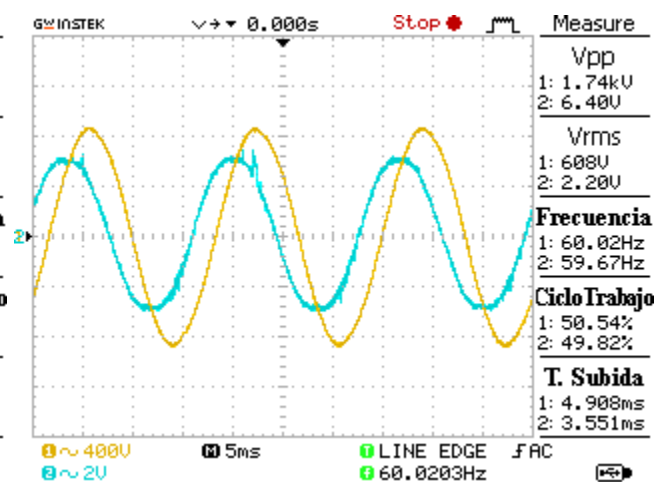
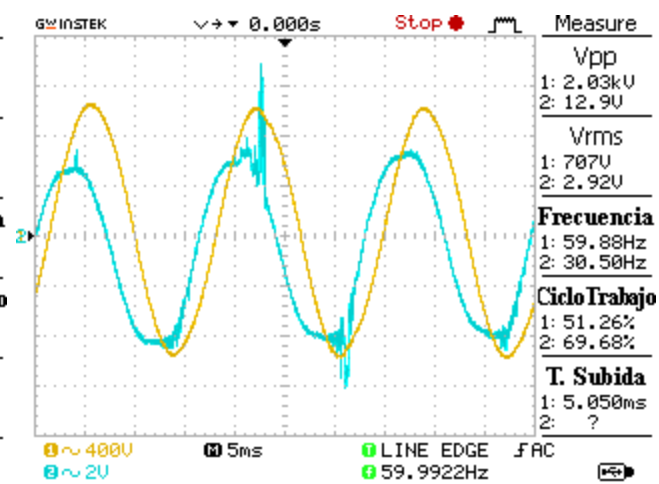
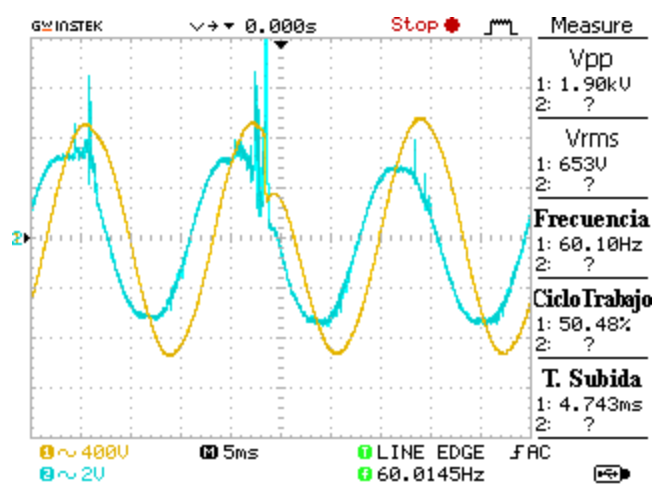


