

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



Trimpot Electronicas Ltda

Diseño del sistema de control tipo batch para las pruebas de vida útil de  
10A 10/1000 $\mu$ s de los componentes GDT

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero  
en Electrónica con grado académico de Licenciatura

Alberto Castro González

Cartago. Noviembre, 2018

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

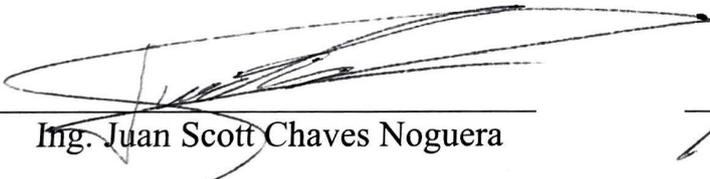
**PROYECTO DE GRADUACIÓN**

**ACTA DE APROBACIÓN**

**Defensa de Proyecto de Graduación  
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica  
Grado Académico de Licenciatura  
Instituto Tecnológico de Costa Rica**

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del proyecto de graduación denominado Diseño del sistema de control tipo batch para las pruebas de vida útil de 10A 10/1000 $\mu$ s de los componentes GDT, realizado por el señor Alberto Castro González y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador

  
Ing. Juan Scott Chaves Noguera

Profesor lector

  
Ing. Carlos Mauricio Segura Quirós

Profesor lector

  
Ing. Leonardo Rivas Arce

Profesor asesor

Cartago, 20 de noviembre, 2018

## Declaración de Autenticidad.

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado, en su totalidad, por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado material bibliográfico, he procedido a indicar las fuentes mediante citas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Alberto Castro', with a large, sweeping flourish underneath.

---

Alberto Castro González  
Cédula: 1-1622-0210

## Resumen

Las pruebas lifetest  $10 \times 1000 \mu s$  son procesos de control de calidad para los componentes GDT. El sistema encargado de recrear estas pruebas actualmente en la empresa es muy antiguo y empieza a mostrar carencias importantes, entre ellas la más destacada es el bajo nivel de automatización, especialmente en la preparación de las pruebas, ya que estas requieren gran aporte del usuario para generar cada prueba. Este trabajo muestra el proceso de diseño de un algoritmo para el sistema automático tipo batch, capaz de lograr un nivel de automatización mayor para la prueba. Para esto se utilizó la herramienta de LabView con el fin de obtener un sistema más completo con una interfaz gráfica más intuitiva. A lo largo del trabajo se mostrarán los resultados obtenidos para el algoritmo diseñado y se respaldarán los resultados obtenidos con el estándar ITU-T k.12.

**Palabras Clave:** Pruebas de vida útil; voltaje DCBD; Resistencia de aislamiento; Automatización; GDT; Impulsos de corriente; LabView; GPIB.

## Abstract

The  $10 \times 1000 \mu s$  lifetest are quality control processes performed on the GDT components. The system in charge of recreate this tests in the company is very old and show important deficiencies in the process. Among them, the most important lack in the system is the low level of automation, especially in the preparation of the test, because this system require a great contribution of the operator to generate the lifetest. This project shows the process of designing an algorithm for automatic batch type system, capable of increase the automation level for the test. The LabView tool was used to achieve a complete system with a more intuitive graphical interphace. Throughout this work the results obtained for the design algorithm will be shown and will be supported with the ITU-T k.12 standard.

**Keywords:** Lifetest; DCBD voltage; Insulation Resistance; Automation; GDT; Current transient; LabView; GPIB.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Control Automático utilizando LabView.</b>	<b>2</b>
2.1. Automatización y Sistemas de control por lotes. . . . .	2
2.1.1. Automatización Industrial. . . . .	2
2.1.2. Tipos de control. . . . .	3
2.1.3. Niveles de Automatización Industrial. . . . .	3
2.2. LabView. . . . .	5
2.2.1. Programación en LabView. . . . .	5
2.2.2. Desarrollo de control automático mediante LabView . . . . .	7
<b>3. Pruebas Lifetest para los dispositivos GDT</b>	<b>8</b>
3.1. Tubos de Descarga de Gas(GDT, por sus siglas en inglés). . . . .	8
3.1.1. Principio de funcionamiento de los dispositivos GDT. . . . .	8
3.1.2. Operación de los GDT. . . . .	9
3.1.3. Pruebas Lifetest. . . . .	10
<b>4. Equipos de medición y protocolo de comunicación para las pruebas lifetest</b>	<b>12</b>
4.1. Comunicación GPIB. . . . .	12
4.1.1. Bases del GPIB. . . . .	12
4.1.2. Características del bus GPIB. . . . .	12
4.1.3. Señales lógicas del bus GPIB. . . . .	14
4.2. Comunicación con los <i>fixtures</i> para GDT. . . . .	14
4.2.1. Interfaz entre la tarjeta de circuito impreso y el sistema de control. . . . .	14
4.3. Programación del equipo de medición. . . . .	17
4.3.1. Sourcemeter Keithley 2410. . . . .	17
4.3.2. Osciloscopio Agilent 54624A. . . . .	19
<b>5. Diseño del algoritmo de control.</b>	<b>21</b>
5.1. Diagrama general del proceso por lotes. . . . .	21
5.2. Prueba de medición del valor de Resistencia de Aislamiento (IR, por sus siglas en inglés). . . . .	22
5.2.1. Principios de la prueba. . . . .	22
5.2.2. Diseño de la lógica para las pruebas de medición de IR. . . . .	22
5.3. Prueba de medición del DC Breakdown Voltage (DCBD). . . . .	25
5.3.1. Principios de la prueba. . . . .	25

5.3.2.	Diseño de la lógica para las pruebas DCBD. . . . .	25
5.4.	Prueba de impulso de corriente 10x1000 $\mu$ s . . . . .	28
5.4.1.	Principios de la prueba. . . . .	28
5.4.2.	Diseño de la lógica para los impulsos 10x1000 $\mu$ s. . . . .	29
5.5.	Diseño del algoritmo principal de control. . . . .	31
5.5.1.	Lógica secuencial de las subrutinas en el algoritmo principal. . .	31
5.5.2.	Sistema productor/consumidor de LabView. . . . .	31
5.5.3.	Lógicas para la interacción con el usuario en la interfaz gráfica. .	33
5.5.4.	Lógicas de almacenamiento de resultados. . . . .	37
<b>6.</b>	<b>Resultados.</b>	<b>40</b>
6.1.	Pruebas IR. . . . .	40
6.2.	Pruebas DCBD. . . . .	41
6.3.	Pruebas de impulsos de corriente. . . . .	43
6.4.	Interfaz gráfica. . . . .	46
6.5.	Almacenamiento de datos. . . . .	49
6.6.	Tiempos de Ejecución. . . . .	51
6.7.	Nivel de automatización. . . . .	51
<b>7.</b>	<b>Análisis de resultados.</b>	<b>54</b>
7.1.	Pruebas IR. . . . .	54
7.2.	Prueba DCBD. . . . .	54
7.3.	Pruebas de impulsos de corriente. . . . .	55
7.4.	Interfaz gráfica. . . . .	56
7.5.	Almacenamiento de datos. . . . .	57
7.6.	Tiempos de ejecución. . . . .	57
7.7.	Nivel de automatización. . . . .	58
<b>8.</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones.</b>	<b>60</b>
8.1.	Conclusiones. . . . .	60
8.2.	Recomendaciones. . . . .	60
	<b>Apéndices</b>	<b>62</b>
<b>A.</b>		<b>63</b>
A.1.	Abreviaturas . . . . .	63
A.2.	Glosario . . . . .	63
A.3.	Resultados de la interfaz entre conectores . . . . .	64
A.4.	Excel producto del algoritmo de almacenamiento. . . . .	65
A.5.	Programas en LabView. . . . .	66
	<b>Anexos</b>	<b>71</b>
<b>B.</b>		<b>72</b>
B.1.	Estándar ITU-T k.12 . . . . .	72
	<b>Referencias</b>	<b>83</b>

# Índice de figuras

2.1.	Diagrama básico de un sistema automático por lotes. . . . .	2
2.2.	Taxonomía de los niveles de automatización propuesta por Kaber y Endsley. . . . .	4
2.3.	Ejemplo base de LabView de una estructura Productor/Consumidor.	6
3.1.	Configuración de operación en modo común. . . . .	9
3.2.	Configuración de operación en modo diferencial . . . . .	9
3.3.	Respuesta teórica al impulso de un GDT ideal. . . . .	10
3.4.	Curvas de corriente $10/1000\mu s$ . . . . .	11
4.1.	Distribución de la líneas del bus GPIB. . . . .	13
4.2.	PCB que contiene los <i>fixtures</i> para los GDT y los circuitos analógicos para la selección de los mismos. . . . .	15
4.3.	Tarjeta de adquisición de datos PCIe-6509 de National Instruments.	15
4.4.	Conector D-sub de 50 pines. . . . .	16
4.5.	Conector D-type 0.050 series 100 pines. . . . .	16
4.6.	Tipos de barridos permitidos para la salida del sourcemeter keithley 2410. . . . .	18
5.1.	Diagrama general del sistema de control por lotes. . . . .	21
5.2.	Algoritmo para la prueba de resistencia de aislamiento para las pruebas de vida útil de GDT. . . . .	23
5.3.	Algoritmo para la inicialización del sourcemeter keithley 2410. . . . .	24
5.4.	Algoritmo para la medición de la resistencia de aislamiento de los GDT.	24
5.5.	Algoritmo para la prueba de DC breakdown para las pruebas de vida útil de GDT. . . . .	26
5.6.	Programación en LabView para la inicialización del osciloscopio Agilent 54624A. . . . .	27
5.7.	Programación del escalón de voltaje con el keithley 2410. . . . .	27
5.8.	Programación de la subrutina de la prueba DC breakdown voltage. .	28
5.9.	Diagrama del generador de curvas $10x1000\mu s$ . . . . .	29
5.10.	Algoritmo para la prueba de impulso de corriente $10/1000\mu s$ para las pruebas de vida útil. . . . .	30
5.11.	Algoritmo para las pruebas de vida útil. . . . .	31
5.12.	Algoritmo general para las pruebas de vida útil. . . . .	31
5.13.	Estructura del ciclo productor. . . . .	32
5.14.	Algoritmo del ciclo productor. . . . .	32
5.15.	Pantalla principal de la interfaz gráfica. . . . .	34

5.16.	Pantalla de resultados de IR de la interfaz gráfica. . . . .	35
5.17.	Pantalla de resultados DCBD de la interfaz gráfica. . . . .	36
5.18.	Pantalla de la interfaz gráfica para acceder a los resultados de las pruebas anteriores. . . . .	37
5.19.	Algoritmo para crear un archivo Excel donde se logren almacenar los datos obtenidos de las pruebas. . . . .	38
5.20.	Ruta de directorios donde se almacenarán los resultados. . . . .	39
6.1.	Medición de resistencia de aislamiento de 4 GDT. . . . .	41
6.2.	Prueba para determinar el comportamiento de las rampas generadas por el sourcemeter ke2410. . . . .	41
6.3.	Resultado de la prueba de la rampa de voltaje de 25-V con una pendiente de 2 kV/s. . . . .	42
6.4.	Resultados de las pruebas finales de DCBD con un GDT de 90V. . .	43
6.5.	Resultados máximos y mínimos de las pruebas DCBD. . . . .	43
6.6.	Tiempo de subida de la curva de corriente 10x1000 $\mu$ s. . . . .	44
6.7.	Tiempo de bajada de la curva de corriente 10x1000 $\mu$ s. . . . .	44
6.8.	Resultado de la prueba de <i>Impulse Spark-Over</i> con un GDT de 90V. .	45
6.9.	Resultado de la prueba de <i>Impulse Spark-Over</i> con dos GDT de 600V, un GDT en buen estado y otro dañado. . . . .	46
6.10.	Resultado de la prueba de DCBD con dos GDT de 600V, un GDT en buen estado y otro dañado. . . . .	46
6.11.	Comportamiento de la primera pantalla de la interfaz gráfica en la ejecución del programa. . . . .	47
6.12.	Resultados de IR en la interfaz gráfica en la ejecución del programa. .	48
6.13.	Resultados de DCBD en la interfaz gráfica en la ejecución del programa. .	49
6.14.	Ruta creado por el programa para guardar los resultados de las pruebas a 90V. . . . .	50
6.15.	Ruta creado por el programa para guardar los resultados de las pruebas de los GDT 2038 a 420V. . . . .	50
6.16.	Archivos generados por el programa para lograr almacenar los datos de la pruebas. . . . .	51
6.17.	Lista de valores posibles para el voltaje del DCBD. . . . .	52
6.18.	Valores posibles para el voltaje de la prueba de IR. . . . .	52
6.19.	Ejemplo de lista de modelos de GDT. . . . .	53
6.20.	Opciones de agregar y borrar modelos de GDT. . . . .	53
A.1.	Interfaz entre los conectores D-sub de 50 pines y el conector tipo D serie 0.050 de 100 pines . . . . .	64
A.2.	Excel generado para la prueba de 750 repeticiones del modelo 2038-42-SM-LF con polaridad positiva. . . . .	65
A.3.	Excel generado para la prueba de 750 repeticiones del modelo 2038-42-SM-LF con polaridad negativa. . . . .	66
A.4.	Algoritmo en LabView para la medición de la resistencia de aislamiento de los GDT. . . . .	66
A.5.	Programación del escalón de voltaje con el keithley 2410. . . . .	67
A.6.	Programación de la subrutina de la prueba DC breakdown voltage. .	67

A.7.	Configuración del osciloscopio para la prueba de impulso de corriente 10/1000 $\mu s$ . . . . .	67
A.8.	Estructura del ciclo consumidor implementando la rutina de medición del DCBD y del IR en LabView. . . . .	68
A.9.	Estructura del ciclo consumidor implementando las rutinas del impul- so 10x1000 en LabView. . . . .	68
A.10.	Lógica de almacenamiento de datos en LabView. . . . .	69
A.11.	Lógica para mostrar los resultados actuales de la prueba. . . . .	69
A.12.	Lógica de desconexión de los equipos y guardar los datos obtenidos. .	70

# Índice de tablas

4.1.	Combinaciones de los bits más significativos de la línea para los diferentes tipos de comandos en GPIB. . . . .	14
4.2.	Asignación de pines para la interfaz entre los conectores D50 y tipo D serie 0.050 de 100 pines. . . . .	17
4.3.	Comandos básicos para la programación del Sourcemeter Keithley 2410.	19
4.4.	Comandos básicos para la programación del Osciloscopio Agilent 54624A.	20
5.1.	Especificaciones del ITU-T k.12 para la medición de IR. . . . .	22
5.2.	Especificaciones del ITU-T k.12 para la medición del DCBD. . . . .	25
5.3.	Especificaciones para el control de los instrumentos de la prueba para la medición del DCBD. . . . .	25
5.4.	Métodos de prueba para los impulsos de descargas de corriente. . . . .	28
5.5.	Especificaciones para la prueba de impulsos de corriente $10 \times 1000 \mu s$ .	29
5.6.	Asignación de pines de la tarjeta PCIe-6509 para las funciones del generador de impulsos. . . . .	29
5.7.	Descripción de las rutinas del ciclo productor. . . . .	33
6.1.	Resultados de las pruebas de medición de la resistencia de aislamiento con una resistencia de prueba de $1000 \Omega$ y otra de $1 M \Omega$ . . . . .	40
6.2.	Tiempos de ejecución del algoritmo para lifetest 10A 10x1000 de GDT.	51
7.1.	Análisis de resultados de la interfaz gráfica. . . . .	56
7.2.	Nivel de automatización del sistema anterior. . . . .	58
7.3.	Análisis del nivel de automatización del sistema actual. . . . .	58

# Capítulo 1

## Introducción

La automatización de los procesos industriales es una práctica que ha tomado mucha popularidad en las últimas décadas, esto debido a la gran versatilidad que brindan los sistemas electrónicos en estos procesos, logrando disminuir los errores, por ende logrando una mayor producción, de mejor calidad y en un menor tiempo. Los sistemas automáticos pueden aplicarse en gran cantidad de áreas industriales, en este caso se hará mención al control de calidad ya que es el área donde se realizará este proyecto. El control de la calidad es un área de gran importancia en cualquier industria ya que se encarga de comprobar que los productos cumplen con estándares, para poder así, asegurar al consumidor que su producto funciona correctamente y su calidad es verificada, muchas veces, por entes internacionales.

En Trimpot Electronics Ltda. se desarrollan productos relacionados con las áreas de la electrónica. Entre los componentes que la empresa desarrolla se hablará más concretamente sobre los Tubos de Descarga de Gas o GDT (por sus siglas en inglés). Estos dispositivos son desarrollados para la protección de equipos electrónicos por su capacidad de descargar altas tensiones eléctricas. Estos componentes requieren ser probados con diversos métodos para poder confirmar su funcionamiento, estos métodos de prueba se pueden encontrar en la norma ITU-T k.12. Entre todos los métodos listados en esta norma antes mencionado, podemos resaltar el *lifetest* o pruebas de vida útil, específicamente el *lifetest 10x1000 $\mu$ s*. Esta prueba consiste en aplicar repetidos pulsos de corriente al componente, con el fin de lograr determinar la capacidad del dispositivo a resistir estos impulsos.

El principal problema con el algoritmo del sistema actual es su bajo nivel de automatización, ya que no posee la capacidad de generar las pruebas sin el soporte del operario, lo que aumenta el tiempo de preparación de las pruebas, además que aumenta la posibilidad de errores en la misma.

En el proyecto se realizará el diseño de un algoritmo para un sistema automático tipo batch, que sea capaz de generar dichas pruebas cumpliendo con las especificaciones de la norma ITU-T k.12, pero que a su vez sea capaz de brindar una mayor versatilidad al operario, con esto lo que se busca es que el operario pueda modificar ciertos parámetros de la prueba sin que este tenga que intervenir directamente en la generación de la misma, ya que la generación será realizada al 100 % por el algoritmo. Con esto se busca aumentar la seguridad de la prueba, además de lograr una interfaz con el operario más amigable, que permita aumentar la eficiencia en el desarrollo de este proceso.

# Capítulo 2

## Control Automático utilizando LabView.

### 2.1. Automatización y Sistemas de control por lotes.

#### 2.1.1. Automatización Industrial.

La automatización se puede definir como el proceso por el cual un sistema obtiene la capacidad de reaccionar de manera automática (es decir sin intervención del operario) a los cambios que se pueden presentar en las variables del sistema. En el diagrama mostrado en la figura 2.1 podemos observar como es el diagrama básico de un sistema de control por lotes.

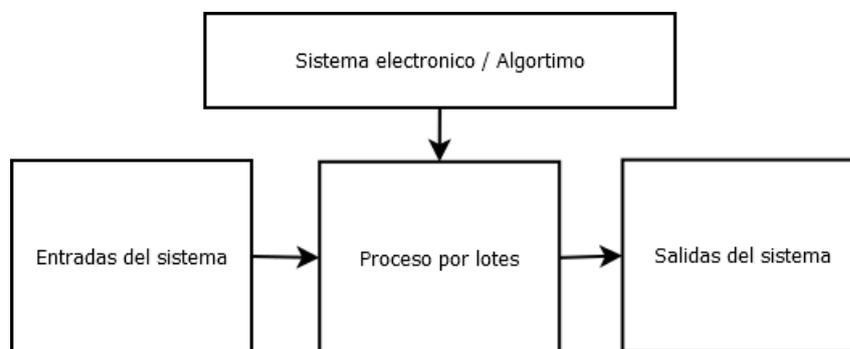


Figura 2.1: Diagrama básico de un sistema automático por lotes.

De la figura 2.1 se observa que el sistema de control por lotes se basa en un proceso, en el cual se recibe parámetros de entrada, basados en los valores de estos parámetros se realiza una rutina o proceso del cual se obtiene una serie de parámetros de salida. El proceso de este sistema normalmente se compone de varias etapas, de las cuales cada etapa depende de la anterior para continuar, por lo que este sistema se conoce como un sistema no lineal.

Los sistemas de control pueden implementarse de distintas maneras según sea la dificultad o extensión de estos. Pueden realizarse controles de sistemas cableados, que se logran mediante uniones físicas entre los componentes del sistema, muchas veces estos sistemas son controles mecánicos. Otra opción es implementar un sistema de control

programado el cual, la mayor parte del tiempo, se trata de un microprocesador que se encarga de realizar una rutina de instrucciones para el control de la máquina o proceso, las decisiones del algoritmo están basadas en variables de entrada dadas, ya sea por el usuario o por sensores en el sistema.

### **2.1.2. Tipos de control.**

La automatización industrial se puede dividir en varios tipos dependiendo de lo que se busca automatizar, estos son:

- Control de procesos industriales: Normalmente referido a sistemas de control enfocado en el manejo de procesos caracterizados por diversos tipos de cambios (generalmente físicos o químicos).
- El procesamiento electrónico de datos: Frecuentemente relacionado con la obtención, almacenamiento y análisis de datos mediante interfaces y computadoras.
- La automatización fija: Es aquella basada en el empleo de secuencias lógicas para realizar una serie de tareas.
- Control numérico computarizado: Son aquellos controles que permiten dirigir el movimiento o posicionamiento de máquinas o equipos mediante un algoritmo numérico.

Este proyecto entraría en la categoría de un sistema de procesamiento electrónico de datos, aunque posee características de la automatización fija.

### **2.1.3. Niveles de Automatización Industrial.**

La automatización de un sistema puede variar su nivel dependiendo de la capacidad del sistema de control para realizar acciones por su cuenta. Para determinar el nivel de automatización de un sistema existen varias taxonomías que toman en cuenta diversos factores del sistema y de la capacidad del bloque de control para realizar tareas por su cuenta. La taxonomía propuesta por Endsley y Kaber toma en cuenta 4 funciones genéricas que forman la base para determinar el nivel automatización de un sistema, estas funciones son:

- Supervisión.
- Generación.
- Selección.
- Implementación.

A partir de estas 4 funciones se generan 10 niveles de automatización para sistemas de control industriales. Los 10 niveles propuestos en esta taxonomía se presentan en la tabla de la figura 2.2.

Level of automation	Roles			
	Monitoring	Generating	Selecting	Implementing
(1) Manual control	Human	Human	Human	Human
(2) Action support	Human/computer	Human	Human	Human/computer
(3) Batch processing	Human/computer	Human	Human	Computer
(4) Shared control	Human/computer	Human/computer	Human	Human/computer
(5) Decision support	Human/computer	Human/computer	Human	Computer
(6) Blended decision making	Human/computer	Human/computer	Human/computer	Computer
(7) Rigid system	Human/computer	Computer	Human	Computer
(8) Automated decision making	Human/computer	Human/computer	Computer	Computer
(9) Supervisory control	Human/computer	Computer	Computer	Computer
(10) Full automation	Computer	Computer	Computer	Computer

Figura 2.2: Taxonomía de los niveles de automatización propuesta por Kaber y Endsley.

(Kaber y Endsley, 2003)

Se puede detallar más a fondo cada uno de los niveles propuestos en la taxonomía para determinar de una manera más precisa los niveles presentes en el proyecto, a continuación se muestra una explicación más detallada de cada nivel. (Kaber y Endsley, 2003)

- **Manual:** El operario realiza todas las tareas de supervisión, generación de las pruebas, configuración e implementación de la misma.
- **Acción de soporte:** En este nivel el sistema electrónico realiza una ayuda en el desarrollo de la tarea seleccionada, aunque aún se requieren algunas acciones por parte del operario.
- **Procesamiento por lotes:** El operario selecciona y genera la prueba y el sistema electrónico se encarga de implementar la prueba.
- **Control compartido:** Tanto el operario como el computador generan e implementan la prueba de manera compartida. El operario selecciona de la opción a implementar.
- **Soporte de selección:** El sistema posee una lista de posibles configuraciones predeterminada, en donde el operario puede seleccionar entre ellas o puede generar su propia opción. Luego de la selección el computador implementa la opción seleccionada.
- **Toma de decisiones mezclada:** El computador posee una lista de configuraciones definida, de las cuales selecciona y lleva a cabo si el operador lo consiente. El operador debe aprobar la opción seleccionada por el computador para que este lleve a cabo la acción seleccionada.
- **Sistema rígido:** El sistema presenta un set de acciones al operador. El rol del operador es seleccionar de esta lista y el computador se encarga de implementar dicha opción.
- **Control de supervisión:** En este nivel el sistema electrónico selecciona, genera e implementa las pruebas y el operador cumple la tarea de monitorizar e intervenir de ser necesario.

- **Automatización total:** Todas las funciones son realizadas con un computador.

A partir de estos niveles se puede determinar el nivel de automatización que posee un sistema, así como el nivel de automatización para una tarea específica según se requiera.

## 2.2. LabView.

### 2.2.1. Programación en LabView.

LabView es una plataforma de desarrollo de *software* basada en lenguaje de programación gráfico, conocido como Lenguaje G. Aunque es una herramienta que pretende ser de propósito general, esta herramienta se utiliza principalmente en el desarrollo de programas de adquisición y análisis de datos, control de instrumentación y automatización tanto a nivel académico como industrial (Johnson, 2010).

Las rutinas realizadas en LabView se conocen como instrumentos virtuales (VI por sus siglas en inglés), estos VI constan de dos partes principales, el panel frontal que es la forma o la interfaz con la que el usuario se comunica con el programa y el diagrama de bloques que es la parte equivalente a la programación en lenguajes convencionales, aunque de una manera más gráfica. Al ser un ambiente de programación gráfico LabView cuenta con una paleta de funciones que vendría a funcionar como los comandos básicos de la programación convencional. En la paleta se pueden encontrar los bloques con los que se construirá el diagrama de bloques para la programación. Además de los bloques en esta paleta se pueden encontrar las estructuras, las cuales cumplen las funciones de comandos básicos de otros lenguajes como lo son el WHILE, el FOR y el IF/ELSE (Hobaica, 2011).