Figura 12. Prueba a 60kV

Figura 13. Prueba a 65kV

Figura 14. Prueba a 70kV



## 7.6 Anexo 6

### 7.6.1 TD en ambiente seco

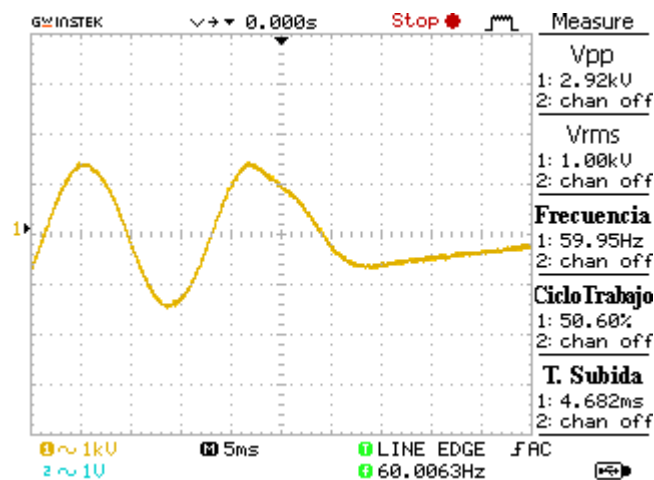


Figura 1. Prueba a 100kV

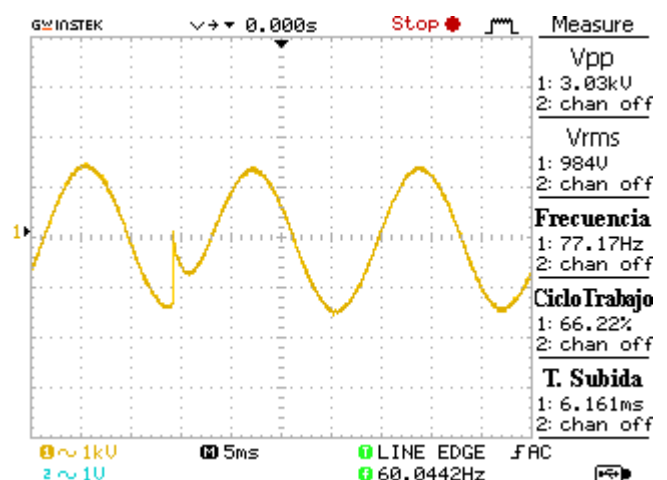