Combinando estas funciones y estructuras, LabView puede realizar diversas formas de programación, como lo pueden ser las máquinas de estados o lógicas productor/consumidor, en este trabajo se realizará una explicación más detallada de la lógica productor/consumidor que posee LabView, ya que es una lógica que se adapta de una manera más completa a un sistema de control por lotes.

La lógica de productor/consumidor se basa en varias estructuras WHILE, una de ellas se encargará de ser el productor, es decir analizará parámetros de entrada del sistema, para darle órdenes a los ciclos consumidores, estos ciclos consumidores estarán encargados de realizar funciones más específicas dentro del programa y actuarán solamente cuando el productor se los ordene, el ejemplo base que presenta LabView para este tipo de estructuras se puede observar en la imagen de la figura 2.3 en donde se especifica el ciclo productor y el ciclo consumidor.



### 2.2.2. Desarrollo de control automático mediante LabView

LabView posee diversas características que lo hacen esencial para el desarrollo de aplicaciones de control automático, en especial en la industria, una de ellas es la capacidad que tiene el programa para comunicar de manera sencilla e intuitiva el software con el equipo de medición, es una gran mayoría de equipos los que cuentan con soporte y controladores de *hardware* que permiten a LabView hacer la comunicación con estos equipos. Otra ventaja es que LabView posee una extensa biblioteca de funciones, entre ellas, aritméticas, comparaciones, conversiones, funciones de entrada/salida, análisis, etc (García, 2013).

LabView posee una lógica más sencilla para desarrollar entornos visuales en comparación con lenguajes de programación convencionales, lo que permite desarrollar interfaces gráficas muy completas e intuitivas, que pueden ser usadas por cualquier operario sin necesidad de una capacitación muy compleja (Boix, 2014).

Todo esto permite a LabView ser una de las herramientas más utilizadas a nivel industrial en cuanto a automatización se trata, como se mencionó anteriormente, el poder desarrollar una interfaz simple que pueda ser utilizada por cualquier operario sin importar su experiencia, hace que los errores humanos disminuyan considerablemente. LabView permite realizar funciones muy potentes en programas muy pequeños y poco complejos, en especial con la gran variedad de controladores de *hardware* que existen para este programa, que permiten conectar y comunicar cualquier sensor o actuador al sistema de control..

## Capítulo 3

# Pruebas Lifetest para los dispositivos GDT

### 3.1. Tubos de Descarga de Gas(GDT, por sus siglas en inglés).

#### 3.1.1. Principio de funcionamiento de los dispositivos GDT.

El GDT basa su funcionamiento en los principios físicos de descargas eléctricas a través de gases, las cuales no poseen un comportamiento óhmico, ya que al aplicar una tensión baja entre los electrodos, la corriente que circula a través de ellos es muy baja, al aumentar la tensión en los electrodos la corriente no aumenta significativamente, manteniéndose en un estado de saturación, pero una vez que el gas alcanza un nivel de ionización lo suficientemente alto, permite que los electrones puedan fluir a través de él, produciendo una ruptura o descarga de los electrones, logrando así conducir corriente eléctrica (Vallés, 1998). Gracias a esto los GDT obtienen características tales como un valor extremadamente bajo de capacitancia y bajos niveles de fuga, estas características hacen que este componente sea ideal para diseños de amplios arreglos de telecomunicaciones, industriales o de equipo médico que requieran de una robusta protección a las sobre tensiones.(Bourns, 2015)

Los GDT son dispositivos compuestos por arreglos de electrodos y gas contenidos en una envoltura de cerámica que utilizan el principio de ionización de gases para lograr desviar los excesos de corriente del circuito hacia el nodo de tierra (conectado en el modo común) o hacia la fuente (conectado en el modo diferencial), estas configuraciones se especifican de la manera que se puede observar en las figuras 3.1 y 3.2 respectivamente.

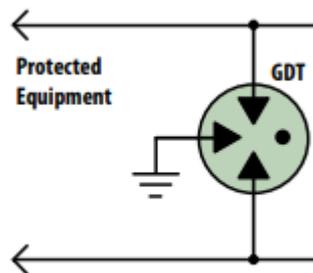


Figura 3.1: Configuración de operación en modo común.  
(Bourns, 2015)

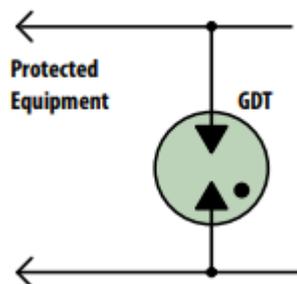


Figura 3.2: Configuración de operación en modo diferencial  
(Bourns, 2015)

### 3.1.2. Operación de los GDT.

Los tubos de descarga de gas (GDT por sus siglas en inglés) son componentes especialmente diseñados para lograr operar bajo el principio físico de los gases, para lograr una descarga de arco altamente efectiva. Este tipo de componentes funciona como un interruptor controlado por tensión, el cual en su estado de apagado opera como alta impedancia hasta lograr superar el valor de tensión de cebado (*Sparkover voltage*). En el momento en el que el GDT alcanza este nivel de tensión el gas se ioniza completamente y logra conducir corriente a través del dispositivo, todo esto en una fracción de micro segundo.(Bourns, 2018)

En el estado de encendido o modo de arco el dispositivo conduce corriente con un valor de impedancia muy bajo lo que permite que se comporte como un corto circuito virtual para el circuito, de esta manera logra desviar la corriente del circuito, manteniendo así el equipo protegido de los altos flujos de corriente. Una vez el GDT a realizado el desvío de corriente y los niveles de tensión disminuyen a valores seguros, el componente vuelve a funcionar con alta impedancia en su estado de apagado.

Para lograr observar de manera más clara la forma en como trabaja este tipo de dispositivos podemos observar la forma de onda de la respuesta al impulso de un GDT, esta onda se puede observar en la figura 3.3

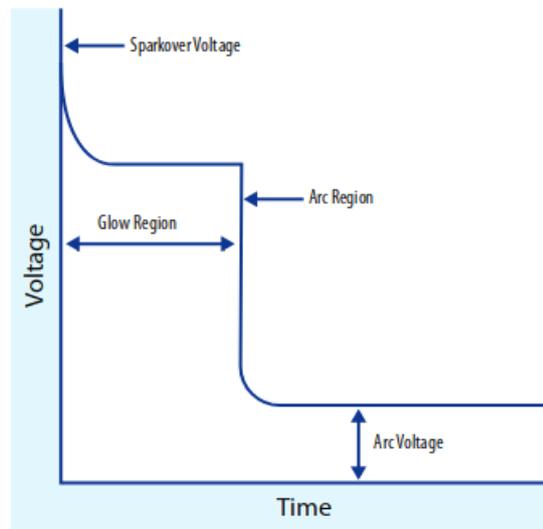


Figura 3.3: Respuesta teórica al impulso de un GDT ideal.  
(Bourns, 2018)

Se puede observar como el GDT, una vez alcanzado el valor de tensión *sparkover*, cambia su modo de operación a un corto circuito virtual disminuyendo el valor de tensión en el circuito. Se observa como el componente primero pasa por una región de destello (*Glow region*) antes de lograr alcanzar la región de arco, el cual es el valor de tensión deseado. Esta región de destello realmente no se logra apreciar en las pruebas reales del laboratorio, ya que sucede de manera muy veloz en comparación con la caída total de la tensión, es por esto que realmente esta región no es muy importante para el comportamiento del dispositivo y muchas veces se llega a ignorar esta región, simplificando la curva como si fuera una caída de pendiente casi constante hasta llegar a la región de arco.

### 3.1.3. Pruebas Lifetest.

Los lifetest son procesos de prueba que buscan determinar el cumplimiento de los componentes a diversos parámetros y características determinadas por diversos estándares con el fin de garantizar la calidad de los productos producidos. Estas pruebas varían según el estándar que se siga y claramente el componente que se pruebe. Con los componentes GDT específicamente existen diversos tipos de pruebas lifetest especificadas en el estándar ITU-T k.12, todas se basan en el mismo principio de realizar un número de descargas al componente con el fin de determinar si este falla o no en el proceso. Las pruebas se diferencian entre sí, debido a que cada una de ellas presenta una especificación particular de la curva de corriente que se debe aplicar en las pruebas, entre las curvas que se utilizan más comúnmente están las curvas  $8x20\mu s$ ,  $10x1000\mu s$  y  $10x350\mu s$ , en donde cada una de ellas especifica el tiempo de subida y bajada de la curva de corriente. En este proyecto se trabaja con las curvas  $10x1000\mu s$  específicamente, en la imagen de la figura 3.4 se presenta una gráfica teórica de la forma de este tipo de curvas.

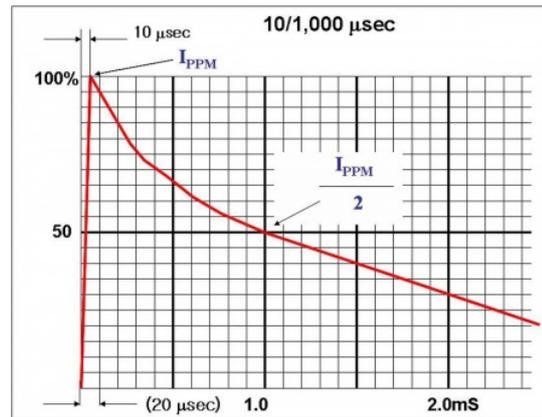


Figura 3.4: Curvas de corriente 10/1000 $\mu$ s  
(Vishay, 2010)

Estas pruebas se componen de varias etapas en las cuales se determinan diversos parámetros del GDT para observar el funcionamiento del componente durante cada repetición de la prueba. Estas etapas se basan en medir el valor de voltaje del *DC breakdown* (DCBD), el valor de la resistencia de aislamiento (IR, por sus siglas en inglés), por último aplicar el impulso  $10 \times 1000 \mu s$ , las especificaciones de cada una de estas etapas se definirán en el capítulo a continuación, junto con la elaboración del diseño del algoritmo.

# Capítulo 4

## Equipos de medición y protocolo de comunicación para las pruebas lifetest

### 4.1. Comunicación GPIB.

#### 4.1.1. Bases del GPIB.

El GPIB es un protocolo de 8 bits paralelos, asíncronos, cuya lógica es de maestro-esclavo, es decir uno de los dispositivos está encargado de controlar el flujo de datos dentro del bus y la interacción de esos datos con los otros dispositivos. El "maestro" se asegura de que no exista dos dispositivos ejecutando acciones de escritura o lectura en el bus del sistema de manera simultánea, para así evitar errores en la red. El GPIB permite conectar hasta 15 dispositivos en la red, pero como se mencionó estos equipos no pueden trabajar con el bus de manera paralela lo que limita su funcionamiento.

El bus GPIB cuenta con un ancho de banda de 1 MByte/s y se puede aumentar hasta 8 MBytes/s en su versión Hi-Speed. Sin embargo el ancho de banda varía dependiendo de la cantidad de dispositivos conectados a la red. La baja latencia del GPIB supera inclusive al USB 2.0 que es de  $100\mu s$ . La distancia máxima que alcanza el bus es de aproximadamente 20m con una distancia de 2m entre dispositivos (Amores, 2010). Los dispositivos se conectan mediante un cable apantallado de 24 polos, cuyos conectores brindan gran fiabilidad gracias a la robustez de los conectores IEEE-488.

#### 4.1.2. Características del bus GPIB.

El bus del GPIB está basado en 16 líneas activas que se organizan de la siguiente manera:

- **Bus de datos:** Bus bidireccional de 8 líneas orientadas a la transferencia de bytes entre los equipos.
- **Bus de sincronización de la transferencia de datos:** Conjunto de tres líneas coordinadas para asegurar la transferencia de datos entre los equipos.
- **Bus de Control:** Constituido por 5 líneas que se utilizan para transferir comandos entre los equipos, relativos al modo de interpretar los datos que se transfieren o comandos básicos de gobierno de la interfaz del bus.

Esta distribución de líneas se puede observar en la figura 4.1

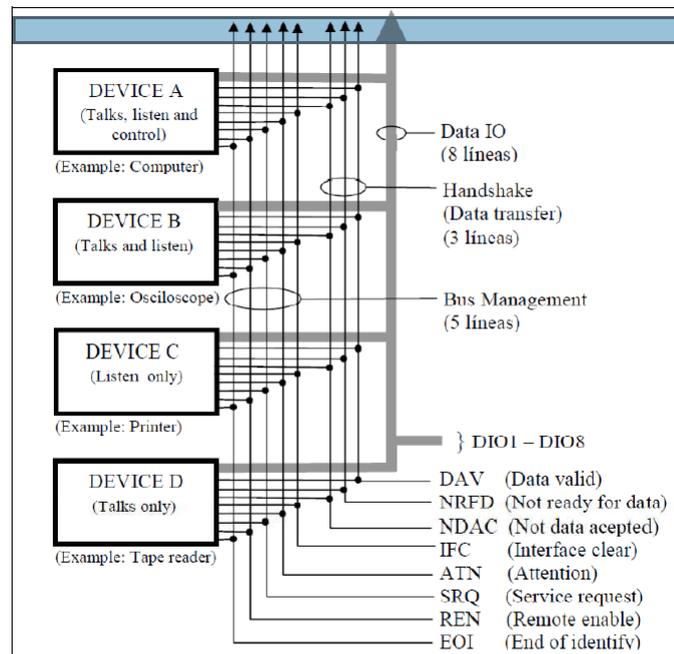


Figura 4.1: Distribución de la líneas del bus GPIB.  
(Borrero, 2011)

Del diagrama mostrado en la figura 4.1 se puede deducir que el bus GPIB puede transmitir dos tipos de mensajes. Los mensajes tipo *data*, que son aquellos cuya información hace referencia a información relativa a la funcionalidad de un equipo, y por otro lado están los tipo *command* que son aquellos que tienen como función el modo de operación del bus. Entre los mensajes de tipo *command* están los que hacen referencia al modo de operación de los equipos conectados a la red, los equipos pueden tener 4 modos de operación, estos son:

- *Controller*: El equipo es capaz de establecer quien envía y recibe datos y el modo en el que opera el bus.
- *Talker*: El equipo es capaz de enviar datos a otros equipos.
- *Listener*: El equipo es capaz de recibir datos de otros equipos.
- *Idler*: Sin ninguna capacidad respecto al bus.

Los equipos pueden ir cambiando su operación durante el transcurso de la prueba, pero solo puede haber un *controller* en un momento específico de la prueba, además los equipos pueden cambiar entre *Talker* y *Listener* durante la prueba, pero de igual manera a la del *controller*, varios equipos pueden tomar el rol de *talker* pero solo uno de ellos lo será en un instante dado y es el *controller* quien definirá cual de los equipos será el *talker* en cada momento. En el caso de los *controller* pueden existir dos tipos, los cuales son *System controller* y *Active controller*. Solo un equipo de toda la red puede ser el *system controller*, pero varios equipos pueden asumir el rol de *active controller* aunque como se mencionó anteriormente no de manera simultánea.(Borrero, 2011)

### 4.1.3. Señales lógicas del bus GPIB.

Todas las líneas del bus operan con niveles de tensión TTL y utilizan lógica negativa, esto quiere decir que muestra un 1 lógico para tensiones bajas y un 0 lógico para valores de tensiones altas, mayores a 2.5V. Las salidas de las líneas presentan una tecnología de *open-collector*, lo que quiere decir que la línea estará en estado de *TRUE* si al menos uno de los equipos conectados posee ese valor en su salida y por el contrario estará en estado de *FALSE* si todos los equipos conectados a esa línea corresponden a ese valor.

El *controller* será el equipo encargado de enviar los mensajes de comando a través del bus, estos mensajes de comando se encargan de sincronizar o establecer los estados de operación de los equipos. Estos mensajes de comando se envían de igual forma que los mensajes de datos con la diferencia de que la señal ATN esta en estado de *TRUE*.

El *controller* es capaz de enviar 5 tipos de comandos, estos son *Addressed*, *Universal*, *Listen*, *Talk* y *Secondary*. Estos comandos se especifican en los tres bits más significativos, mientras que los cinco bits menos significativos se utilizan para seleccionar la dirección del equipo al que el comando va dirigido (Borrero, 2011). Las combinaciones para estos comandos se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Combinaciones de los bits más significativos de la línea para los diferentes tipos de comandos en GPIB.

b7	b6	b5	Tipo de comando
0	0	0	Addressed
0	0	1	Universal
0	1	x	Listen
1	0	x	Talk
1	1	x	Secondary

A partir de estos comandos el controlador del bus puede decidir el modo de operación del resto de elementos en la red.

## 4.2. Comunicación con los *fixtures* para GDT.

### 4.2.1. Interfaz entre la tarjeta de circuito impreso y el sistema de control.

Para realizar el control de los *fixtures* para GDT, se cuenta con una tarjeta de circuito impreso (PCB por sus siglas en inglés) el cual posee entradas y salidas que permiten seleccionar el GDT a probar, entre 16 posibles, como se muestra en la figura 4.2. Para lograr la selección de los *fixtures*, la tarjeta posee una serie de pines conectados a un cable plano que posee un conector D50 macho a su otro extremo, con el cual se puede conectar una tarjeta de adquisición de datos para controlar dicha tarjeta.



Figura 4.2: PCB que contiene los *fixtures* para los GDT y los circuitos analógicos para la selección de los mismos.



Figura 4.3: Tarjeta de adquisición de datos PCIe-6509 de National Instruments. (NI, 2010)

Un detalle muy importante a tomar en cuenta es que este conector es de tipo D-sub de 50 pines (figura 4.4) debido a que la tarjeta de IO utilizada por el computador en el sistema de control anterior era este tipo de conector. La nueva tarjeta de adquisición de datos, seleccionada para el nuevo computador de este sistema de control, es una PCIe-6509 (figura 4.3), esta cuenta con un conector del tipo D serie 0.050 de 100 pines (figura 4.5), por lo que es necesario realizar una interfaz entre ambos conectores para asegurarnos que el computador pueda realizar el control de manera efectiva.



Figura 4.4: Conector D-sub de 50 pines.

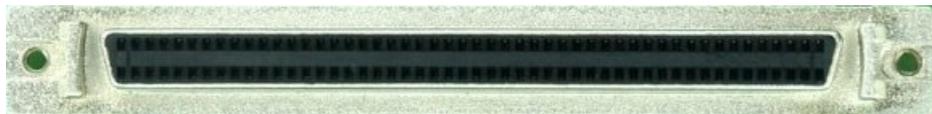


Figura 4.5: Conector D-type 0.050 series 100 pines.

Para esta interfaz se realizó una conexión pin a pin en una tarjeta perforada, como prototipo de la conexión entre los conectores. Para esto se definieron los pines utilizados en cada conector, para realizar la asignación y conexión entre ellos. Los pines del conector D-sub 50 utilizados se muestran en la tabla 4.2, junto con los pines asignados para el conector tipo D serie 0.050 de 100 pines. El producto resultante de este diseño de prototipo se puede observar en el apéndice A.3 figura A.1

Tabla 4.2: Asignación de pines para la interfaz entre los conectores D50 y tipo D serie 0.050 de 100 pines.

Función	conector D-sub 50	conector serie 0.050 100 pines
IO 0	18	P3.0
IO 1	2	P3.1
IO 2	35	P3.2
IO 3	19	P3.3
IO 4	3	P3.4
IO 5	36	P3.5
IO 6	20	P3.6
IO 7	4	P3.7
IO 8	5	P4.1
IO 9	38	P4.2
IO 10	22	P4.3
IO 11	6	P4.4
IO 12	39	P4.5
IO 13	23	P4.6
IO 14	7	P4.7
IO 15	40	P5.0
Activar salida del generador	21	P4.0
Activar alta tensión	8	P5.1
Generador Listo	44	P5.6
Activar Canal 1	41	P5.2
Activar Canal 2	25	P5.3
Desconectar osciloscopio	42	P5.5
Aislar Generador	9	P5.4

### 4.3. Programación del equipo de medición.

#### 4.3.1. Sourcemeter Keithley 2410.

Un *Sourcemeter* es un dispositivo capaz de realizar las funciones de una fuente de tensión eléctrica o corriente, y a su vez es capaz de medir tensión eléctrica, corriente o resistencia. Este equipo permite obtener una fuente de tensión ya sea constante o variable. El equipo cuenta con una alta fidelidad en sus datos teniendo un margen de error promedio de 0.0012% en sus mediciones, con una precisión de 6 dígitos. (Keithley, 2011a) Este equipo posee la capacidad de comunicarse por medio de GPIB, lo que permite comunicarse con el sistema que realizará la lógica del algoritmo, ya que este equipo tiene una capacidad de 1700 lecturas por segundo vía GPIB.

El equipo puede funcionar en modo *FIXED* y modo *SWEEP*, con estos modos podemos generar una salida de tensión fija o en escalón respectivamente. El modo *SWEEP* nos permite generar escalones con un crecimiento lineal o logarítmico, además de permitir tener una salida de escalón con valores predefinidos, cada uno de estos casos se muestran en la figura 4.6.

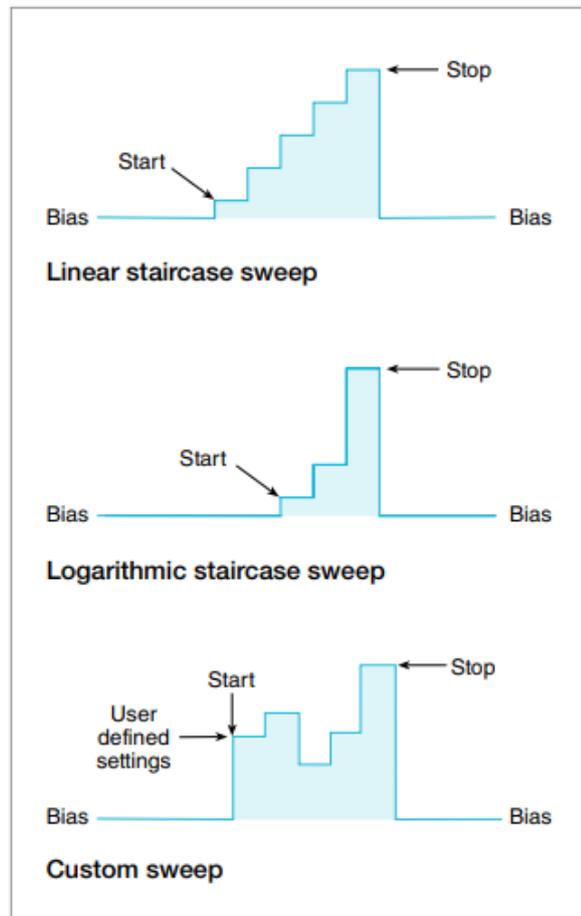


Figura 4.6: Tipos de barridos permitidos para la salida del sourcemeter keithley 2410.

(Keithley, 2011b)

Para lograr desarrollar la programación del equipo se recolectaron los comandos más importantes en la configuración y función del equipo. A continuación se muestra un cuadro de los principales comandos y sus funciones, con el fin de justificar su uso en el algoritmo de control.

Tabla 4.3: Comandos básicos para la programación del Sourcemeter Keithley 2410.

Comando	Descripción
:SOURce:FUNCTion VOLTage/CURRent	Selecciona la función de la fuente ya sea como fuente de voltaje o de corriente.
:SOURce:VOLtage/CURRent:PROTection	Define el rango de salida de voltaje o corriente de la fuente para protección de los circuitos internos.
:SENSe:FUNCTion VOLT/CURR	Selecciona la función que el equipo va a medir, ya sea voltaje o corriente.
:SOURce:VOLtage:MODE FIX/SWE/LIST	Selecciona el modo de operación de la fuente del equipo.
:SOURce:VOLtage:STARt/STOP	Define el valor en el que inicia o finaliza un barrido. Para utilizar este comando primero se debe haber seleccionado el modo de operación de SWEEP.
:SOURce:VOLtage:STEP	Define el nivel del aumento de tensión de la fuente entre paso y paso del escalón. (Ver figura 4.6)
:INIT	Inicia la salida de la fuente con la configuración especificada.

Estos son algunos de los principales comandos que se utilizan en el programa para lograr realizar lógicas de programación especialmente en las etapas de las pruebas para medir el IR y el DCBD que se verán en las secciones 5.2 y 5.3.

### 4.3.2. Osciloscopio Agilent 54624A.

El osciloscopio 54624A de Agilent posee 4 canales analógicos con un ancho de banda de  $100\text{MHz}$ , este equipo aunque normalmente posee solamente comunicación paralela y RS-232, posee la opción de integrar de manera adicional el adaptador de GPIB (Agilent, 2002), lo que permite acoplarse de la mejor manera al sistema de control diseñado. Algunos de los comandos más importantes para el control y la configuración de este equipo se muestran en la tabla 4.4, cabe mencionar que estos comandos presentados en dicho cuadro son extraídos del manual de programación del equipo y que son los más importantes para el diseño presentado en este trabajo.

Tabla 4.4: Comandos básicos para la programación del Osciloscopio Agilent 54624A.

Comando	Descripción
MEASure:XXXX CHAN1/2/3/4	Mide el valor especificado en XXXX este puede ser VMIN, VMAX, entre otros, del canal del osciloscopio especificado.
SINGle	El osciloscopio realiza un solo barrido y luego se detiene.
TIM:SCAL	Define la escala de tiempo del osciloscopio.
CHAN1/2/3/4:SCAL	Define el valor de escalamiento del canal seleccionado.
TRIG:MODE	Define el modo de operación del trigger.
TRIG:SLOP	Define la polaridad de la pendiente del trigger.
:OPER?	Pregunta por el estado del equipo.

# Capítulo 5

## Diseño del algoritmo de control.

### 5.1. Diagrama general del proceso por lotes.

Antes de mostrar el diseño que se realizó es debido mostrar el diagrama del sistema general, para conocer sus partes. Este diagrama se muestra en la figura 5.1.

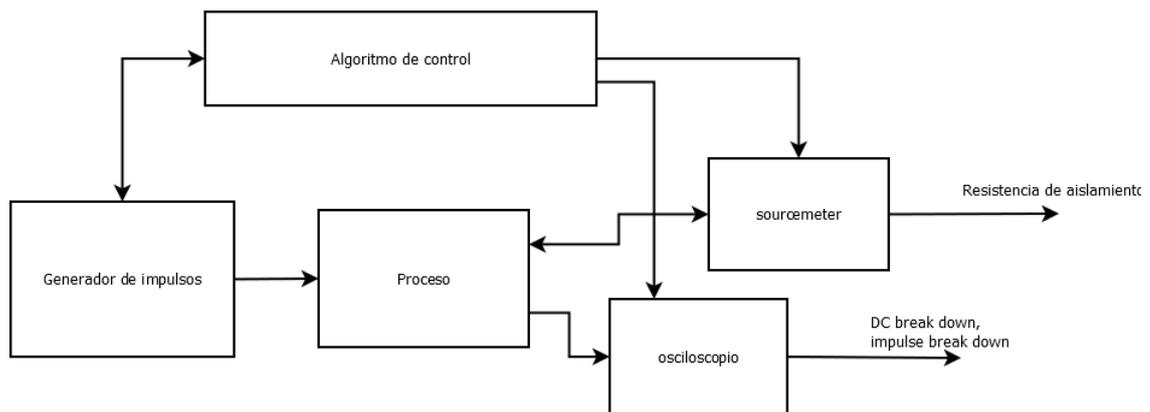


Figura 5.1: Diagrama general del sistema de control por lotes.

El bloque del proceso mostrado en la figura 5.1 será mostrado y analizado a más detalle en los capítulos a continuación. Este proceso se compone de tre etapas principales, las cuales son:

- Pruebas de medición de resistencia de aislamiento.
- Pruebas de medición de DC break down.
- Pruebas de impulso de corriente  $10 \times 1000 \mu s$

## 5.2. Prueba de medición del valor de Resistencia de Aislamiento (IR, por sus siglas en inglés).

### 5.2.1. Principios de la prueba.

En esta prueba se mide la resistencia de aislamiento de los GDT. Para esto se aplica una tensión eléctrica de 100V (50V en casos donde el valor nominal del GDT sea menor a 100V), limitando la corriente a 10mA máximo. Para que un GDT pueda pasar exitosamente esta prueba, la resistencia debe ser mayor a  $100M\Omega$ , en cualquier combinación de terminales.

### 5.2.2. Diseño de la lógica para las pruebas de medición de IR.

Para realizar esta prueba primero se mostrarán algunas especificaciones de la norma ITU-T k.12, estas especificaciones podemos observarlas en la tabla 5.1. A partir de estas especificaciones se realizó el algoritmo mostrado en el diagrama de la figura 5.2.

Tabla 5.1: Especificaciones del ITU-T k.12 para la medición de IR.

Especificación
Se medir la resistencia aplicando una tensión eléctrica de 100V. En casos en donde el GDT tenga un valor nominal de tensión menor a los 100V se utilizará 50V.
La corriente debe ser limitada a 50mA máximo.
Se debe realizar la medición de la resistencia en cada combinación de terminales.

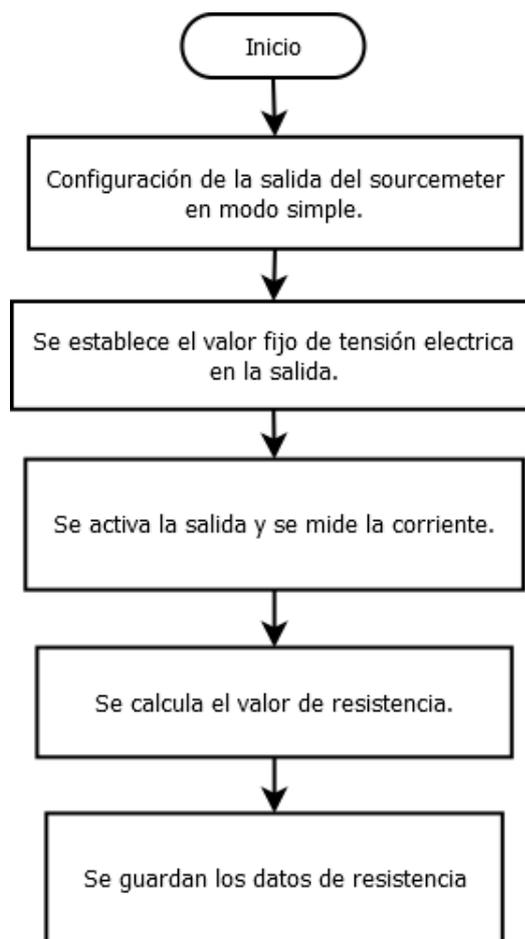


Figura 5.2: Algoritmo para la prueba de resistencia de aislamiento para las pruebas de vida útil de GDT.

Para la inicialización del *sourcemeter* se seguirá los pasos del algoritmo mostrado en la figura 5.3.

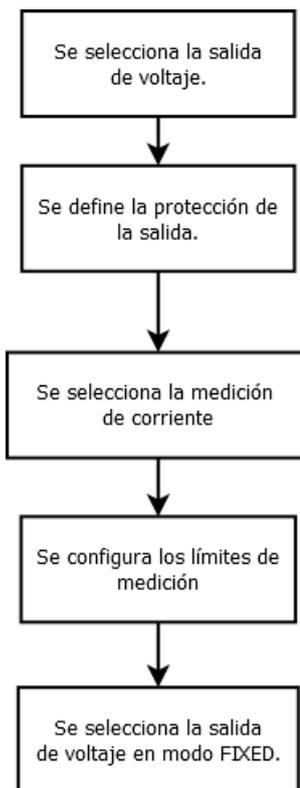


Figura 5.3: Algoritmo para la inicialización del sourcemeter keithley 2410.

De la figura 5.3 cabe destacar que los comandos de selección de la fuente, protección de salida y protección de medición, así como la selección de la variable de medición se mostraron en la tabla 4.3.

En cuanto a la medición de la resistencia de aislamiento el algoritmo implementado se muestra en la figura 5.4. Su programación en LabView se muestra en la figura A.4 en el apéndice A.5



Figura 5.4: Algoritmo para la medición de la resistencia de aislamiento de los GDT.

Primeramente se selecciona la salida como un valor fijo de tensión, normalmente se utilizara un valor de 100V aunque en casos específicos este valor puede variar según lo establece el estándar ITU-T k.12 en la sección 7.2, luego se activa la salida y se mide la corriente, se calcula la resistencia de aislamiento a partir de los resultados obtenidos y se guarda este valor. Este proceso se repite para cada par de terminales en caso de ser un GDT de tres terminales.

### 5.3. Prueba de medición del DC Breakdown Voltage (DCBD).

#### 5.3.1. Principios de la prueba.

La prueba de medición del DCBD, al igual que la prueba de medición de IR se basa en ciertas especificaciones de la norma ITU-T k.12, estas se muestran en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Especificaciones del ITU-T k.12 para la medición del DCBD.

Especificación
Se debe aplicar una rampa de voltaje hasta que el GDT alcance el <i>break-down</i> .
La rampa de voltaje debe tener una pendiente de $2kV/s$ .
El voltaje DCBD sera el valor máximo de la curva obtenida en la prueba.
Esta prueba se debe repetir 4 veces en un mismo componente, en cada combinación de terminales cambiando la polaridad.
Para el <i>lifetest</i> esta prueba se debe repetir luego de cada impulso.

#### 5.3.2. Diseño de la lógica para las pruebas DCBD.

Esta prueba además de contar con las especificaciones de la norma antes mencionada, tambien necesita cumplir con algunas características para lograr el control del equipo de medición. Estas características se muestran en la tabla 5.3.

Tabla 5.3: Especificaciones para el control de los instrumentos de la prueba para la medición del DCBD.

Especificación
Se utilizará comunicación por GPIB para el <i>sourcemeeter</i> y el osciloscopio, por lo que es necesario sincronizar el control de estos para evitar conflictos en la red.
Se requiere utilizar el PCIe-6509 para controlar la tarjeta mostrada en la figura 4.2 para activar el <i>fixture</i> a utilizar.

A partir de las especificaciones de la tabla 5.2 y de la tabla 5.3 podemos diseñar el algoritmo. El algoritmo para esta subrutina se muestra en la figura 5.5

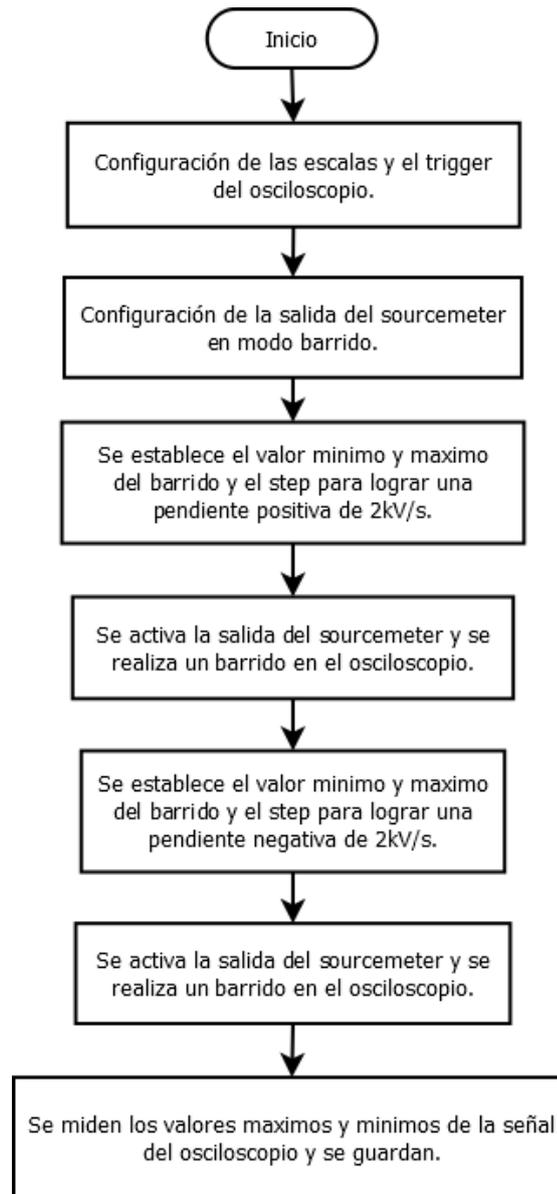


Figura 5.5: Algoritmo para la prueba de DC breakdown para las pruebas de vida útil de GDT.

Como se observa en la figura 5.5 primeramente se debe inicializar los equipos de medición para evitar los conflictos que estos puedan generar en la toma de datos por configuraciones indeseadas en los equipos, la configuración del *sourcemeter* es la misma utilizada para la prueba para medir el IR (figura 5.3) con la diferencia de que se usara el modo *SWEEP* y no el modo *FIXED*. La configuración del osciloscopio se muestra en la figura 5.6.

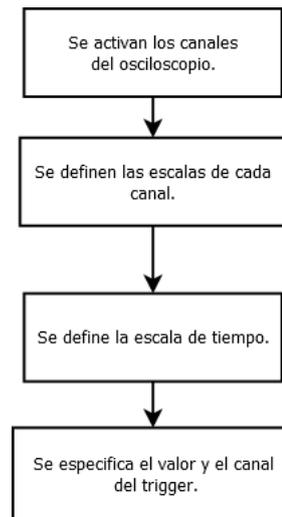


Figura 5.6: Programación en LabView para la inicialización del osciloscopio Agilent 54624A.

Para la programación de esta rutina en LabView se utilizarán los comandos especificados en el manual del *sourceter* keithley 2410 mostrados en el cuadro 4.3 y del osciloscopio Agilent 54624A mostrados en el cuadro 4.4, la idea principal de esta subrutina es utilizar los comandos de *SWEEP* para definir el valor máximo y valor mínimo para el barrido del sourceter y definir las funciones del osciloscopio mediante los comandos de *TRIGGER* y *SINGLE* para lograr realizar la medición de la señal de manera sincronizada. En la figura 5.7 se muestra el algoritmo para generar la rampa de voltaje necesaria para las pruebas de medición del DCBD.

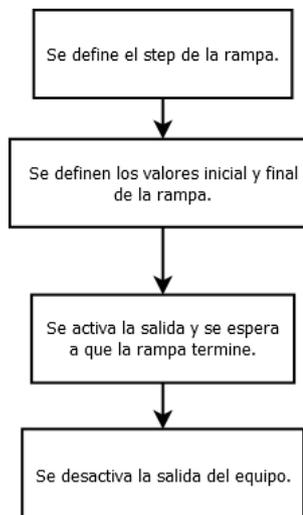


Figura 5.7: Programación del escalón de voltaje con el keithley 2410.

Esta rutina genera una sola rampa, si tomamos esta base y la unimos con la programación del osciloscopio para realizar las mediciones, podemos obtener la subrutina completa del DCBD como se muestra en la figura 5.8

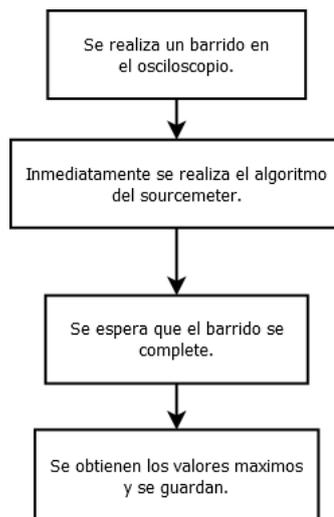


Figura 5.8: Programación de la subrutina de la prueba DC breakdown voltage.

En la figura 5.8 se puede observar la subrutina que genera las pruebas de medición del DCBD. Esta rutina solo es para una medición de DCBD por lo que este proceso se repetirá 3 veces más en una prueba real.

## 5.4. Prueba de impulso de corriente $10 \times 1000 \mu s$

### 5.4.1. Principios de la prueba.

Esta es la rutina principal de la prueba de vida útil, ya que justamente las repeticiones de estos impulsos de corriente son las que definen cuantos ciclos el componente fue capaz de resistir antes de su falla, dado el caso de que se diera una falla. Para realizar esta prueba se debe utilizar uno de los cuatro métodos listados en la tabla 5.4, presentado en el estándar del ITU-T k.12.

Tabla 5.4: Métodos de prueba para los impulsos de descargas de corriente.

Método	Número de aplicaciones $10 \times 1000 \mu s$ (50..200A)	Número de aplicaciones $10 \times 1000 \mu s$ (10A)	Polaridad
1	300	1500	+ + + + +
2	300	1500	- - - - -
3	150 + y 150 -	750 + y 750 -	+ + + +.../- - - - -...
4	300 +/-	1500 +/-	+/-/+/-/+/-/...

Las especificaciones de esta prueba se muestran en la tabla 5.5.

Tabla 5.5: Especificaciones para la prueba de impulsos de corriente  $10x1000\mu s$ .

Especificación
La curva de corriente deberá respetar los tiempos de subida de una curva $10x1000\mu s$ .
Se deben realizar la medición del DCBD y de IR luego de cada prueba de impulso.
Se debe esperar un mínimo de 3 minutos antes de repetir esta prueba en un mismo componente .

### 5.4.2. Diseño de la lógica para los impulsos $10x1000\mu s$ .

Para lograr recrear las curvas de corriente se utilizará un generador cuyo diagrama general se muestra en la figura 5.9.

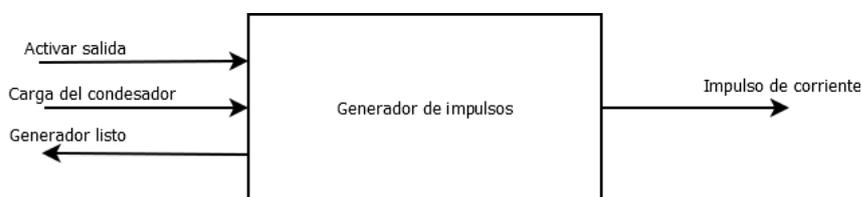


Figura 5.9: Diagrama del generador de curvas  $10x1000\mu s$ .

Las señales de entrada de este generador se controlan con la tarjeta PCIe-6509. A partir de esta información se seleccionan los pines de la tarjeta PCIe-6509 designados para estas tareas. Los pines seleccionados se muestran en la tabla 5.6.

Tabla 5.6: Asignación de pines de la tarjeta PCIe-6509 para las funciones del generador de impulsos.

Función	Número de pin (Tarjeta PCIe-6509)
Carga del generador	P5.1
Generador listo	P5.6
Disparo del impulso	P4.0

Con las especificaciones de la tabla 5.5 y el control del generador de impulsos definido se diseñó el algoritmo mostrado en la figura 5.10 con el fin de recrear dicha prueba.

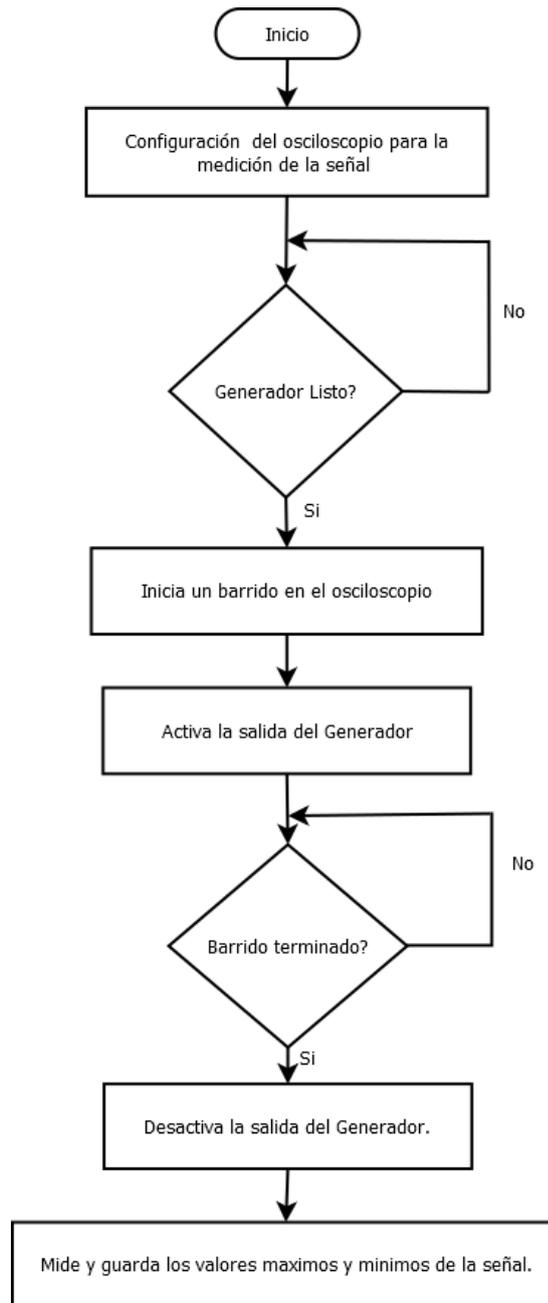


Figura 5.10: Algoritmo para la prueba de impulso de corriente  $10/1000\mu s$  para las pruebas de vida útil.

En el diagrama se puede observar que una vez más aparece la etapa de configuración del osciloscopio, esto se debe a que la prueba requiere que las escalas tanto verticales (escala de tensión eléctrica) como horizontales (escala de tiempo) del osciloscopio varíen, además es necesario activar el canal 3 del osciloscopio que funcionará como trigger para empezar el barrido de la señal.

Para realizar esta rutina primero se deben activar los *fixtures* que se utilizarán, para esto se utiliza los pines de la tarjeta PCIE-6509 mostrados en la tabla 4.2.

## 5.5. Diseño del algoritmo principal de control.

### 5.5.1. Lógica secuencial de las subrutinas en el algoritmo principal.

La pruebas de vida útil se realizarán según el algoritmo mostrado en la figura 5.11

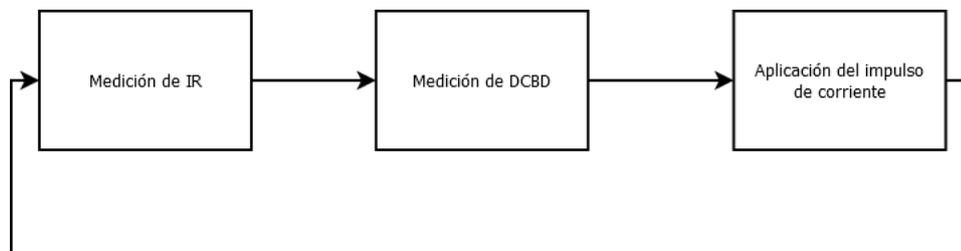


Figura 5.11: Algoritmo para las pruebas de vida útil.

Como se observa la prueba de vida útil se basará en realizar los procesos mostrados en los capítulos anteriores. En la figura 5.12 se muestra el diagrama más detallado para este algoritmo.

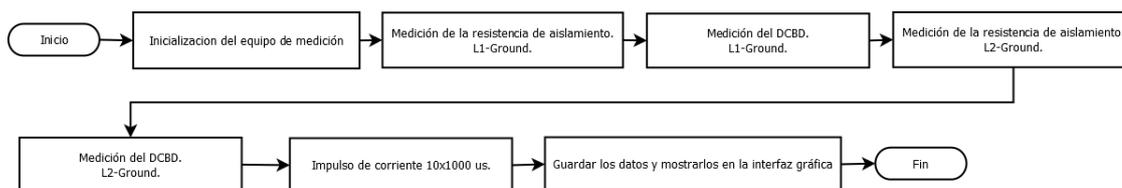


Figura 5.12: Algoritmo general para las pruebas de vida útil.

Como se muestra en el algoritmo, la idea es realizar las mediciones del IR y del DCBD en todas las terminales del componente y finalizar con el impulso de corriente  $10/1000 \mu s$ , una vez que el impulso ha sido aplicado se debe esperar 3 minutos antes de volver a repetir este ciclo en el mismo componente. Por este motivo se decide realizar la programación de productor/consumidor de LabView, así logramos tener un ciclo principal que determine los tiempos de ejecución de las pruebas, para respetar estos intervalos de tiempo.

### 5.5.2. Sistema productor/consumidor de LabView.

Como se mencionó en la sección anterior la propuesta de crear el algoritmo en una lógica de productor/consumidor se presenta debido a la necesidad de respetar los tiempos de ejecución de las rutinas, ya que esta lógica nos permite definir una estructura que estará encargada de controlar la secuencia y los tiempos de ejecución del algoritmo, mientras que las otras estructuras simplemente recibirán las ordenes de este ciclo productor para actuar. En el diagrama mostrado en la figura 5.13, podemos observar el diagrama general de la estructura productor.

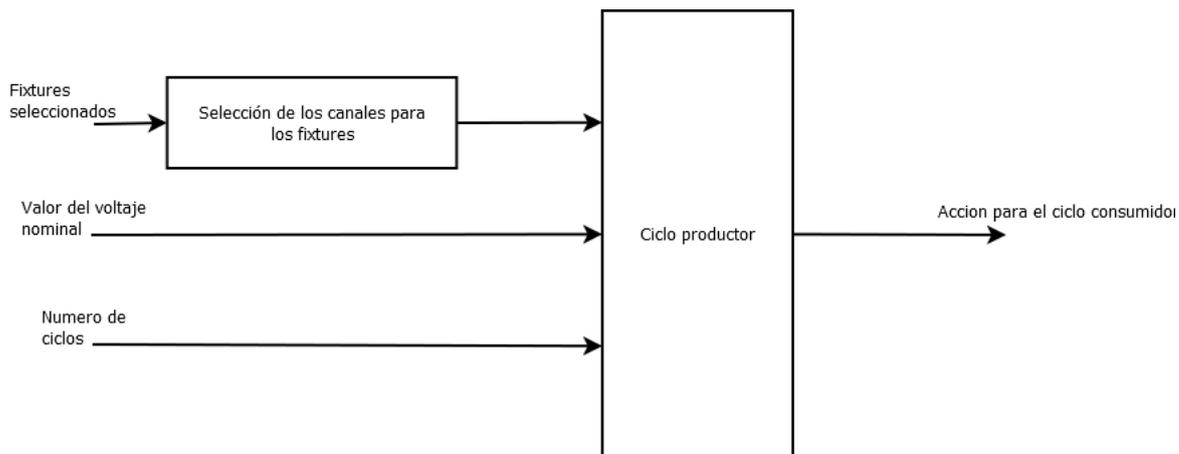


Figura 5.13: Estructura del ciclo productor.

El algoritmo que seguirá el ciclo productor se muestra en la figura 5.14.