Figura 2. Prueba a 98.4kV

Figura 3. Prueba a 100kV

Figura 4. Prueba a 100.1kV

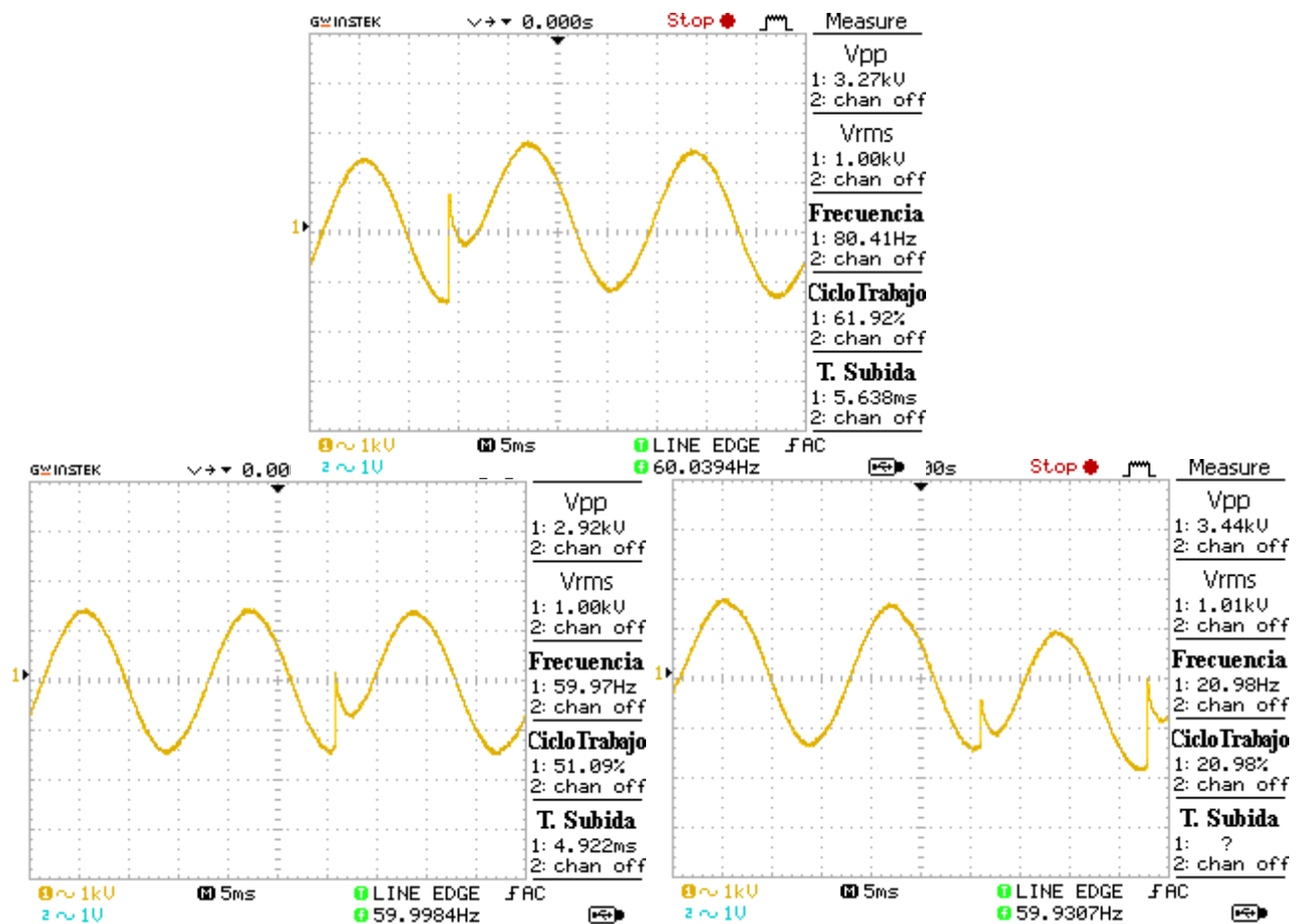


Figura 5. Prueba a 100kV



## 7.7 Anexo 7

### 7.7.1 TD en ambiente húmedo

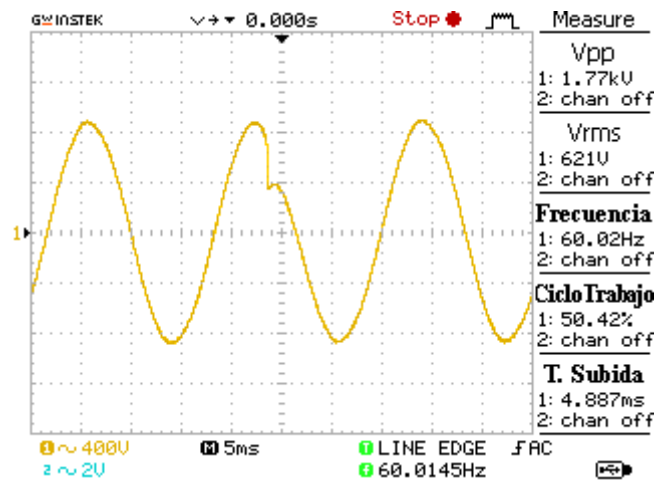