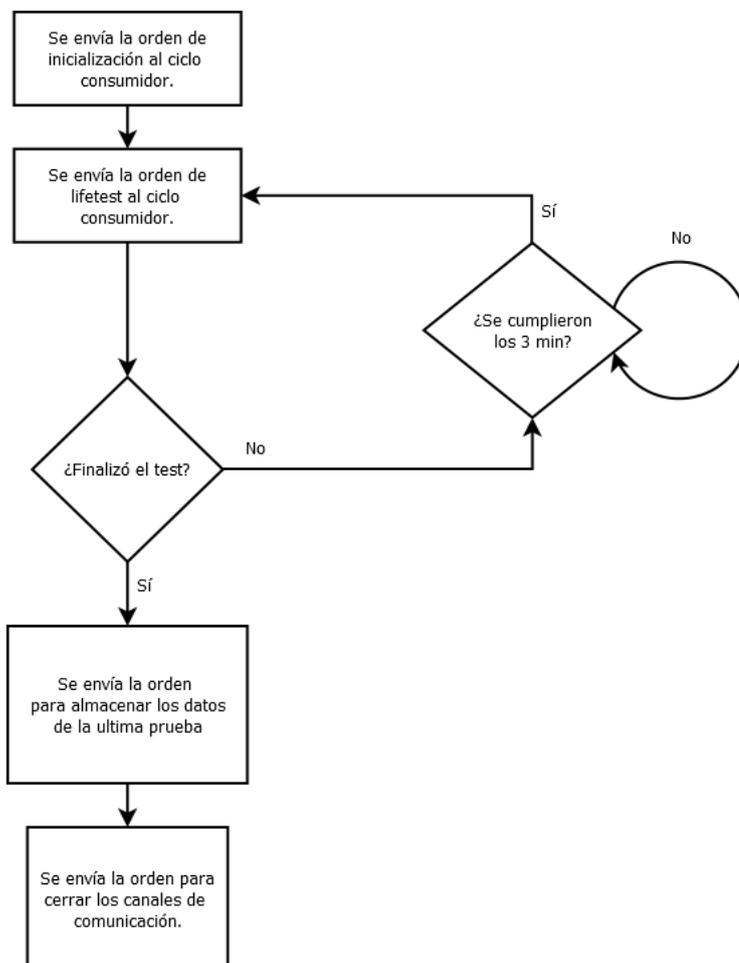


Figura 5.14: Algoritmo del ciclo productor.

El ciclo consumidor estará encargado de realizar las tareas principales de la prueba, estas son las subrutinas mostradas en las secciones anteriores del capítulo. Las 4 rutinas

que realizará este ciclo serán las siguientes:

- Inicialización
- Lifetest
- Almacenamiento
- Desconexión

Una breve descripción de estas rutinas se muestra en la tabla 5.7

Tabla 5.7: Descripción de las rutinas del ciclo productor.

Rutina	Descripción
Inicialización	Inicia la comunicación con los instrumentos por GPIB y habilita los canales de la PCIe-6509.
Lifetest	Realiza el algoritmo mostrado en la sección 5.5.1
Almacenamiento	Crea y guarda la matriz de resultados obtenidos en el lifetest
Desconexión	Proceso inverso a la inicialización. Deshabilita la comunicación con los instrumentos de medición y la tarjeta PCIe.

Los productos obtenidos en la programación en LabView para la rutina de Lifetest se pueden observar en los diagramas mostrados en las figuras A.8 y A.9.

En la rutina de almacenamiento se realizará además la lógica para mostrar los resultados en la interfaz gráfica. En la figura A.10 los productos en LabView para el almacenamiento, mientras que la figura A.11 muestra un producto de las lógicas que muestran los resultados en tiempo real de las pruebas.

Por último, para la rutina de desconexión se obtiene como producto en LabView el diagrama mostrado en la figura A.12.

### 5.5.3. Lógicas para la interacción con el usuario en la interfaz gráfica.

Una vez que tenemos creadas las lógicas principales del algoritmo, se procede a realizar la interfaz gráfica que permitirá al usuario interactuar con el programa para definir los parámetros de la prueba. Primeramente se desarrolló la pantalla principal del programa en donde se seleccionarán los parámetros de la prueba, así como los *fixtures* ha utilizar. En la figura 5.15 se muestra la pantalla principal de la interfaz gráfica.

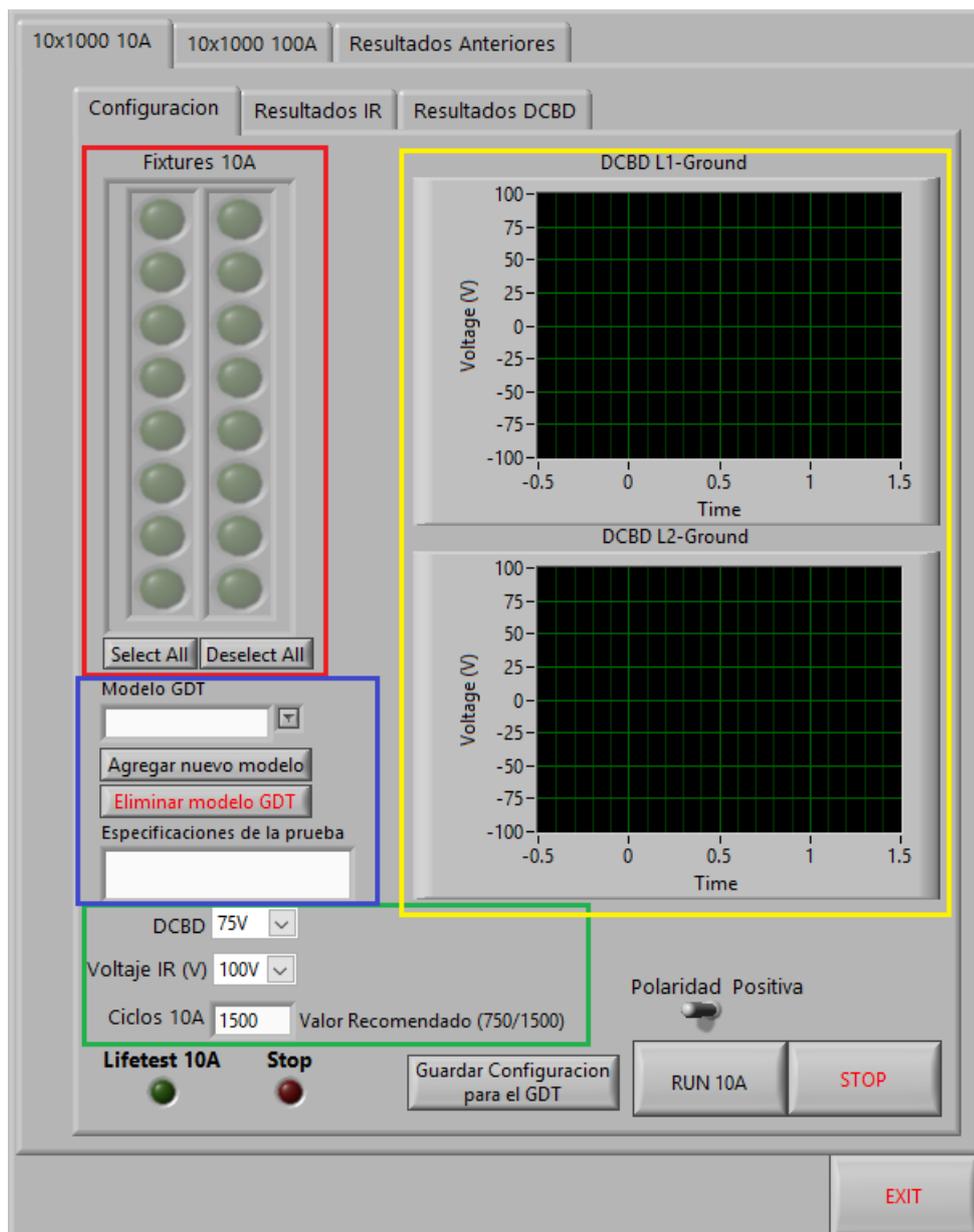


Figura 5.15: Pantalla principal de la interfaz gráfica.

En la figura 5.15 se pueden observar las funciones principales de la interfaz, señaladas con colores. A continuación se muestran cada parte según su color.

- Amarillo: Se muestran dos diagramas para mostrar los resultados de las pruebas de medición de DCBD.
- Azul: Lista de modelos de GDT con la opción de agregar o quitar un modelo de la lista. Además contiene un espacio para agregar las especificaciones de la prueba.
- Rojo: Botones para seleccionar entre los 16 *fixtures* disponibles.
- Verde: Menú de selección de los parámetros para las pruebas de medición de DCBD e IR, así como la selección de los ciclos a realizar.

Con respecto a los resultados de las pruebas estos se presentan en las dos siguientes pestañas de la interfaz como se muestran en las figuras 5.16 y 5.17.



Figura 5.16: Pantalla de resultados de IR de la interfaz gráfica.

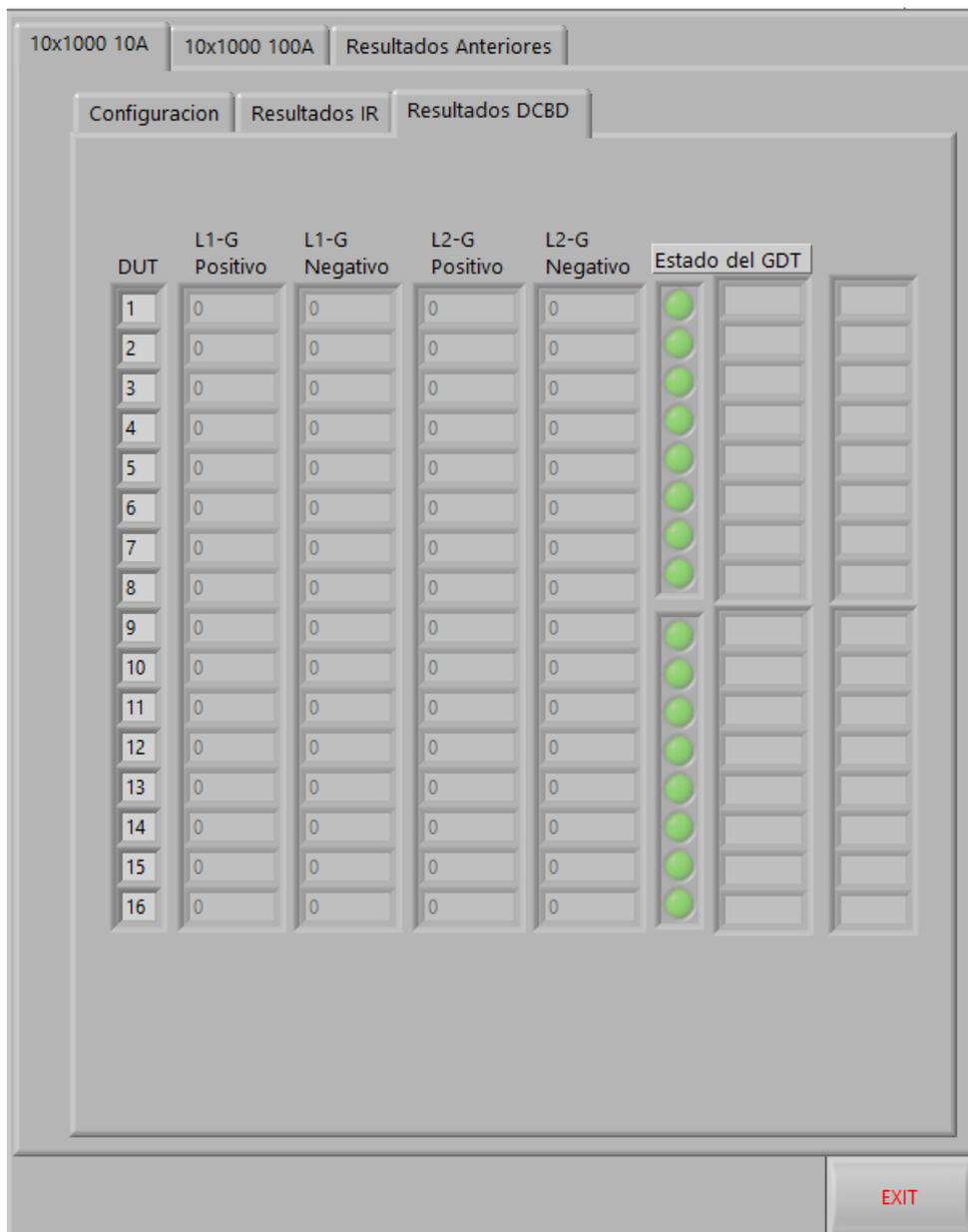


Figura 5.17: Pantalla de resultados DCBD de la interfaz gráfica.

En la figura 5.16 podemos observar que se listan los resultados obtenidos para las pruebas de medición del IR, además indica en que ciclo se encuentra la prueba actualmente y posee 16 LEDs color azul que permiten indicar cual de los 16 DUT esta en prueba actualmente.

Por otro lado en la figura 5.17 se muestra una lista de los resultados de DCBD para los 16 DUT. Una columna de LEDs muestran el estado actual del GDT, en color verde indican que el GDT sigue funcionando y su DCBD se encuentra dentro de los límites establecidos, mientras que un LED en color rojo indica que el DCBD se salió de los límites establecidos por lo que el componente esta dañado, junto a esta columna se mostrará un mensaje de *success* o *fail*, para cada caso respectivo y en el caso que el componente haya fallado se mostrará en cual repetición se presentó la falla.

En cuanto a los datos de la pruebas previas, el usuario podrá acceder mediante la pestaña de resultados anteriores como se muestra en la figura 5.18.

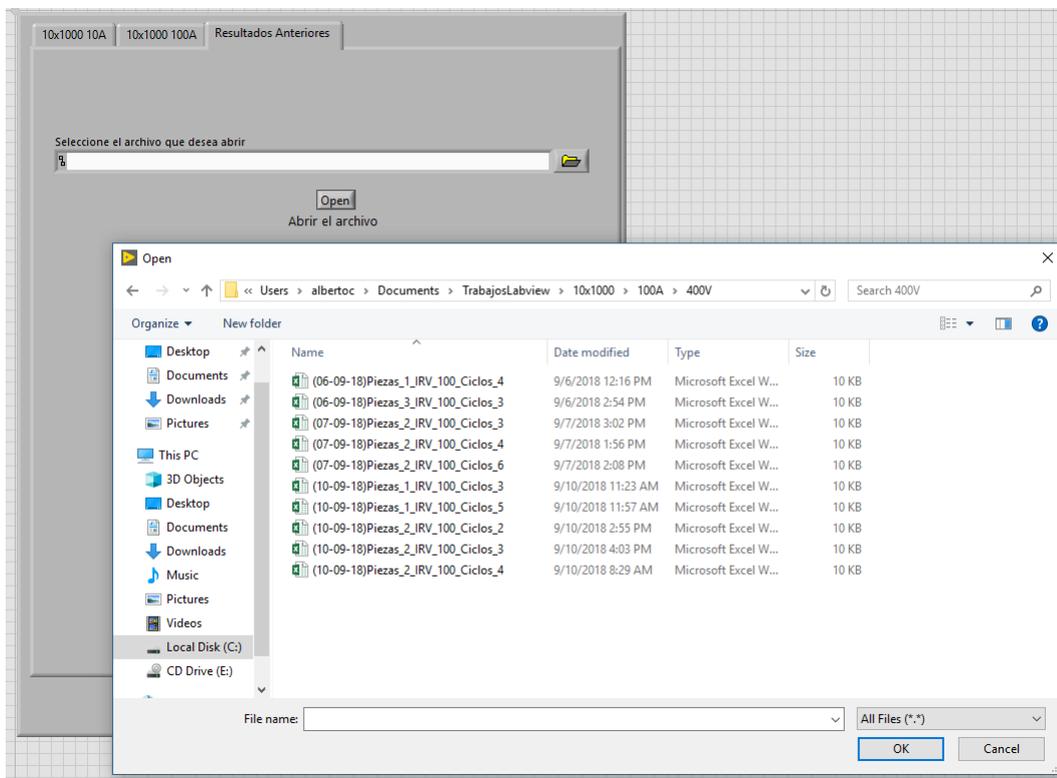


Figura 5.18: Pantalla de la interfaz gráfica para acceder a los resultados de las pruebas anteriores.

#### 5.5.4. Lógicas de almacenamiento de resultados.

Por último para realizar el almacenamiento de los datos obtenidos. Para esto se desarrolló el algoritmo mostrado en la figura 5.19.

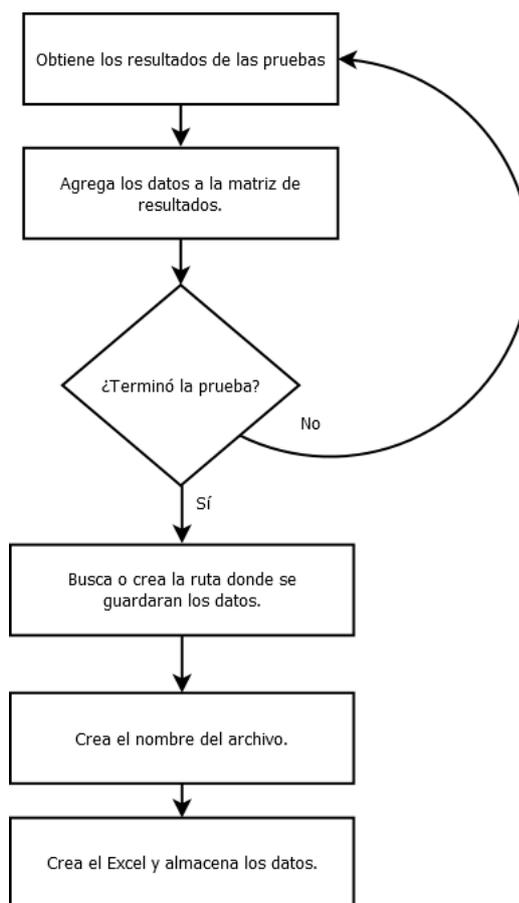


Figura 5.19: Algoritmo para crear un archivo Excel donde se logren almacenar los datos obtenidos de las pruebas.

Los datos que se van a almacenar en este archivo son los siguientes:

- Valores de resistencia de aislamiento entre las terminales L1-Ground y L2-Ground.
- Valores de DCBD entre L1-Ground y L2-Ground, tanto el valor positivo como el negativo.
- Valores máximos de la prueba de impulso de corriente.

Estos son los datos que se mostrarán al usuario en la interfaz gráfica (figura 5.16 y 5.17) y serán los valores con los que se podrá determinar el estado del GDT durante la prueba, comparándolos con los establecidos por el estándar ITU-T k.12.

Los datos se guardarán en una ruta específica creada por el programa para mantener de una manera más ordenada los datos guardados, la ruta seguirá la lógica que se muestra en la figura 5.20.

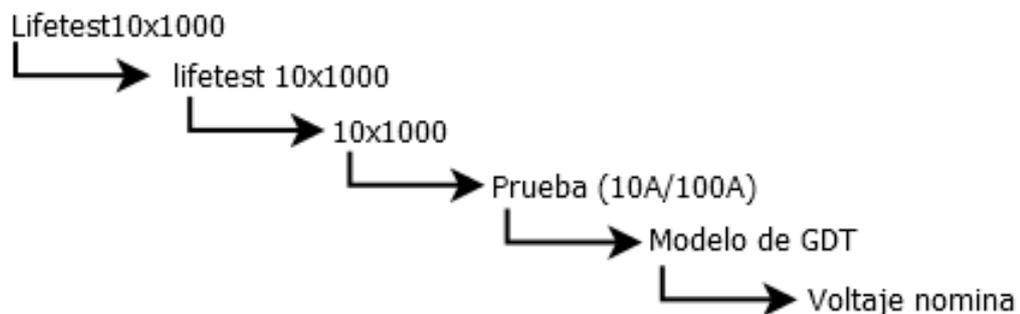


Figura 5.20: Ruta de directorios donde se almacenarán los resultados.

Si bien estas rutas facilitarán el acceso del usuario a los resultados de una manera más ordenada y lógica, es necesario que cada archivo posea un nombre característico, para evitar sobre escribir los resultados. Por lo que los nombres de los archivos poseen las especificaciones de la prueba tales como el modelo del GDT, la polaridad, el número de lote y los ciclos realizados, con el fin de diferenciar cada prueba realizada.

# Capítulo 6

## Resultados.

### 6.1. Pruebas IR.

Las pruebas de resistencia de aislamiento son las más simples de las tres etapas principales, ya que estas solamente consisten en realizar un pulso de voltaje con el fin de generar una corriente y a partir de estos dos resultados calcular el valor de resistencia de aislamiento del componente. Por lo que primeramente se genera una prueba básica con una resistencia, cuyo valor es conocido desde un inicio, para lograr determinar si el algoritmo es capaz de medir este valor de manera precisa. El resultado de esta prueba se muestra en la tabla 6.1, midiendo una resistencia de  $1000\Omega$  y otra de  $1M\Omega$ .

Tabla 6.1: Resultados de las pruebas de medición de la resistencia de aislamiento con una resistencia de prueba de  $1000\Omega$  y otra de  $1M\Omega$ .

Voltaje (V)	Corriente (A)	Resistencia ( $\Omega$ )
8	0.00797762	1002.8
100	0.0001001	998879

Realizando el mismo algoritmo pero esta vez utilizando los GDT obtenemos los resultados mostrados en la figura 6.1, utilizando 4 GDT en las posiciones 1, 2, 5 y 11.

Resultados IR							
	DUT	L1-Ground	L2-Ground		DUT	L1-Ground	L2-Ground
●	1	6.30223E+7	6.34224E+7	●	9	0	0
●	2	6.31427E+7	6.35068E+7	●	10	0	0
●	3	0	0	●	11	6.30408E+7	6.33289E+7
●	4	0	0	●	12	0	0
●	5	6.305E+7	6.34505E+7	●	13	0	0
●	6	0	0	●	14	0	0
●	7	0	0	●	15	0	0
●	8	0	0	●	16	0	0

Figura 6.1: Medición de resistencia de aislamiento de 4 GDT.

## 6.2. Pruebas DCBD.

Para lograr determinar el funcionamiento de las pruebas de medición del DCBD, primeramente se realizó una prueba con un valor de voltaje menor, en este caso se utilizó como valor final de la rampa de voltaje 7.5V. En la figura 6.2 se muestra la gráfica resultante para dicha prueba.



Figura 6.2: Prueba para determinar el comportamiento de las rampas generadas por el sourcemeter ke2410.

Una vez determinado el comportamiento de las rampas, se procede a realizar las

pruebas para lograr rampas de voltaje más altos, buscando a su vez que estas posean una pendiente de  $2kV/s$ . En la figura 6.3 se puede observar los resultados de dicha prueba con un valor de voltaje de  $250V$ .

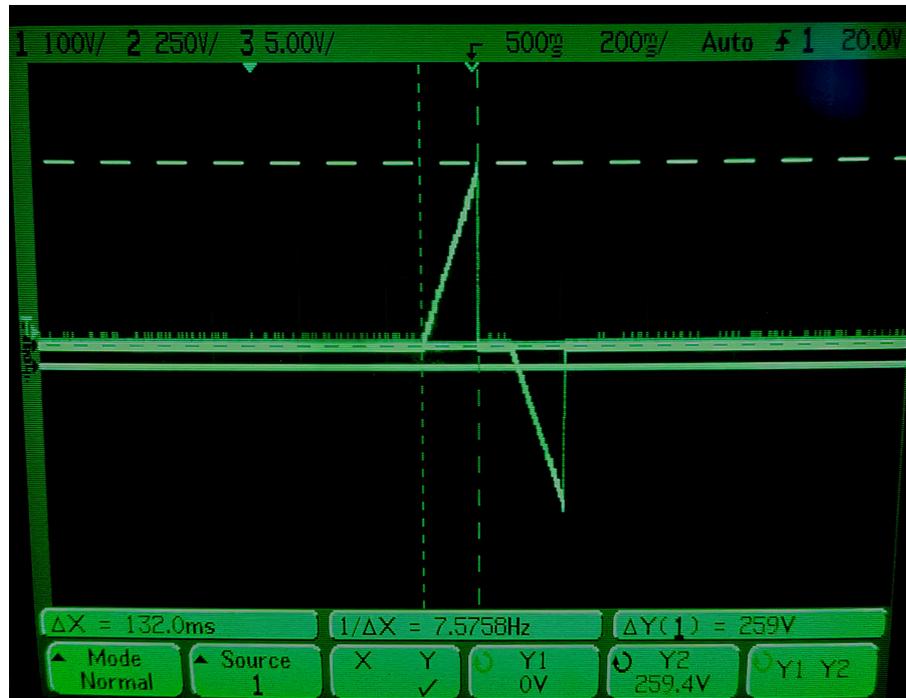


Figura 6.3: Resultado de la prueba de la rampa de voltaje de  $25V$  con una pendiente de  $2kV/s$ .

Logrando la pendiente deseada se procede a realizar la prueba con un GDT para obtener resultados experimentales de los valores DCBD reales, esta prueba se puede observar en la figura 6.4. Los resultados numéricos de los valores de DCBD se muestran en la figura 6.5

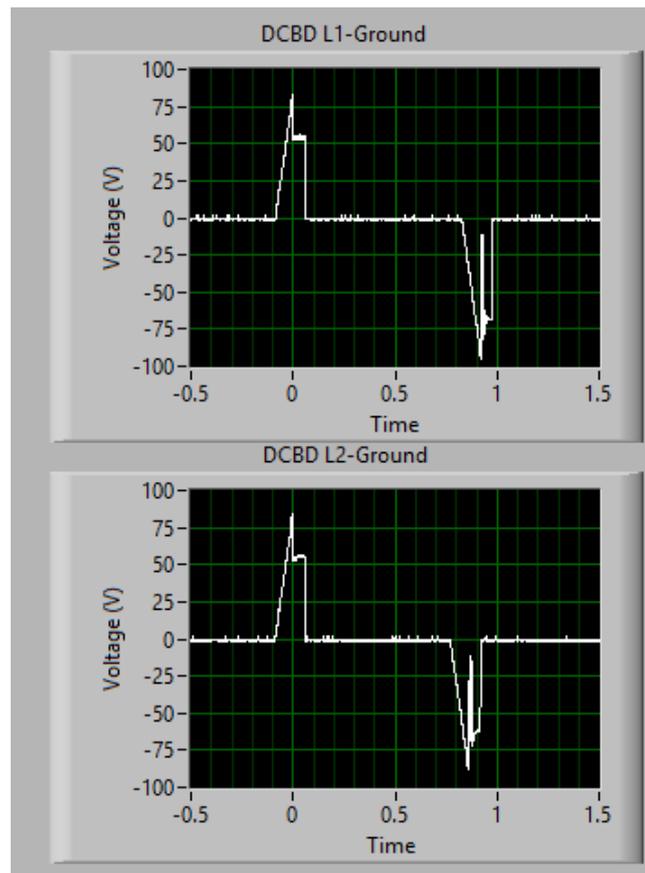


Figura 6.4: Resultados de las pruebas finales de DCBD con un GDT de 90V.

DUT	L1-G Positivo	L1-G Negativo	L2-G Positivo	L2-G Negativo
1	82.8125	95.3125	84.375	87.5

Figura 6.5: Resultados máximos y mínimos de las pruebas DCBD.

### 6.3. Pruebas de impulsos de corriente.

Primeramente para verificar las pruebas de impulsos de corriente fue necesario confirmar que la fuente es capaz de generar una curva de corriente  $10 \times 1000 \mu s$  valida, para esto se captó con el osciloscopio la curva, con el fin de determinar los tiempos de subida y bajada de la misma y así demostrar que efectivamente los tiempos son los deseados. En las figuras 6.6 y 6.7 se observan los resultados del tiempo de subida y tiempo de bajada respectivamente.

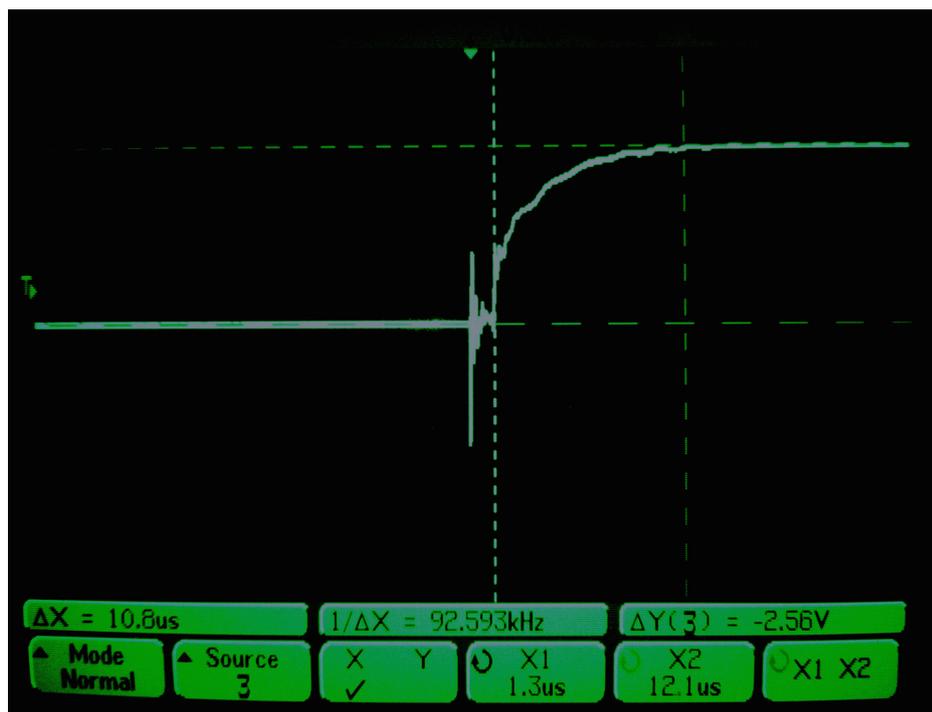


Figura 6.6: Tiempo de subida de la curva de corriente  $10 \times 1000 \mu s$ .

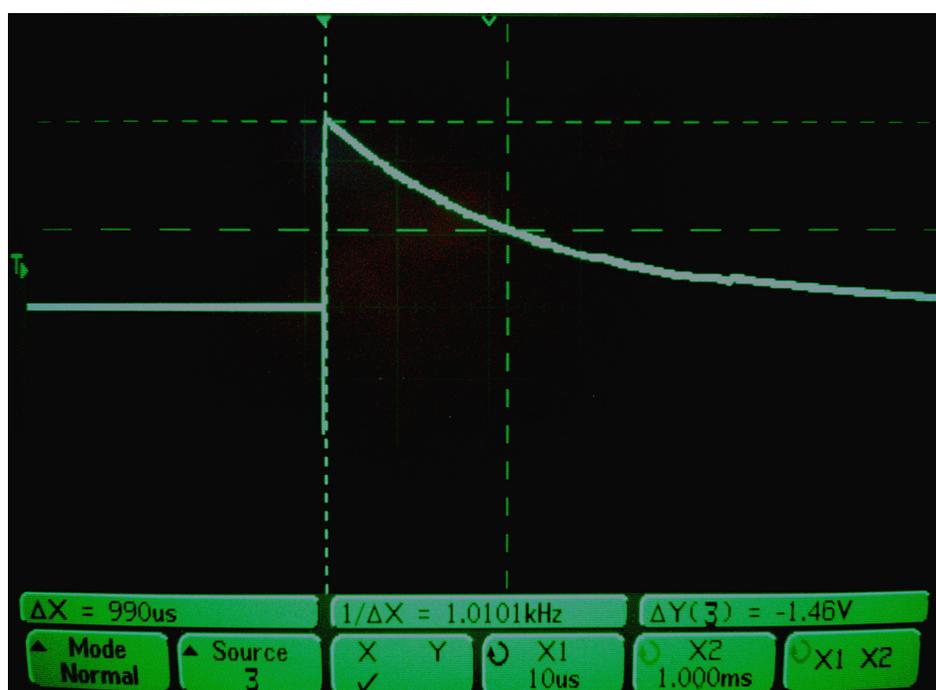


Figura 6.7: Tiempo de bajada de la curva de corriente  $10 \times 1000 \mu s$ .

Luego de obtener una curva  $10 \times 1000 \mu s$  válida, se procede a realizar las pruebas con los GDT. Lo que se busca de esta prueba es medir el valor del *Impulse Spark-over*, para esto se aplica el impulso  $10 \times 1000 \mu s$  y se mide el valor máximo que se presenta en las

terminales del GDT en el momento en que empieza a fluir la corriente por él. En la figura 6.8 podemos observar los resultados de dicha prueba.

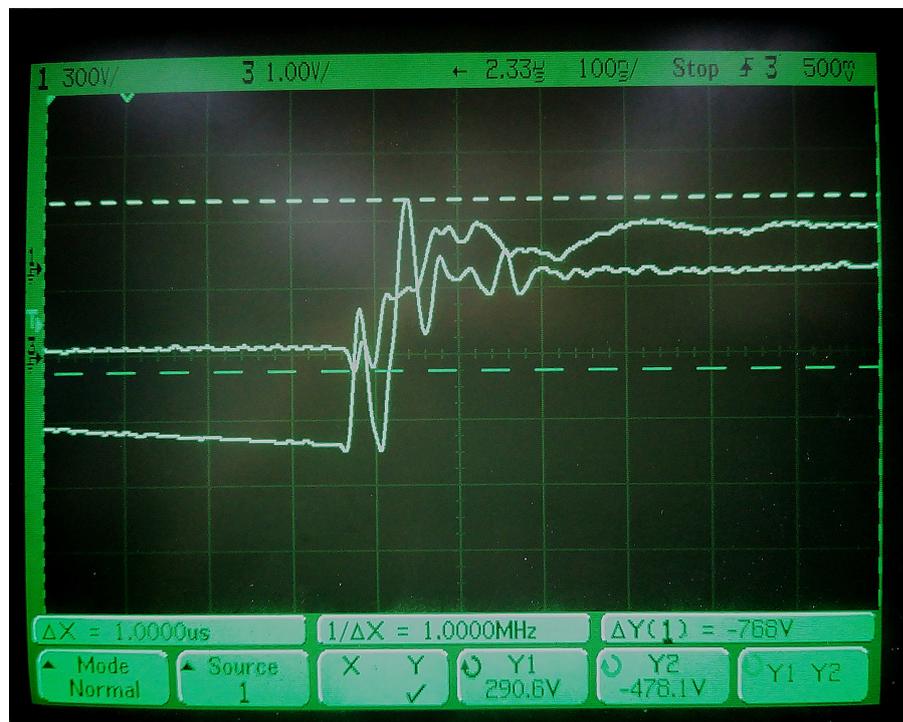


Figura 6.8: Resultado de la prueba de *Impulse Spark-Over* con un GDT de 90V.

Además se realizó la prueba utilizando dos GDT de 600V, uno en buen estado y otro en mal estado para lograr observar las diferencias en las respuestas entre uno y otro, pero principalmente para lograr demostrar que el programa es capaz de obtener estos resultados sin importar el estado del GDT. En la figura 6.9 se muestran los resultados del *Impulse Spark-Over* para ambos GDT, mientras que en la figura 6.10 se muestran los resultados del DCBD de esta prueba.

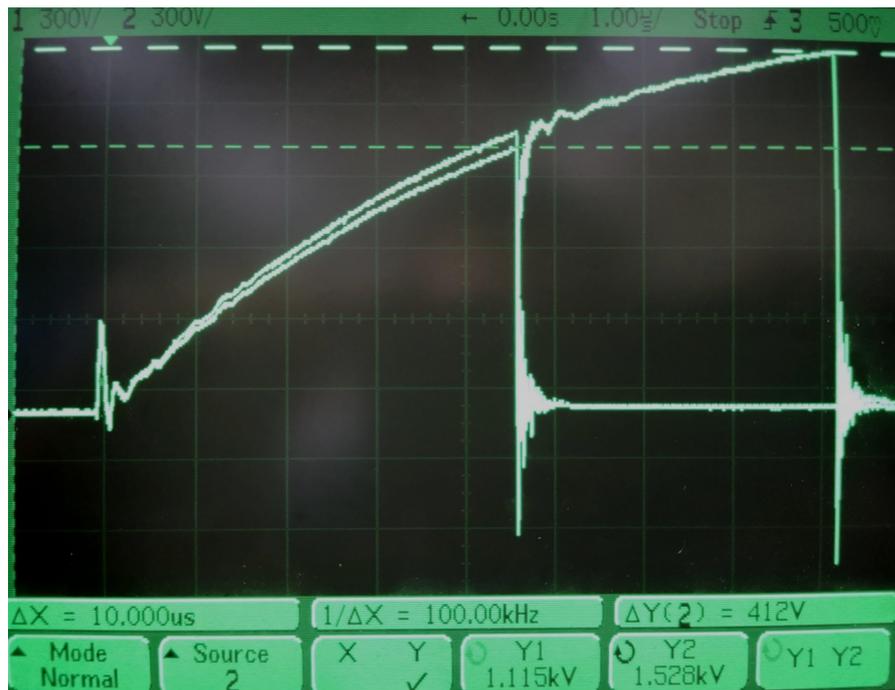


Figura 6.9: Resultado de la prueba de *Impulse Spark-Over* con dos GDT de 600V, un GDT en buen estado y otro dañado.

DUT	L1-G Positivo	L1-G Negativo	L2-G Positivo	L2-G Negativo
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	956.25	965.625	721.875	721.875

Figura 6.10: Resultado de la prueba de DCBD con dos GDT de 600V, un GDT en buen estado y otro dañado.

## 6.4. Interfaz gráfica.

Para corroborar el funcionamiento de la interfaz gráfica con todas sus especificaciones, se procede a realizar una prueba con la cual podamos capturar los datos e ir monitorizando los resultados en la interfaz, en las figuras 6.11, 6.12 y 6.13 se muestran los resultados de estas pruebas.

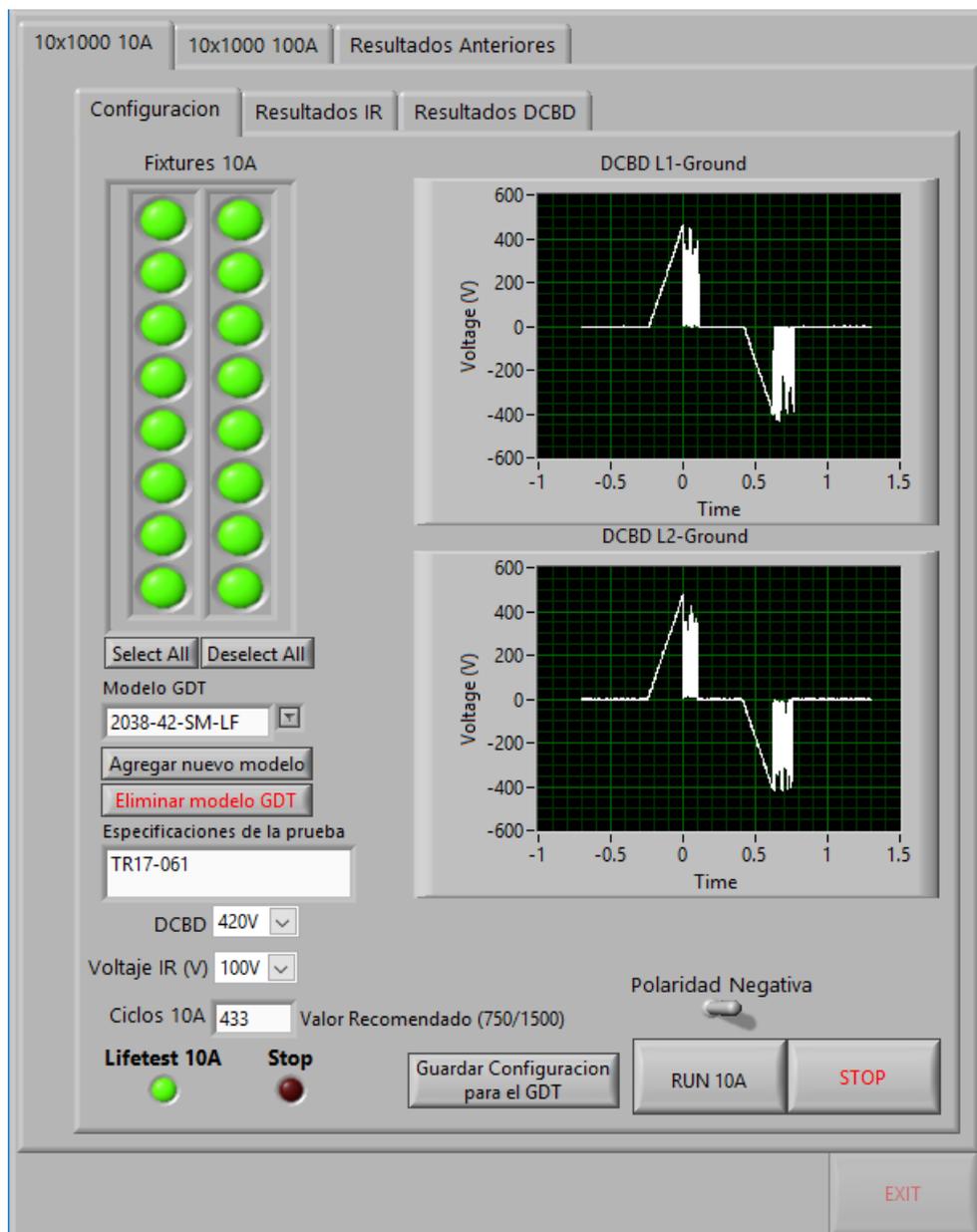


Figura 6.11: Comportamiento de la primera pantalla de la interfaz gráfica en la ejecución del programa.

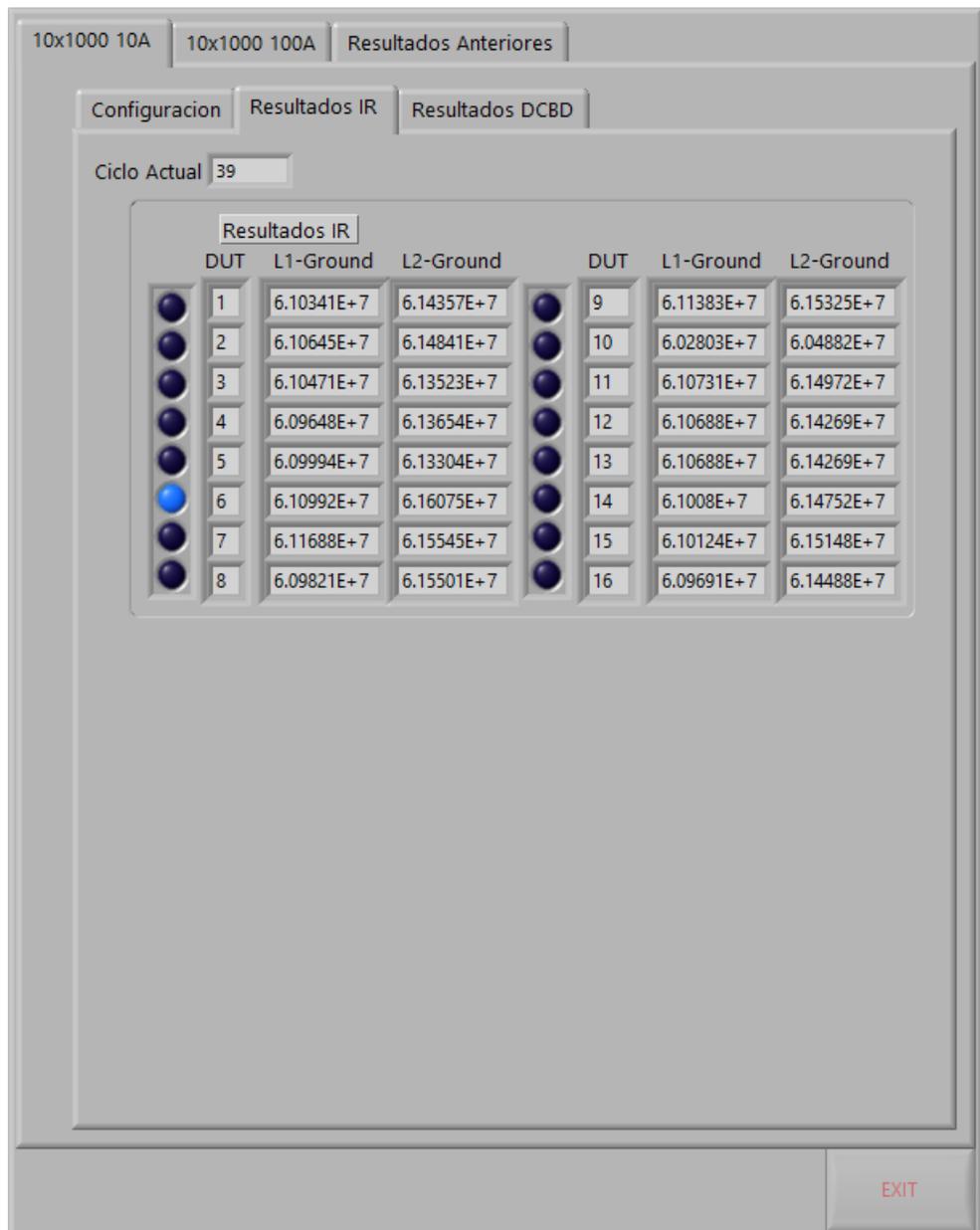


Figura 6.12: Resultados de IR en la interfaz gráfica en la ejecución del programa.

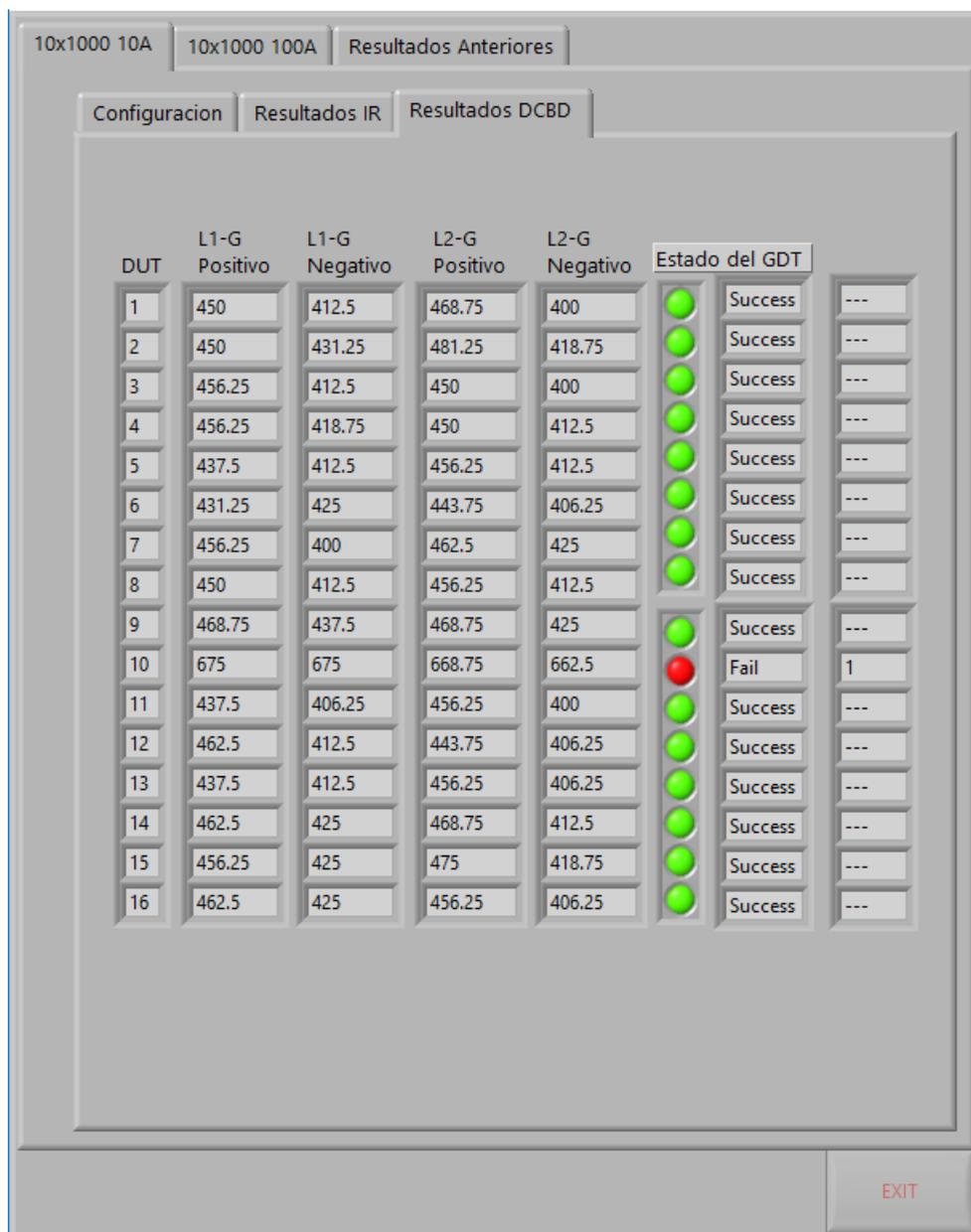


Figura 6.13: Resultados de DCBD en la interfaz gráfica en la ejecución del programa.

## 6.5. Almacenamiento de datos.

Primeramente para el almacenamiento de datos, se busca lograr una ruta de directorios creada por el algoritmo, que permita guardar los archivos resultantes en carpetas específicas del modelo del GDT y las especificaciones de la prueba. Una ruta de prueba creada por el algoritmo se muestra en la figura 6.14. Además en la figura 6.15 se muestra la ruta creada para una prueba real del modelo 2038 a 420V.

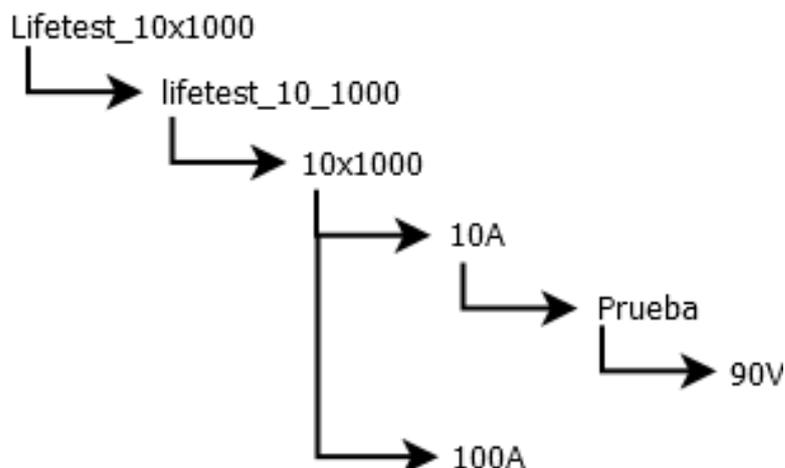


Figura 6.14: Ruta creado por el programa para guardar los resultados de las pruebas a 90V.