Figura 1. Prueba a 62.1kV

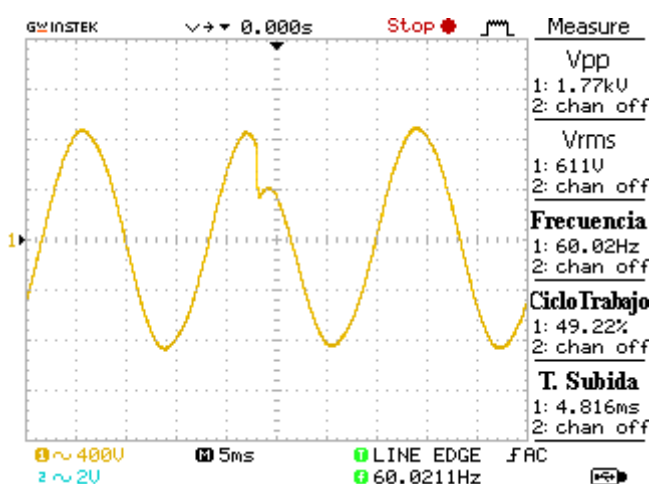


Figura 2. Prueba a 61.1kV

Figura 3. Prueba a 63.4kV

Figura 4. Prueba a 63.8kV

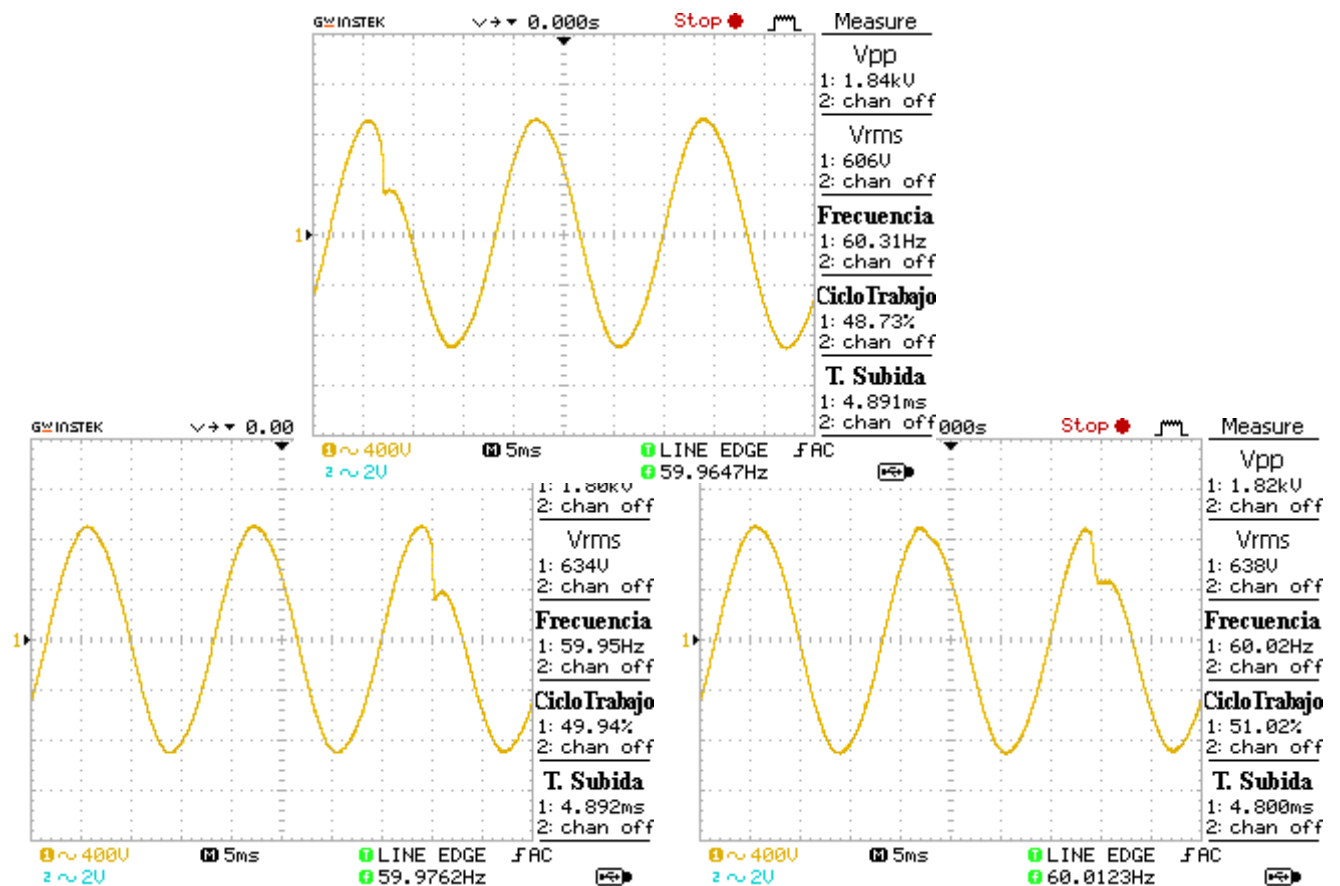


Figura 5. Prueba a 60.6kV