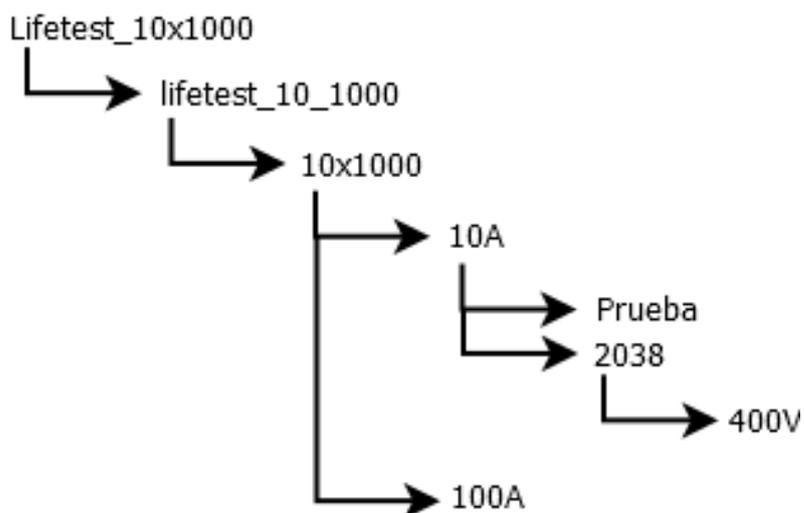


Figura 6.15: Ruta creado por el programa para guardar los resultados de las pruebas de los GDT 2038 a 420V.

Para lograr determinar si los nombres de los archivos creados son los esperados, se corrieron varias pruebas y se obtuvieron los archivos generados con sus respectivos nombres como se muestran en la figura 6.16, lo que se busca es obtener archivos que posean las especificaciones de la prueba, para así evitar escribir sobre los archivos anteriormente creados.

Name	Date modified	Type
 (12-10-18)10_2038-42-SM-LF_TR17-061_16_75.xlsx	10/12/2018 11:24 AM	Microsoft Excel W...
 (13-10-18)10_2038-42-SM-LF_TR17-061_16_675.xlsx	10/16/2018 8:02 AM	Microsoft Excel W...

Figura 6.16: Archivos generados por el programa para lograr almacenar los datos de la pruebas.

Con estas mismas pruebas podemos corroborar el contenido en los archivos de Excel, para así lograr demostrar que estos poseen todos los datos y resultados deseados, en las figuras A.2 y A.3 se muestran los productos de las pruebas realizadas.

## 6.6. Tiempos de Ejecución.

Para lograr determinar los tiempos de ejecución de las pruebas, estas se ejecutaron y se midió desde LabView el tiempo que tardaban en finalizar. Los tiempos de ejecución se muestran en la tabla 7.1.

Tabla 6.2: Tiempos de ejecución del algoritmo para lifetest 10A 10x1000 de GDT. Pruebas realizadas con GDT de 420V, los tiempos varían dependiendo del valor de voltaje de la prueba.

Tiempos de pruebas individuales.	
Prueba	Tiempo (DD:HH:mm:ss)
Tiempo total de una repetición.	00:00:00:12.24
Tiempo total de un ciclo de 16 piezas.	00:00:03:15.12
Tiempo total de un ciclo de 15 piezas.	00:00:03:03.09
Tiempo total de un ciclo de 1 a 14 piezas.	00:00:03:00.00
Prueba de 750 repeticiones 16 piezas.	01:16:39:21.60
Prueba de 1500 repeticiones 16 piezas.	03:09:17:16.80
Pruebas con diferentes posiciones de los <i>fixtures</i> .	
Prueba	Tiempo (DD:HH:mm:ss)
2 ciclos 4 piezas en posiciones 1, 2, 3 y 4.	00:00:04:22.28
2 ciclos 4 piezas en posiciones 13, 14, 15 y 16.	00:00:04:22.31
2 ciclos 4 piezas en posiciones 2, 10, 12 y 16.	00:00:04:22.28
2 ciclos 4 piezas en posiciones 1, 2, 5 y 11.	00:00:04:22.29

## 6.7. Nivel de automatización.

Para lograr determinar el nivel de automatización el sistema debe poseer ciertas características que permitan darle la autonomía necesaria al sistema, en las figuras 6.17, 6.18, 6.19 y 6.20 podemos observar las características de la interfaz que nos permiten detallar el nivel de automatización que posee el sistema diseñado, el cual se espera sea de nivel rígido.

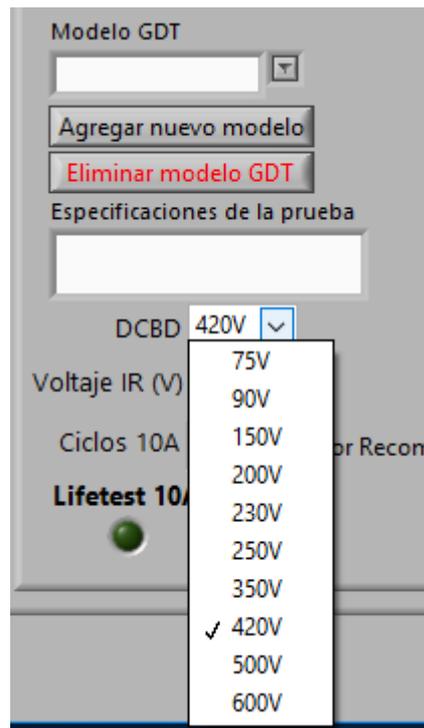


Figura 6.17: Lista de valores posibles para el voltaje del DCBD.



Figura 6.18: Valores posibles para el voltaje de la prueba de IR.

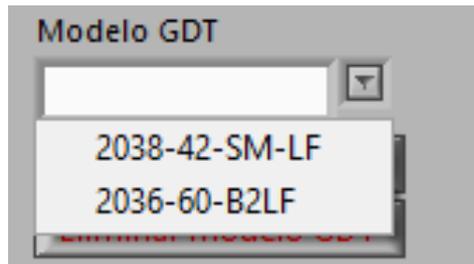


Figura 6.19: Ejemplo de lista de modelos de GDT.

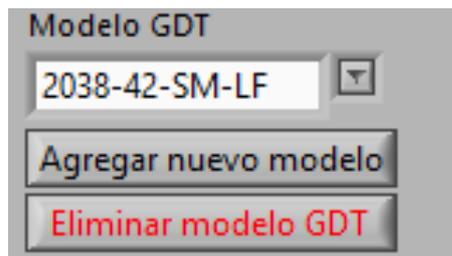


Figura 6.20: Opciones de agregar y borrar modelos de GDT.

# Capítulo 7

## Análisis de resultados.

### 7.1. Pruebas IR.

Primeramente al realizar las pruebas con un valor de resistencia conocida podemos observar que el resultado es exitoso, obteniendo un resultado de  $1002.8\Omega$  (cuadro 6.1) para una resistencia cuyo valor teórico es de  $1000\Omega$ , obteniendo un error de 0.23 %, error bastante aceptable para lo que las pruebas requieren, mientras que con la resistencia de  $1M\Omega$  obtenemos un error del 0.11 %, ambos errores son bastante bajos por lo que podemos confirmar que el funcionamiento de la lógica para esta prueba es correcto.

Una vez realizadas las pruebas utilizando los GDT en el PCB mostrado en la figura 4.2, obtenemos los resultados de la figura 6.1, observamos que los valores rondan los  $65M\Omega$  valor relativamente bajo si lo comparamos con los valores definidos por el estándar ITU-T k.12, ya que estos se especifican en  $1G\Omega$ . Investigando y experimentando se logró obtener una hipótesis de que la resistencia obtenida presenta un valor tan bajo debido a un problema en el diseño del PCB, ya que este presenta corrientes de fuga en los 15 *fixtures* restantes cuando estos están apagados, lo que produce resistencias parásitas paralelas al GDT sometido a las pruebas, estas resistencias producen que el multímetro mida un valor de resistencia mucho más bajo al valor real de IR del GDT, por cuestiones de tiempo y alcance del proyecto esto no se ha logrado determinar con certeza al finalizar este proyecto, por lo que se mantiene como una hipótesis para un posible estudio a futuro.

Este problema ajeno al proyecto impide que la interfaz y el control del sistema sea capaz de obtener y mostrar los valores reales de IR de la prueba. Aun así se mantiene la pestaña que muestra los resultados, con la intención de corregir el problema presente en el PCB a futuro, permitiendo así medir correctamente los valores de resistencia.

### 7.2. Prueba DCBD.

Como se observa en la figura 6.2, la primera prueba de generación de las rampas de voltaje fue exitosa, logrando alcanzar los  $7.5V$  tanto en polaridad positiva como negativa, se puede observar que el step utilizado produce una pendiente muy baja, comparada con lo que se necesita para la prueba real. Ya que alcanza los  $7.5V$  en un tiempo aproximado de  $20ms$ , lo cual nos da una pendiente de  $375V/s$ , aproximadamente 5 veces menor a la pendiente necesaria para estas pruebas, la cual es de  $2kV/s$ . Para

poder lograr esto se realizó un ajuste en el valor de los escalones de voltaje, aplicando este cambio podemos observar en la figura 6.3 como con una prueba de  $250V$ , alcanza un valor de tensión de  $259V$  en  $132ms$ , lo que nos da una pendiente de  $1.96212kV/s$ , la cual se adapta mucho mejor a la pendiente establecida en el ITU-T k.12, con esto se confirma que la pendiente establecida por el programa se apega a las normas establecidas, por lo que se puede aplicar para las pruebas reales.

En la figura 6.4 podemos observar el comportamiento de esta prueba de medición del DCBD en un GDT, esta prueba se realizó con un GDT cuyo valor nominal es de  $90V$ , como se observa en la gráfica y más claramente en la figura 6.5 los valores del DCBD se encuentran entre  $80V$  y  $95V$ , valores que según el ITU-T k.12, para este tipo de GDT, deberían estar en el rango de  $[60-120]V$ , por lo que con estos resultados no solo comprobamos que el GDT probado está en buen estado, si no también podemos afirmar que el sistema es capaz de replicar las pruebas de DCBD y recolectar los datos correctamente. Con un importante detalle a tomar en cuenta, el cual es la capacidad de replicar el proceso las 4 veces necesarias, como se observa en la figura 6.4, para que la prueba se apegue a las normas establecidas por el ITU-T k.12.

Además con la ayuda de los pines de Activar Canal 1 y Activar Canal 2 (cuadro 4.2) podemos asegurar que en caso de utilizar dispositivos de 3 terminales, se puedan probar dos terminales separadas manteniendo la tercer terminal desconectada, tal y como se especifica en el estándar mencionado previamente.

### 7.3. Pruebas de impulsos de corriente.

En las figuras 6.6 y 6.7 podemos observar como se comporta la curva de corriente en el tiempo, si recordamos del capítulo 3, la figura 3.4, este tipo de curva poseen un tiempo de bajada y subida muy específicos, para el caso del tiempo de subida, se especifica que en un tiempo de  $10\mu s$  la curva debe alcanzar su valor máximo. En la figura 6.6 se observa, de los marcadores, que la curva alcanza su valor máximo en un  $\Delta t$  de  $10.8\mu s$ , mientras que el tiempo de bajada de la figura 6.7 muestra una caída de la curva, al 50% de su valor máximo, en un  $\Delta t$  de  $990\mu s$ , que recordando nuevamente la figura 3.4 este valor debe ser de  $1ms$ . Por lo que obtenemos un error, para estos tiempos de 8% y 1% respectivamente, errores suficientemente bajos como para permitir realizar las pruebas de este tipo de curvas.

De la figura 6.8 se puede observar el resultado de la primera prueba realizada de *Impulse Spark-Over* para un GDT de  $90V$ , se observa que el valor máximo presente entre las terminales del GDT es de  $478.1V$ , este valor, al igual que el DCBD nos permite conocer el estado del GDT. Para el caso de un valor nominal de  $90V$  el *impulse spark-over* debe poseer un valor de  $450V$ , con lo que podemos confirmar que el GDT se encuentra en buen estado, pero además un detalle más importante a destacar es que el algoritmo es capaz de recrear la prueba y capturar los resultados de la prueba de manera correcta. Con esto podemos confirmar que el algoritmo propuesto anteriormente para realizar las pruebas de impulso de corriente funciona según lo deseado.

Con el funcionamiento del algoritmo confirmado podemos realizar las pruebas de *impulse spark-over* con un GDT en buen estado y otro dañado para lograr observar si el algoritmo mantiene un funcionamiento correcto aunque los componentes no posean un buen estado, en la figura 6.9 se muestran las gráficas resultantes de ambos GDT,

podemos observar que el GDT en buen estado (Canal 2) posee un *impulse spark-over* de 1115V, mientras que el GDT dañado (Canal 1) posee un *impulse spark-over* de 1500V, esta prueba se realizó con un GDT de tipo 2 con valor nominal de 600V, sabiendo que los valores especificados por el ITU-T k.12 son de aproximadamente de 1100V para este tipo de GDT, podemos confirmar la diferencia que existe entre uno y otro. Con el detalle importante de que el programa efectivamente es capaz de captar dichas diferencias y de generar la prueba independientemente del estado del GDT.

Para asegurar que uno de los GDT esta dañado se mide el DCBD, en la figura 6.10 se observa que el GDT dañado se sale de los rangos especificados, los cuales son de [420-800]V para este tipo de GDT, y los resultados muestran valores de aproximadamente 950V para el GDT en mal estado.

## 7.4. Interfaz gráfica.

Con respecto a la interfaz gráfica, como se muestra en las figuras 6.11, 6.12 y 6.13, esta cuenta con tres pantallas principales con la cuales el usuario puede interactuar. Los principales resultados de esta sección se muestran en la tabla mostrada a continuación.

Tabla 7.1: Análisis de resultados de la interfaz gráfica.

Resultado	Análisis
Selección de fixtures.	En la interfaz (figura 6.11) se muestran los 16 fixtures en forma de botones LED, que permiten seleccionar el deseado.
Parámetros de la prueba.	En la figura 6.11 se muestran los menús para seleccionar los voltajes nominales de la prueba y el voltaje para medir el IR.
Número de ciclos.	En la figura 6.11 se muestra el espacio para colocar el número de ciclos deseado. Además se muestra un mensaje con los ciclos recomendados para la prueba.
Modelo de GDT.	La interfaz muestra un menú con los modelos disponibles y se permite agregar o quitar alguno de estos modelos. También se cuenta con un espacio para especificaciones del lote probado
Otros aspectos.	La interfaz muestra los botones para iniciar o detener la prueba. Además muestra dos gráficas para observar en tiempo real el comportamiento del GDT.
Resultados del IR.	Se muestran los resultados en tiempo real, además el número de ciclo se actualiza correctamente, al igual que el LED que muestra el GDT probado en tiempo real.
Resultados del DCBD.	Se muestran los resultados para los 16 fixtures (o el número seleccionado de fixtures). Se actualiza correctamente el LED para mostrar el estado del GDT, así como el ciclo de fallo.

## 7.5. Almacenamiento de datos.

Se puede observar en las figuras 6.14 y 6.15 la ruta que se creó para almacenar los resultados, esta tendrá una ruta raíz específica para todos los archivos, esta ruta será la carpeta 10x1000 que estará almacenada en la misma carpeta del ejecutable del programa. Una vez dentro de esta carpeta se dividirán las rutas por pruebas ya sean de 10A o 100A, luego por modelos de GDT y por último por valores de voltaje nominal, tal y como se puede observar en la figura 6.15 primero se ingresa a la carpeta de 10A, seguidamente la carpeta del modelo, en este caso sería la carpeta de 2038 (si esta carpeta no existe el programa se encarga de crearla) y dentro de esta se ingresa a la carpeta del voltaje nominal de la prueba, en este caso de 420V, esa será la ruta donde se guarden los resultados de dicha prueba, como se puede observar en la figura 6.16.

Si bien la ruta de almacenamiento es un detalle importante a tomar en cuenta para el almacenamiento, lo que realmente es necesario destacar son los datos que se guardaran en estos archivos, para esto podemos observar de la figura A.2 y A.3, se pueden destacar los 9 datos que se almacenan en estos archivos, los primeros 4 son los valores del DCBD en sus 4 pruebas alternando polaridad y terminales conectadas, los 2 valores siguientes corresponden a los valores de resistencia de aislamiento medidas en cada terminal del dispositivo, por último se guardan tres valores correspondiente a la prueba del impulso de corriente, estos valores son los valores máximos medidos en cada terminal del dispositivo y el valor máximo alcanzado por la curva 10x1000 $\mu$ s.

En las figuras se observan que estos datos se guardan para cada DUT en cada ciclo de la prueba, tanto para la polaridad positivo (figura A.2) como en la polaridad negativa (figura A.3). Para acceder a estos resultados la interfaz gráfica cuenta con una pestaña extra con la cual el usuario puede buscar y abrir los resultados de las pruebas anteriores como se muestra en la figura 5.18.

## 7.6. Tiempos de ejecución.

Si observamos de la tabla 7.1, el tiempo promedio de una prueba es de 12.24 segundos, mientras que un ciclo completo dura aproximadamente 3 minutos con 15 segundos. Estos tiempos realmente no son prescindibles, ya que como observamos en ese mismo cuadro las pruebas completas de 750 y 1500 duran aproximadamente un día con 16 horas y 3 días con 9 horas respectivamente, por lo que los tiempos individuales no son tal relevantes en esta prueba, lo que si resulta de vital importancia es resaltar el tiempo de la prueba de 14 piezas e inferiores, esto debido a que no se ve una disminución en el tiempo de la prueba ya que todas tardan 3 minutos, esto nos dice que efectivamente la prueba no puede reiniciar el ciclo hasta que se hayan transcurrido los 3 minutos establecidos, con el fin de evitar daños térmicos en la piezas, este tiempo nos confirma que el algoritmo diseñado cumple satisfactoriamente los tiempos establecidos por los expertos.

Un detalle bastante importante a destacar son los tiempos obtenidos para las pruebas realizadas con diferentes posiciones de *fixtures*, ya que el objetivo es lograr un algoritmo que permita elegir la posición deseada para la prueba y que esto no afecte el tiempo de la prueba, ya que con esto se busca realizar un sistema que sea capaz de

evitar las posiciones de *fixtures* dañados. Como se observa los 4 tiempos medidos son bastante similar dando diferencias simplemente de centésimas de segundo entre una y otra, como se observa se variaron las pruebas utilizando posiciones variadas entre las posibles combinaciones. Por lo que podemos concluir que el sistema es capaz de evitar estos *fixtures* sin afectar el tiempo total de la prueba.

## 7.7. Nivel de automatización.

Recordando de la sección 2.1.3 la taxonomía empleada contenía 4 funciones principales. Para lograr observar el avance del nivel de automatización primero se observa el nivel del sistema anterior.

Tabla 7.2: Nivel de automatización del sistema anterior.

Función	Supervisión	Generación	Selección	Implementación
Encargado	Compartida	Compartida	Humano	Computador.

Como se observa el sistema anterior tenía un nivel de automatización igual a 5, es decir era un sistema de soporte de decisión. Ahora analizamos las funciones o tareas del sistema actual, esto se muestra en la tabla 7.3

Tabla 7.3: Análisis del nivel de automatización del sistema actual.

Función	Análisis	Encargado
Supervisión	El computador mide y analiza los resultados en tiempo real de cada variable de la prueba. Además en caso de algún error por parte de los instrumentos el sistema avisa al operario. El operario también puede supervisar los resultados desde la interfaz	Compartido
Generación	El computador posee una lista de posibles valores nominales y voltajes de medición de IR como se muestra en las figuras 6.17 y 6.18 respectivamente. Además posee la lista de modelos de GDT mostrada en la figura 6.19. El usuario no puede generar ninguna otra opción fuera de las establecidas, por lo que el operador no toma parte de la generación de la prueba.	Computador
Selección	El operador selecciona todos los parámetros de la prueba, selecciona el voltaje nominal de la prueba, voltaje para medir el IR y los ciclos a generar.	Humano
Implementación	El sistema implementa las pruebas de manera automática, basado en la selección hecha por el operario.	Computador

Con los análisis de la tabla 7.3, se puede observar que el nivel alcanzado según la taxonomía mostrada en la sección 2.1.3, el sistema posee un nivel de automatización de

7, es decir es un sistema rígido, por lo que se aumentó en dos niveles la automatización del sistema.

# Capítulo 8

## Conclusiones y Recomendaciones.

### 8.1. Conclusiones.

Los resultados presentados en los capítulos anteriores nos permite demostrar que el sistema diseñado es capaz de replicar cada una de las etapas necesarias para el desarrollo de una prueba de lifetest, apegándose a las especificaciones de la sección 7.6.4 del ITU-T k.12, lo que implica cumplir las secciones 6.1, 6.2, 6.6, 7.1, 7.2 de esta norma (Ver anexo B.1). Por lo que nos permite asegurar el cumplimiento de las normas de las pruebas que determinan la calidad de los productos.

Se pudo observar anteriormente que el sistema permite variar la configuración de las pruebas a conveniencia, cambiando los parámetros de la misma, como lo son el número de piezas probadas y las posiciones de las mismas o el número de ciclos de la prueba. Esto muestra un sistema más flexible, que permite adaptarse a las necesidades del departamento de control de calidad de la empresa.

En la sección 7.4 se observó que la interfaz gráfica del sistema es capaz de mostrar los resultados más importantes de la prueba en tiempo real, además de contar con opciones para acceder a resultados anteriores. La interfaz cuenta con opciones de valores de tensión y modelos de GDT para que el operario pueda realizar las pruebas a conveniencia, especificando los detalles de cada prueba, sin salirse de la norma ITU-T k.12.

Finalmente el sistema posee un grupo de opciones predeterminadas para que el usuario pueda escoger entre ellas, según sea lo deseado para la prueba que se va a realizar. Estas opciones satisfacen las especificaciones dadas por el ITU-T k.12, gracias a esto, el sistema se encarga completamente de la generación de las pruebas, dándole así un nivel de automatización que alcanza el nivel 8, osea sistema rígido, aumentando así el nivel de automatización del sistema en dos niveles.

### 8.2. Recomendaciones.

El software diseñado cuenta con la capacidad de realizar las pruebas de 10A y de 100A simultáneamente, esta opción actualmente se encuentra desactivada debido a que la comunicación GPIB no permite comunicarse con dos instrumentos de manera paralela, ya que esto provoca que se produzcan errores en la comunicación. Para corregir este problema es recomendable utilizar nuevos equipos de medición que posean otro

protocolo de comunicación, que permita realizar estas dos pruebas de manera simultánea.

Las mediciones de IR presentan problemas debido a posibles problemas presentes en la circuitería del PCB. La hipótesis actual sobre el problema es la presencia de corrientes de fuga en los fixtures del PCB. Esta hipótesis no ha sido confirmada al momento de terminar este proyecto. Este problema solo se puede corregir cambiando el diseño del PCB para lograr así disminuir las corrientes de fuga, permitiendo captar correctamente estos valores de resistencia. Es recomendable realizar un análisis más a fondo de esta placa para determinar la fuente de este problema.

# Apéndice

# A

## A.1. Abreviaturas

- **GDT:** Gas Discharge Tube.
- **IR:** Insulation Resistance/Resistencia de Aislamiento.
- **DCBD:** Direct Current BreakDown.
- **GPIB:** General Purpose Interface Bus
- **DUT:** Device Under Test/Dispositivo Bajo Prueba

## A.2. Glosario

- **Breakdown:** Ruptura eléctrica de la brecha de descarga de un tubo de descarga de gas.
- **Tubo de Descarga de Gas:** Una o varias brechas de gas, encapsuladas en un medio de descarga, diseñado para proteger a equipos o usuarios contra impulsos de alto voltaje.
- **Voltaje DCBD Nominal:** Valor de voltaje definido por el fabricante en el cual el componente presentará el breakdown.
- **Impulse Breakdown:** Valor máximo de voltaje presente en las terminales del gas discharge tube, durante el periodo de tiempo en el que se aplica una curva de corriente transitoria y el momento en que empieza a fluir corriente a través de él.
- **Fixture:** Dispositivo creado para poder colocar los GDT en las pruebas de vida útil.

---

### A.3. Resultados de la interfaz entre conectores

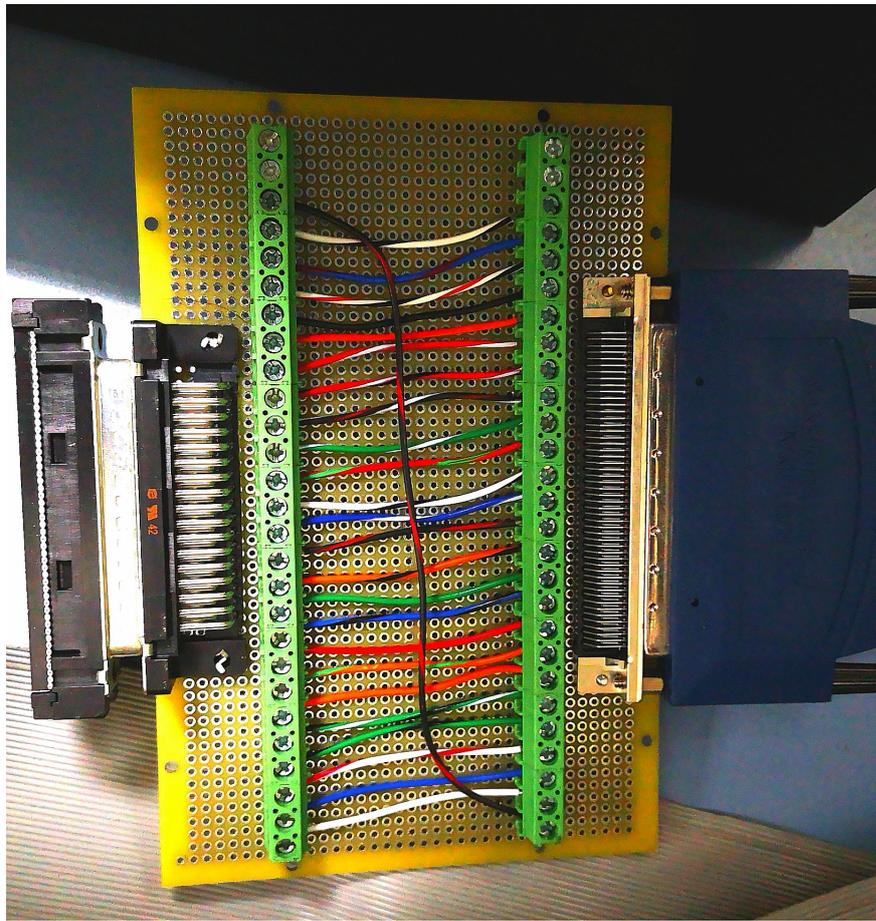


Figura A.1: Interfaz entre los conectores D-sub de 50 pines y el conector tipo D serie 0.050 de 100 pines

## A.4. Excel producto del algoritmo de almacenamiento.

Lifetest 10x1000 10A, GDT: 2038-42-SM-LF										
Lifetest 10x1000 10A, GDT: 2038-42-SM-LF, DCBD: 420V, IR Voltage: 100V, Fecha: 10/12/2018, Hora de Inicio: 11:26 AM										
Ciclo	DUT	Resultados DCBD L1-Ground		Resultados DCBD L2-Ground		Isolation Resistance (IR)		Resultados Impulse Breakdown		
		Maximo Positivo	Maximo Negativo	Maximo Positivo	Maximo Positivo	L1-Ground	L2-Ground	Valor Maximo L1	Valor Maximo L2	Maximo Canal 3
1	1	-431.25	443.75	-393.75	462.5	50936518.84	50936518.84	812.5	756.2	2.563
1	2	-437.5	456.25	-431.25	468.75	51473718.29	51771544.6	831.3	784.4	2.563
1	3	-418.75	456.25	-381.25	437.5	51721658.86	50984900.82	784.4	728.1	2.563
1	4	-400	443.75	-400	450	51771544.6	51871578.42	821.9	756.2	2.563
1	5	-406.25	450	-406.25	456.25	51523126.67	51572603.4	831.3	784.4	2.531
1	6	-400	437.5	-387.5	443.75	52022369.62	52275636.89	803.1	737.5	2.563
1	7	-400	450	-418.75	450	52224802.71	52634404.58	821.9	756.2	2.563
1	8	-400	450	-387.5	437.5	51972026.58	52377657.58	812.5	746.9	2.563
1	9	-412.5	468.75	-418.75	456.25	52275636.89	52174040.08	831.3	784.4	2.563
1	10	-400	431.25	-393.75	437.5	52480049.71	52275636.89	793.8	737.5	2.563
1	11	-393.75	437.5	-387.5	437.5	52123376.03	52480049.71	803.1	746.9	2.563
1	12	-400	443.75	-400	418.75	52582842.95	52224802.71	756.2	700	2.531
1	13	-387.5	425	-381.25	456.25	52123376.03	52634404.58	803.1	756.2	2.563
1	14	-412.5	450	-406.25	462.5	52174040.08	53208215.99	840.6	784.4	2.563
1	15	-418.75	450	-418.75	462.5	52531409.84	52686067.43	700	662.5	2.563
1	16	-375	443.75	-393.75	437.5	52686067.43	52531409.84	803.1	746.9	2.531
2	1	-425	450	-412.5	462.5	53050482.31	52480049.71	812.5	765.6	2.563
2	2	-431.25	456.25	-418.75	468.75	52428789.91	52582842.95	831.3	784.4	2.563
2	3	-412.5	456.25	-387.5	443.75	52945854.39	52531409.84	793.8	737.5	2.563
2	4	-393.75	450	-406.25	450	52123376.03	52174040.08	812.5	756.2	2.563
2	5	-387.5	456.25	-381.25	462.5	52737803.99	52022369.62	831.3	775	2.563
2	6	-393.75	425	-387.5	450	52428789.91	51871578.42	812.5	756.2	2.531
2	7	-400	443.75	-418.75	450	52428789.91	52224802.71	821.9	765.6	2.563
2	8	-400	425	-400	437.5	52582842.95	52686067.43	831.3	746.9	2.563
2	9	-412.5	468.75	-425	462.5	52174040.08	52582842.95	831.3	784.4	2.563
2	10	-400	425	-381.25	450	52428789.91	52377657.58	803.1	737.5	2.563
2	11	-418.75	450	-400	437.5	53102965.59	53208215.99	803.1	756.2	2.563
2	12	-393.75	450	-381.25	425	51622201.88	52326597.5	746.9	690.6	2.563
2	13	-393.75	443.75	-400	462.5	52377657.58	52022369.62	821.9	756.2	2.563
2	14	-425	468.75	-418.75	462.5	52377657.58	52582842.95	850	793.8	2.531
2	15	-412.5	462.5	-418.75	468.75	51871578.42	52789670.12	690.6	643.8	2.531

Figura A.2: Excel generado para la prueba de 750 repeticiones del modelo 2038-42-SM-LF con polaridad positiva. Se muestran los resultados para los 2 primeros ciclos.

Lifetest 10x1000 -10A, GDT: 2038-42-SM-LF										
Lifetest 10x1000 -10A, GDT: 2038-42-SM-LF, DCBD: 420V, IR Voltage: 100V, Fecha: 10/16/2018, Hora de Inicio: 9:31 AM										
Ciclo	DUT	Resultados DCBD L1-Ground		Resultados DCBD L2-Ground		Isolation Resistance (IR)		Resultados Impulse Breakdown		
		Maximo Positivo	Maximo Negativo	Maximo Positivo	Maximo Positivo	L1-Ground	L2-Ground	Valor Maximo L1	Valor Maximo L2	Maximo Canal 3
1	1	437.5	406.25	450	387.5	63217079.23	63709362.98	-765.6	-718.8	-1.219
1	2	431.25	412.5	437.5	412.5	63352286.23	63742460.06	-775	-728.1	-1.25
1	3	437.5	412.5	418.75	393.75	63375653.48	63728282.99	-756.2	-700	-1.25
1	4	431.25	418.75	431.25	381.25	63403700.87	63761399.74	-775	-718.8	-1.25
1	5	431.25	406.25	431.25	387.5	63473968.37	63742460.06	-793.8	-746.9	-1.531
1	6	425	406.25	418.75	387.5	63441189.7	63789789.68	-756.2	-700	-1.25
1	7	418.75	400	437.5	393.75	63417733.88	63723531.63	-765.6	-709.4	-1.219
1	8	418.75	393.75	418.75	387.5	63300914.82	63728282.99	-784.4	-746.9	-1.25
1	9	431.25	406.25	443.75	406.25	63417733.88	63756643.44	-793.8	-737.5	-1.219
1	10	668.75	668.75	668.75	662.5	63179854.72	63539708.19	9.9E+37	-1496.9	-1.219
1	11	400	406.25	431.25	400	63408404.66	63747214.25	-756.2	-709.4	-1.188
1	12	425	393.75	412.5	393.75	63431813.34	63676300.25	-756.2	-700	-1.563
1	13	406.25	400	437.5	381.25	63413068.93	63751928.5	-775	-718.8	-1.219
1	14	443.75	425	431.25	418.75	63342936.12	63747214.25	-784.4	-728.1	-1.25
1	15	437.5	412.5	456.25	406.25	63403700.87	63723531.63	-793.8	-737.5	-1.313
1	16	418.75	406.25	418.75	387.5	63342936.12	63714112.23	-775	-718.8	-1.281
2	1	425	400	443.75	406.25	63375653.48	63742460.06	-765.6	-718.8	-1.25
2	2	431.25	418.75	443.75	412.5	63431813.34	63747214.25	-765.6	-718.8	-1.219
2	3	431.25	406.25	431.25	393.75	63394335.59	63662152.6	-756.2	-709.4	-1.531
2	4	425	400	431.25	406.25	63436481.05	63728282.99	-775	-718.8	-1.188
2	5	425	393.75	431.25	381.25	63389674.08	63789789.68	-765.6	-718.8	-1.25
2	6	418.75	412.5	412.5	387.5	63333588.78	63699907.19	-765.6	-709.4	-1.219
2	7	437.5	393.75	437.5	406.25	63385013.25	63766116.09	-765.6	-728.1	-1.219
2	8	431.25	412.5	418.75	381.25	63300914.82	63681044.57	-793.8	-718.8	-1.313
2	9	450	406.25	443.75	412.5	63394335.59	63732994.44	-793.8	-737.5	-1.219
2	10	668.75	668.75	668.75	662.5	63156631.6	63427106.08	9.9E+37	-1525	-1.188
2	11	425	406.25	412.5	387.5	63375653.48	63728282.99	-765.6	-718.8	-1.219
2	12	425	393.75	412.5	387.5	63394335.59	63747214.25	-728.1	-671.9	-1.156
2	13	412.5	406.25	443.75	381.25	63422439.75	63709362.98	-784.4	-728.1	-1.219
2	14	437.5	437.5	443.75	425	63342936.12	63813480.85	-793.8	-737.5	-1.219
2	15	431.25	412.5	456.25	412.5	63361598.94	63747214.25	-803.1	-793.8	-1.344

Figura A.3: Excel generado para la prueba de 750 repeticiones del modelo 2038-42-SM-LF con polaridad negativa. Se muestran los resultados para los 2 primeros ciclos.

## A.5. Programas en LabView.

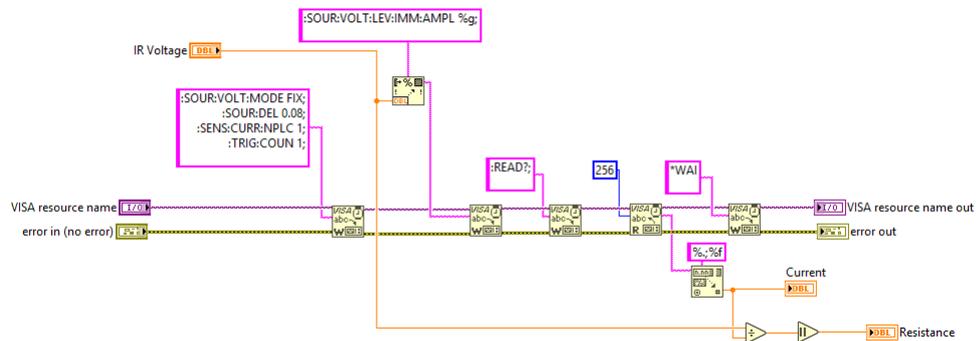


Figura A.4: Algoritmo en LabView para la medición de la resistencia de aislamiento de los GDT.

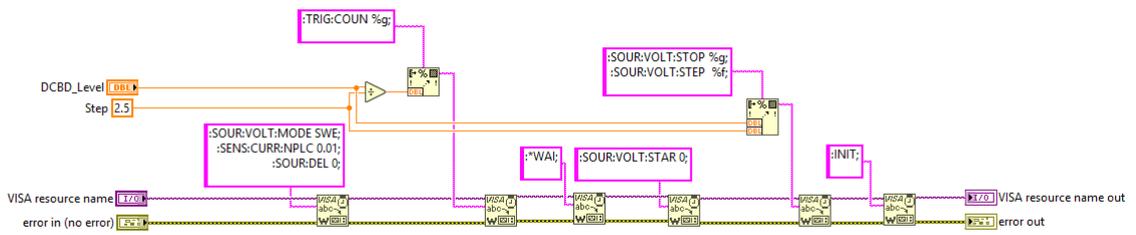


Figura A.5: Programación del escalón de voltaje con el keithley 2410.

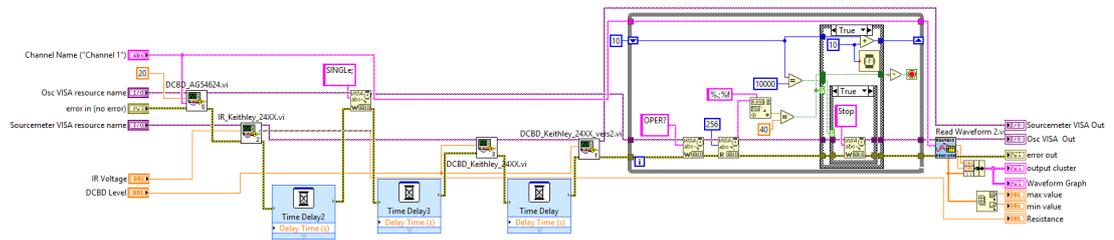


Figura A.6: Programación de la subrutina de la prueba DC breakdown voltage.

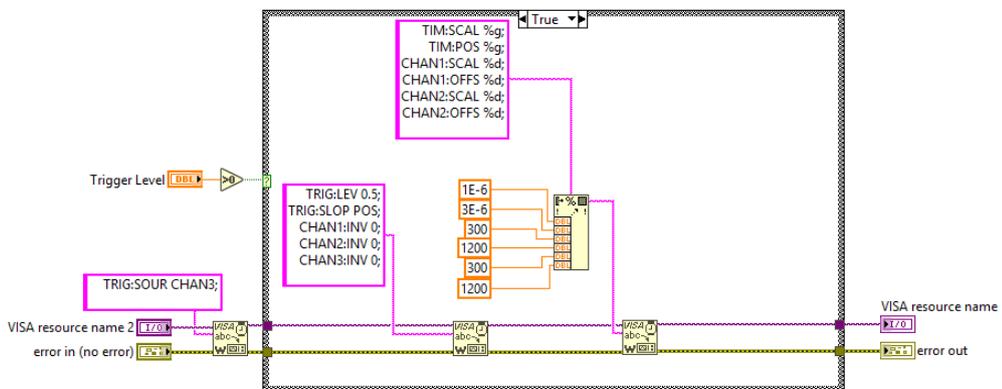


Figura A.7: Configuración del osciloscopio para la prueba de impulso de corriente 10/1000 $\mu$ s.

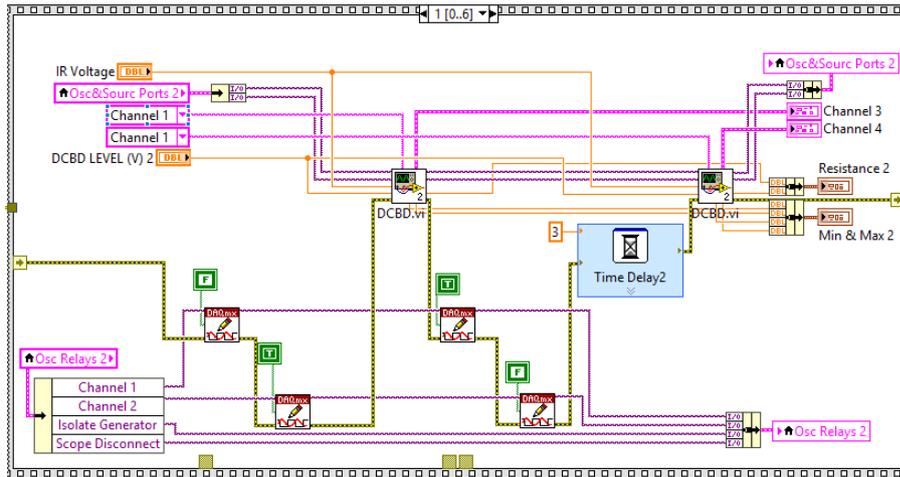


Figura A.8: Estructura del ciclo consumidor implementando la rutina de medición del DCBD y del IR en LabView.

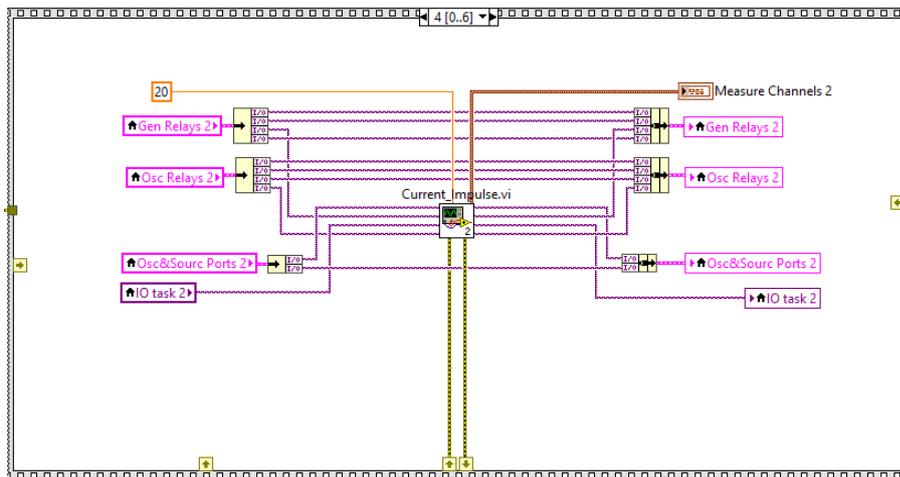


Figura A.9: Estructura del ciclo consumidor implementando las rutinas del impulso 10x1000 en LabView.

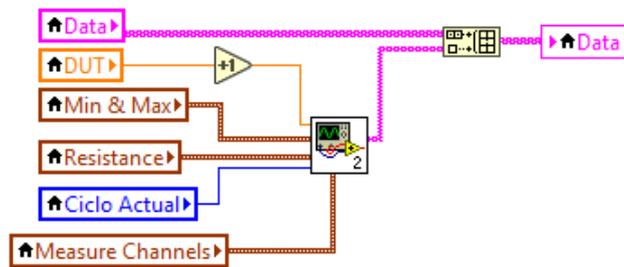


Figura A.10: Lógica de almacenamiento de datos en LabView.

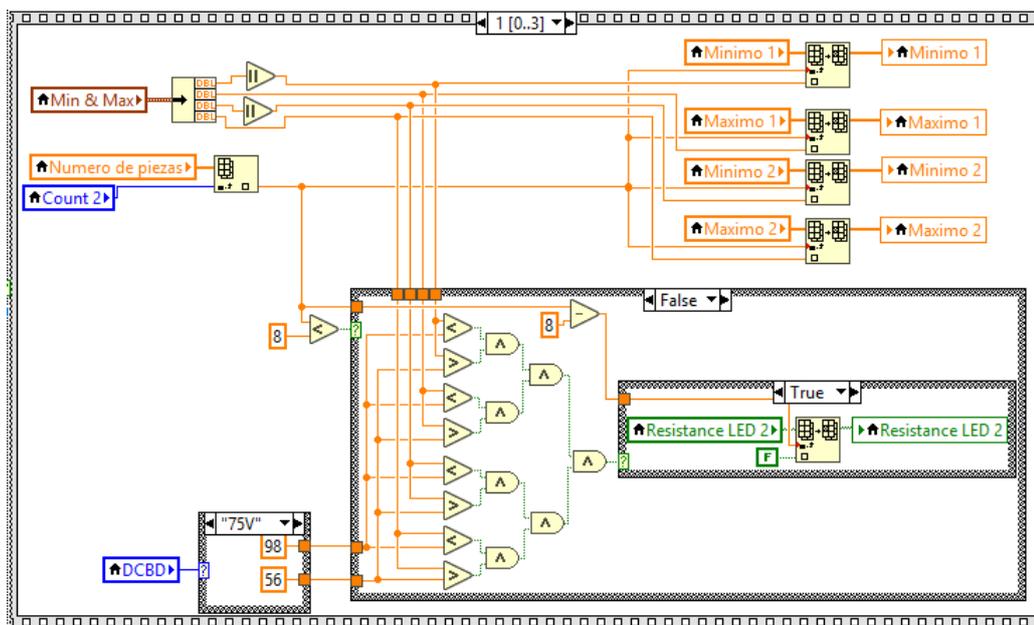


Figura A.11: Lógica para mostrar los resultados actuales de la prueba.

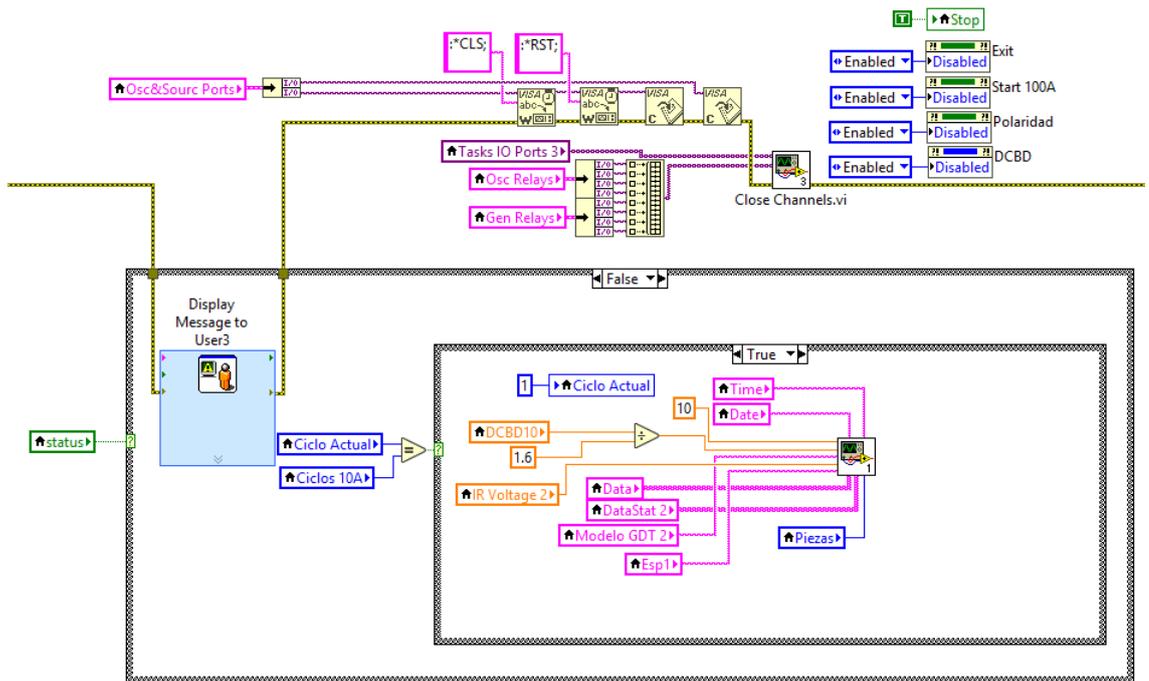


Figura A.12: Lógica de desconexión de los equipos y guardar los datos obtenidos.

# Anexos

# B

## B.1. Estándar ITU-T k.12

## 6.1 Spark-over voltages (see clause 7.1)

Spark-over voltages between the electrodes of a 2-electrode tube or between either line electrode and the earth electrode of a 3-electrode tube shall be within the limits in either Table 1a or 1b.

NOTE 1 – For the definition of spark-over waveforms, see Annex B.

Two types of GDT may be differentiated by their voltage nominal values. By employing special design techniques on either types, the disadvantages of the different technologies, to a certain extent, could be compensated for.

The values for these types are given in Tables 1a and 1b. Type 1 (Table 1a) represents the common type with a technology well suited for high current protection accomplished by a low glow voltage and arc voltage. Type 2 (Table 1b) represents the low impulse spark-over voltage type which has a faster response time, thus achieving lower impulse spark-over voltages with higher glow voltage and arc voltage, but offer lower current carrying capabilities.

For 3-electrode tubes, the spark-over voltage between the line electrodes shall not be less than the minimum d.c. spark-over voltages in either Table 1a or 1b. It is recommended to achieve at least 1.2 times the minimum d.c. spark-over voltage given in either Table 1a or 1b.

NOTE 2 – For 3-electrode GDTs, the maximum d.c. spark-over voltage a-b (line-line) may be restricted; a reasonable value is about 1.8-2.0 times the voltage a/b-c.

### 6.1.1 Spark-over voltage values for type 1 GDT (common type)

This type represents a technology well suited for high current protection accomplished by a low glow-voltage and arc-voltage (Table 1a).

**Table 1a – Spark-over voltage values for common types of GDT**

Spark-over voltage								
d.c.					Impulse			
	Initial (1)		After life tests (2)		at 100 V/μs		at 1000 V/μs	
					Initial (3)	After life tests (4)	Initial (5)	After life tests (6)
Nominal (V)	Min. (V)	Max. (V)	Min. (V)	Max. (V)	(V)	(V)	(V)	(V)
90	72	108	65	120	450	550	500	600
150	120	180	110	195	500	600	600	700
200	160	240	150	250	600	700	700	800
230	184	280	170	300	600	700	700	800
250	200	300	180	325	600	700	700	800
350	280	420	260	455	900	1000	1000	1100
420	360	520	360	550	1000	1100	1100	1200
500	400	600	400	650	1100	1200	1200	1300
600	480	720	450	780	1300	1400	1400	1500

### 6.1.2 Spark-over voltage values for type 2 GDT (low impulse spark-over type)

This type (Table 1b) has a faster response time, thus achieving lower impulse spark-over voltages with higher glow-voltages and arc-voltages. Due to the design of this alternative type, the current capability according to Table 5 is, in general, much lower than for the comparable size of common type GDT.

Higher glow-voltage and arc-voltage in the gas discharge tube means higher power dissipation and thus reduction in class capability.

It should be noted that there might be some restrictions to the availability of certain higher classes of Table 5 for some of the enhanced impulse voltage limits listed in Table 1b.

**Table 1b – Spark-over voltage values for type 2 GDT (low impulse spark-over type)**

Spark-over voltage								
d.c.					Impulse			
	Initial (1)		After life tests (2)		at 100 V/ $\mu$ s		at 1000 V/ $\mu$ s	
					Initial (3)	After life tests (4)	Initial (5)	After life tests (6)
Nominal (V)	Min. (V)	Max. (V)	Min. (V)	Max. (V)	(V)	(V)	(V)	(V)
200	160	240	150	250	350	450	450	550
230	184	280	170	300	400	500	450	550
350	265	455	265	600	700	800	800	900
420	360	520	360	650	750	900	850	1000
500	400	600	400	700	800	950	900	1050
600	480	720	420	800	900	1100	1000	1200

### 6.1.3 Spark-over voltage assessment

The spark-over voltages are characterized by a normal distribution assuming that a sufficient number of samples are tested.

The spark-over voltages should be assessed with the criteria specified in Table 2, using the test methods specified in clause 7.1.

**Table 2 – Spark-over voltage assessment method**

	Measured values initial	
	Probability of the measured values to be within the tolerance	Assessment expression
d.c. spark-over voltage	99.7%	$U + 3S \leq \text{Maximum}$ $U - 3S \geq \text{Minimum}$
Impulse spark-over voltage	99.7%	$U + 3S \leq \text{Maximum}$ $U - 3S \geq \text{Minimum}$
NOTE – U is the statistical average value of spark-over voltages. S is the standard deviation.		

## 6.2 Insulation resistance (see clause 7.2)

Not less than 1 G $\Omega$  initially.

## 6.3 Capacitance

Typically GDTs have a capacitance value of few pF, but not greater than 20 pF.

## 6.4 Transverse voltage

The transverse voltage for a 3-electrode gas discharge tube is the difference in the discharge voltages between terminals a and b of the gaps assigned to the two conductors of the circuit during the passage of discharge current. For a 3-electrode gas discharge tube, the difference in time between the spark-over of the first and second gap shall not exceed 200 ns.

## 6.5 d.c. holdover voltages (see clause 7.5 and Figures 4 and 5)

All types of tube shall have a current turn-off time less than 150 ms when subjected to one or more of the following tests according to the projected use.

### 6.5.1 d.c. holdover test values for 2-electrode tubes

2-electrode tubes are tested in a circuit equivalent to that of Figure 4, where the test circuit components have the values given in Table 3. Gas discharge tubes with a nominal d.c. voltage of 230 V or higher shall be tested according to the test circuit shown in Annex A.

**Table 3 – Holdover test values for 2-electrode tubes**

Component	Test 1	Test 2	Test 3
PS1	52 V	80 V	135 V
R3	200 $\Omega$	330 $\Omega$	1300 $\Omega$
R2	(Note)	150 $\Omega$	150 $\Omega$
C1	(Note)	100 nF	100 nF
NOTE – Components omitted in this test.			

### 6.5.2 d.c. holdover test values for 3-electrode tubes

3-electrode tubes are tested in a circuit equivalent to that of Figure 5, where components have the values given in Table 4.

**Table 4 – Holdover test values for 3-electrode tubes**

Component	Test 1	Test 2		Test 3	
PS1	52 V	80 V		135 V	
PS2	0 V	0 V		52 V	
R3	200 $\Omega$	330 $\Omega$		1300 $\Omega$	
R2	(Note 1)	150 $\Omega$	272 $\Omega$ (Note 2)	150 $\Omega$	272 $\Omega$ (Note 2)
C1	(Note 1)	100 nF	43 nF (Note 2)	100 nF	43 nF (Note 2)
R4 (Note 3)	136 $\Omega$	136 $\Omega$		136 $\Omega$	
C2 (Note 3)	83 nF	83 nF		83 nF	
NOTE 1 – Components omitted in this test.					
NOTE 2 – Optional alternative.					
NOTE 3 – Optional.					

## 6.6 Life tests (see clause 7.6)

The currents specified in clause 6.6.1 for the appropriate nominal current rating of the tube shall be applied. After each current application, the gas discharge tube shall be capable of meeting the requirements of clause 6.6.2. On completion of the number of current applications specified, the tube shall be capable of meeting the requirements of clause 6.6.3.

### 6.6.1 Test currents

Gas discharge tubes shall be subjected to the currents of columns 1 to 5 of Table 5. For each life test new gas discharge tubes shall be used.

**Table 5 – Life test current values**

Test number	Nominal alternating discharge current	Nominal impulse discharge current			
	1	2	3	4	5
Waveform	a.c. 50-60 Hz	8/20 $\mu$ s	10/350 $\mu$ s <sup>a)</sup>	10/1000 $\mu$ s	10/1000 $\mu$ s
Applications	10	10	1	300	1500
Dimension	A rms	kA peak	kA peak	A peak	A peak
Class					
1	2.5	2.5	0.5	50	10
2	5	5	1	100	10
3	10	10	2.5	100	10
4	20	10	4	100	10
5	20	20	4	200	10
<sup>a)</sup> Different high-energy test waveforms exist in some countries and regions, for example, see [IEC 61643-21].					

### 6.6.2 Requirements during life test

Insulation resistance: not less than 100 M $\Omega$ .

d.c. and impulse spark-over voltage: not more than the relevant value in columns 2, 4 and 6 of either Table 1a or 1b.

### 6.6.3 Requirements after completion of life test

Insulation resistance: not less than 100 M $\Omega$ .

d.c. and impulse spark-over voltage: not more than the relevant value in columns 2, 4 and 6 of either Table 1a or 1b.

NOTE – After passage of an alternating or impulse current of value much higher than that shown in Table 5, the electrical characteristics of the GDT may be severely altered or the GDT may be even destroyed.

Two extreme situations may occur:

- 1) The gas discharge tube vents and acts like an insulator and presents a higher dielectric strength than it had initially.
- 2) The gas discharge tube turns to a low resistance or even becomes a short-circuit which does not allow normal operation of the telecommunication service. (This situation may be preferable from the point of view of fault detection, fault signalling, protection and maintenance.)

Test methods and the relations between the value and duration of the destructive current are not detailed in this Recommendation, nor is the state of the element after destruction. Operators should cover their requirements in these respects in their own documentation.

Holdover voltage: as in clause 6.5.

## 6.7 Short-circuit behaviour

A short-circuit mechanism is necessary for gas discharge tubes intended for use in telecommunication applications where an a.c. current can occur, flowing for an unpredictable time.

Depending on the a.c. current flow, the short-circuit mechanism shall operate in sufficient time to prevent the gas discharge tube from being overheated.

## 7 Test methods

Gas discharge tubes shall be tested according to the methods described in clauses 7.1 to 7.7 and, in given cases, according to Figure A.1 (Test circuit for GDT for ISDN or other telecommunications equipment using higher voltages or bitrates (xDSL)).

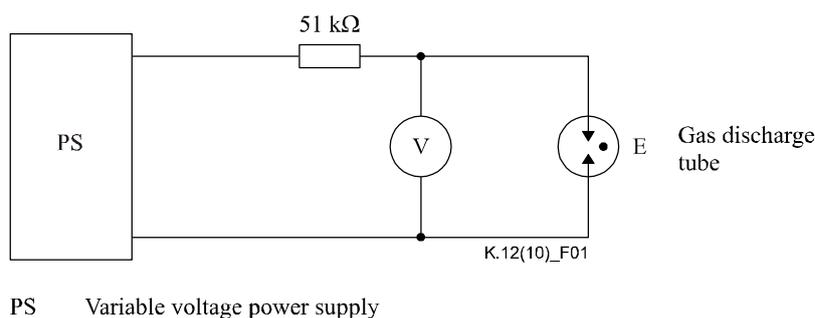
### 7.1 Spark-over voltage

For testing the initial values of a gas discharge tube, the gas discharge tube shall be placed in darkness for at least 24 hours immediately prior to testing and shall be tested in darkness.

#### 7.1.1 d.c. spark-over voltage

The gas discharge tube shall be tested with a voltage which increases so slowly that the spark-over voltage is independent of the rate of rise of the applied voltage. Typically, a rate of rise of 100 V/s is used, but higher rates may be used if it can be shown that the spark-over voltage is not significantly changed thereby. The tolerances on the wave-shape of the rising test voltage are indicated in Annex B. The voltage is measured across the open-circuited terminals of the generator.  $U_{max}$  of Figure B.1 is any voltage greater than the maximum permitted d.c. spark-over voltage of the gas discharge tube.

The test shall employ a suitable circuit such as that shown in Figure 1. A minimum of 3 seconds shall elapse between repetitions of the test, with either polarity, on the same gas discharge tube.



NOTE – Means shall be included to ensure that the gas discharge tube sparks over once only.

**Figure 1 – Circuit for d.c. spark-over test**

For 3-electrode tubes, the spark-over voltage between the line electrodes shall not be less than the minimum d.c. spark-over voltage in either Table 1a or 1b.

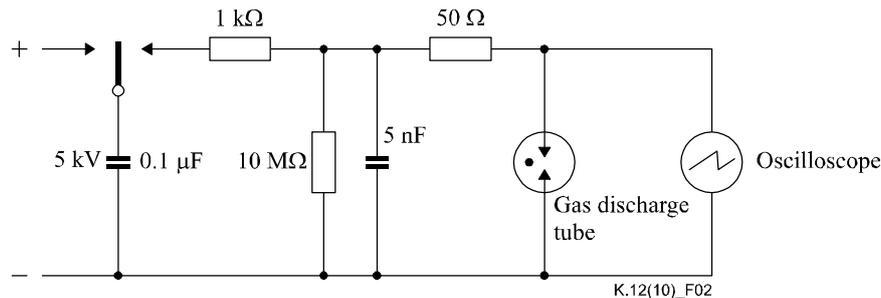
Each pair of terminals of a 3-electrode gas discharge tube shall be tested separately with the other terminal unterminated.

### 7.1.2 Impulse spark-over voltage

The voltage waveform measured across the open circuit test terminals shall have a nominal rate of rise selected from Table 1a or 1b and shall be within the enclosed limits indicated in Figure B.1. Figure 2 shows a suggested arrangement for testing with a voltage impulse having a nominal rate of rise of 1.0 kV/ $\mu$ s.

A minimum of 3 seconds shall elapse between repetitions of the test, with either polarity, on the same gas discharge tube.

Each pair of terminals of a 3-electrode gas discharge tube shall be tested separately with the other terminal unterminated.



**Figure 2 – Testing arrangement producing a voltage impulse having a wavefront with a virtual steepness of 1 kV/ $\mu$ s (see clauses 6.1 and 7.3)**

### 7.2 Insulation resistance

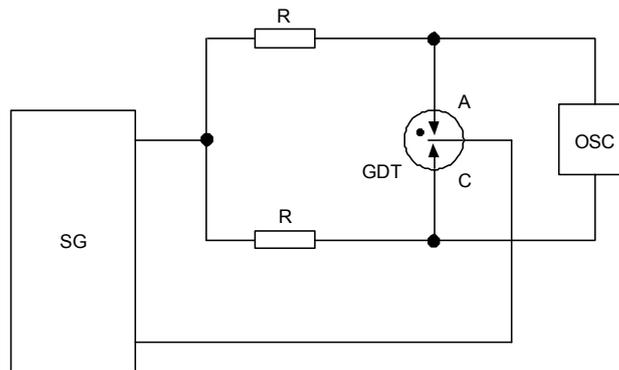
The insulation resistance shall be measured from each terminal to every other terminal of the gas discharge tube (see clause 6.2). The measurement shall be made at an applied potential of at least 100 V or not more than 90% of the minimum permitted d.c. spark-over voltage. The measuring source shall be limited to a short circuit current of less than 10 mA. Terminals of 3-electrode gas discharge tubes not involved in the measurement shall be left unterminated.

### 7.3 Capacitance

The capacitance shall be measured between each terminal and every other terminal of the gas discharge tube (see clause 6.3). In measurements involving 3-electrode gas discharge tubes, the terminal not being tested shall be connected to a ground plane in the measuring instrument.

### 7.4 Impulse transverse voltage for 3-electrode gas discharge tubes

The duration of the transverse voltage shall be measured while an impulse voltage having a virtual steepness of impulse wavefront of 1 kV/ $\mu$ s is applied simultaneously to both discharge gaps. Measurement may be made with an arrangement as indicated in Figure 3 (also see clause 6.4). The difference in time between the spark-over of the first gap and that of the second is specified in clause 6.4.



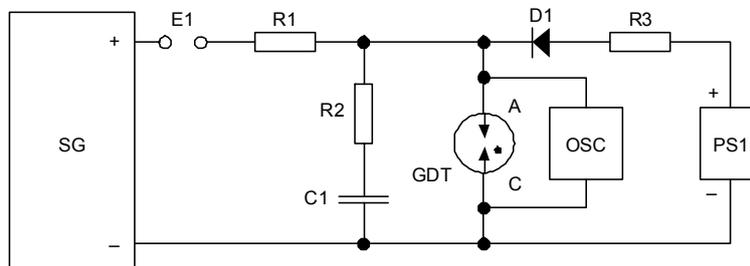
OSC    Oscilloscope  
 R      Line impedance  
 SG     Surge generator (see Figure 2)

**Figure 3 – Circuit for impulse transverse voltage test (see clause 6.4)**

## 7.5 Holdover test

### 7.5.1 2-electrode gas discharge tube

Tests shall be conducted using the circuit of Figure 4 (see also clause 6.5). Values of PS1, R2, R3 and C1 shall be selected for each test condition from Table 3. The current from the surge generator shall have an impulse waveform of 100 A, 10/1000  $\mu$ s measured through a short circuit replacing the gas discharge tube under test. The polarity of the impulse current through the gas discharge tube shall be the same as the current from PS1. The time for current turn-off shall be measured for each direction of current passage through the gas discharge tube. Three impulses shall be applied at not greater than 1-minute intervals and the current turn-off time measured for each impulse.

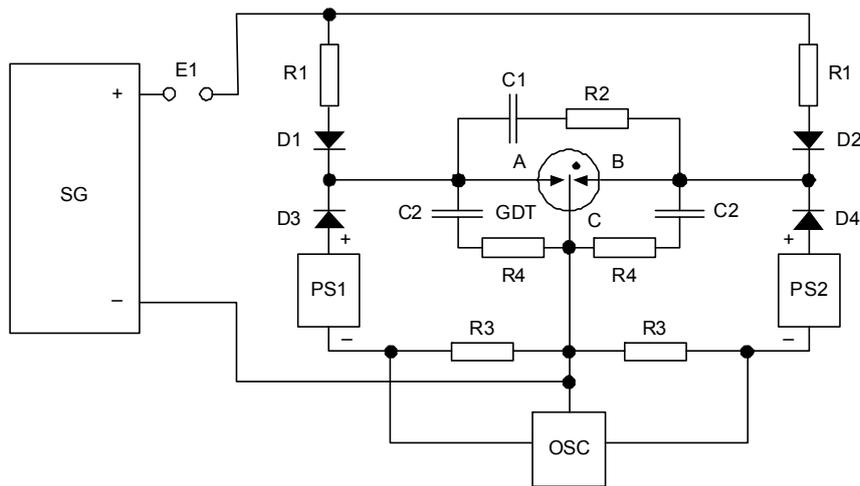


D1      Isolation diode or other isolation device  
 E1      Isolation gap or equivalent device  
 OSC     Oscilloscope  
 PS1     Constant voltage d.c. supply or battery  
 R1      Impulse current-limiting resistor or waveshaping network  
 R2, R3   See Table 3  
 SG      Surge generator, 100 A, 10/1 000  $\mu$ s

**Figure 4 – Circuit for holdover test of 2-electrode gas discharge tube (see clause 6.5.1)**

### 7.5.2 3-electrode gas discharge tube

Tests shall be conducted using the circuit of Figure 5. Values of circuit components shall be selected from Table 4. The simultaneous currents that are applied to the gaps of the gas discharge tube shall have impulse waveforms of 100 A /10/1000  $\mu$ s per side or chamber, measured through a short circuit replacing the gas discharge tube under test. The polarity of the impulse current through the gas discharge tube shall be the same as the current from PS1 and PS2.



- C1, C2                See Table 4
- E1                    Isolation gap or equivalent device
- OSC                  Dual channel oscilloscope
- PS1, PS2           Batteries or d.c. power supplies
- R1                    Impulse current-limiting resistors or wave-shaping networks
- R2, R3, R4         See Table 4

NOTE 1 – The polarity of diodes D1 to D4 must be reversed when the polarity of the d.c. power supplies and surge generators is reversed.

**Figure 5 – Circuit for holdover test of 3-electrode gas discharge tube (see clause 6.5.2)**

For each test condition, measurement of the time to current turn-off shall be made for both polarities of the impulse current. Three impulses in each direction shall be applied at intervals not greater than 1 minute and the time to current turn-off measured for each impulse.

### 7.6 Life tests

New gas discharge tubes shall be used for each of the tests.

A proposed type test procedure is given in Table 6.

**Table 6 – Recommended sample sizes to be used for a.c. and impulse life tests**

Test	Sample size	Test performed in accordance with clause 6.6.1, Table 5, column
a.c. life	20	1
Impulse life	20	2
Impulse life	20	3
Impulse life	20	4
Impulse life	20	5

Alternating respectively impulse currents shall be applied as specified in Table 5 for the relevant class of the tube.

The time between applications should be such as to prevent thermal accumulation in the tube.

DC and impulse spark-over tests shall be performed on gas discharge tubes which are subject to life conditions specified in clause 6.6.1. In order to achieve a test procedure as close to real practice as possible, the test has to be carried out under daylight conditions. All other test details should comply according to clause 7.1.

It is recommended that a minimum of four spark-over voltage measurements are performed on each sample, two in each polarity.

Measured values after life test under consideration (5% failure rate accepted), compare either Table 1a or 1b values after life.

#### **7.6.1 a.c. life** (see clause 6.6)

The alternating currents shall be applied as specified in Table 5, column 1, for a duration of 1 second.

The r.m.s. a.c. voltage of the current source shall exceed the maximum d.c. spark-over voltage of the gas discharge tube by not less than 50%.

The specified a.c. discharge current and duration shall be measured with the gas discharge tube replaced with a short circuit. For 3-electrode gas discharge tubes, a.c. discharge currents each having the value specified in Table 5, column 1, shall be discharged simultaneously from each electrode to the common electrode.

The gas discharge tube shall be tested after each passage of a.c. discharge current to determine its ability to satisfy the requirements of clause 6.6.2.

On completion of the specified number of current applications, the tube shall be allowed to cool to ambient temperature and tested for compliance with clause 6.6.3.

#### **7.6.2 Impulse discharge current 8/20 $\mu$ s**

Half the specified number of tests shall be carried out with one polarity followed by half with the opposite polarity. Alternatively, half the tubes in a sample may be tested with one polarity and the other half with the opposite polarity.

For 3-electrode gas discharge tubes, independent impulse currents each having the value specified in Table 5, column 2, shall be discharged simultaneously from each electrode to the common electrode.

#### **7.6.3 Impulse discharge current 10/350 $\mu$ s**

This test shall be applied only one time.

For 3-electrode gas discharge tubes, independent impulse currents each having the value specified in Table 5, column 3, shall be discharged simultaneously from each electrode to the common electrode.

#### **7.6.4 Impulse discharge current 10/1000 $\mu$ s**

To carry out this test, one of the methods listed in Table 7, shall be applied. Methods 1 and 2 must be used together for testing 3-electrode gas discharge tubes by testing 50% of the sample lot with method 1 and the remaining 50% with method 2.

Although these four methods apply the same number of discharges, their end results may not be the same.

**Table 7 – Impulse discharge current test method**

<b>Method</b>	<b>Number of applications 10/1000 <math>\mu</math>s (50..200 A) (see column 4 of Table 5)</b>	<b>Number of applications 10/1000 <math>\mu</math>s (10 A); (see column 5 of Table 5)</b>	<b>Polarity</b>
1	300 times	1500 times	+++++
2	300 times	1500 times	-----
3	150 times + and 150 times –	750 times + and 750 times –	+++++.../-----...
4	300 times +/-	1500 times +/-	+/-/+/-/+/-/...
NOTE – The test results can vary depending on the test methods 1-4. It should be stated which test method was used or tested as agreed upon by the user and manufacturer.			

The voltage of the source shall exceed the maximum impulse spark-over voltage of the gas discharge tube by not less than 50%. The specified impulse discharge current and waveform shall be measured with the gas discharge tube replaced with a short circuit. For 3-electrode gas discharge tubes, independent impulse currents each having the value specified in Table 5, columns 4 and 5, shall be discharged simultaneously from each electrode to the common electrode.

The gas discharge tube shall be tested after each passage of impulse discharge current or at less frequent intervals if agreed between the manufacturer and the user to determine its ability to satisfy the requirements of clause 6.6.2.

On completion of the specified number of impulse currents, the tube shall be allowed to cool to ambient temperature and tested for compliance with clause 6.6.3.

**7.7 Short-circuit test**

New tubes shall be used and an a.c. current capable of activating the thermal overload shall be applied to the gas discharge tube. The short-circuit mechanism shall be operated after it is subjected to a given a.c. current and time. The proposed sample size to be used for short circuit tests is 5 for each test condition.

The values and duration should be specified by the manufacturer of the gas discharge tubes.

The behaviour of the short-circuit mechanism is particularly influenced by the environmental conditions and the termination module. Therefore, it is necessary that the test procedure and the requirements be in detail arranged between the manufacturer and the user of gas discharge tubes.

**8 Environment tests**

**8.1 Radiation**

Gas discharge tubes shall not contain radioactive material.

**8.2 Robustness of terminations**

The user shall specify a suitable test from [IEC 60068-2-21], if applicable.

**8.3 Solderability**

Soldering terminations shall meet the requirements of [IEC 60068-2-20], test Ta method 1.

**8.4 Resistance to soldering heat**

Gas discharge tubes with soldering terminations shall be capable of withstanding [IEC 60068-2-20], test Tb method 1b. After recovery, the gas discharge tube shall be visually checked and show no signs of damage, and its d.c. spark-over shall be within the limits for that tube.

# Referencias

- Agilent. (2002). Agilent Technologies 54600-Series Oscilloscopes Data Sheet. [Manual de software informático].
- Amores, E. (2010). *Control de instrumentos mediante el bus GPIB programado con matlab*. (Inf. Téc.). Universidad Autónoma de Barcelona. Descargado de [https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2010/hdl\\_2072\\_97366/PFC\\_EduardoAmoresRubio.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2010/hdl_2072_97366/PFC_EduardoAmoresRubio.pdf)
- Boix, V. B. (2014). *PROYECTO DE AUTOMATIZACIÓN DE UNA PLANTA PROTOTIPO DE FRESADO, TALADRADO Y CLASIFICADO*. (Inf. Téc.). Universidad politécnica de Valencia. Descargado de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/52780/Memoria.pdf?sequence=4>
- Borrero, M. E. (2011). *Herramienta software para el control remoto de una fuente de alimentación mediante una interfaz gráfica* (Inf. Téc.). Universidad de Sevilla. Descargado de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11986/fichero/Archivo+%C3%ADndice%252F%C3%8DNDICE.pdf>
- Bourns. (2015). Bourns FLAT Technology. Gas Discharge Tube surge arrestors. [Manual de software informático]. Descargado de [https://www.bourns.com/docs/products-general/Bourns\\_FLAT\\_Surge\\_Arrestor\\_White\\_Paper.pdf](https://www.bourns.com/docs/products-general/Bourns_FLAT_Surge_Arrestor_White_Paper.pdf)
- Bourns. (2018). Bourns Gas Discharge Tubes short form brochure [Manual de software informático]. Descargado de [https://www.bourns.com/docs/Products-General/bourns\\_gdt\\_short\\_form.pdf](https://www.bourns.com/docs/Products-General/bourns_gdt_short_form.pdf)
- García, J. A. S. (2013). *Desarrollo de un sistema de adquisición de datos inteligente conforme a la norma IEEE Std. 1451.4*. (Inf. Téc.). Universidad politécnica de cataluña. Descargado de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/19522/Mem%C3%B2ria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Hobaica, J. M. (2011). *Introducción a LabView, uso de estructuras y funciones básicas*. (Inf. Téc.). Openstax. Descargado de <https://docplayer.es/53142109-Introduccion-a-labview-uso-de-estructuras-y-funciones-basicas.html>
- Johnson, V. A. (2010). *Diseño e implementación de estrategias de control avanzado sobre plataforma labview para un sistema de calentamiento inductivo de fluidos*. (Inf. Téc.). Universidad de Chile. Descargado de [http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103712/cf-johnson\\_vv.pdf?sequence=3&isAllowed=y](http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103712/cf-johnson_vv.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Kaber, D. B., y Endsley, M. R. (2003). The effects of level automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Taylor & Francis Group*. Descargado de [https://people.engr.ncsu.edu/dbkaber/papers/Kaber\\_Endsley\\_TIES\\_04.pdf](https://people.engr.ncsu.edu/dbkaber/papers/Kaber_Endsley_TIES_04.pdf)

- Keithley. (2011a). Series 2400 Sourcemeter SMU Instruments Datasheet [Manual de software informático].
- Keithley. (2011b). Series 2400 SourceMeter User's Manual [Manual de software informático].
- NI. (2010). NI 6509 User Guide and Specifications. [Manual de software informático]. Descargado de <http://www.ni.com/pdf/manuals/372117c.pdf>
- Vallés, J. A. (1998). *Descargas eléctricas en gases y plasmas: aplicaciones* (Inf. Téc.). Universidad de Alicante. Descargado de [http://www.cervantesvirtual.com/obra-visor/descargas-electricas-en-gases-y-plasmas-aplicaciones-0/html/ff2555fc-82b1-11df-acc7-002185ce6064\\_2.html](http://www.cervantesvirtual.com/obra-visor/descargas-electricas-en-gases-y-plasmas-aplicaciones-0/html/ff2555fc-82b1-11df-acc7-002185ce6064_2.html)
- Vishay. (2010). Transient Voltage Suppressors (TVS) for Automotive Electronic Protection. [Manual de software informático]. Descargado de <https://www.vishay.com/docs/88490/tvs.pdf>