

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA



“DESARROLLO DE UN PROGRAMA PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS DE LA FUENTE Y UNIDAD DE MEDICIÓN KEITHLEY 237 E INVESTIGACIÓN DE NUEVOS MATERIALES ELECTRÓNICOS”

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA

PRESENTA

ANDREA ISMENEÉ HERRERA HUERTA

DIRECTORES DE TESIS

DR. OLEXANDR GLOT

DR. OLEXANDR BONDARCHUK

Huajuapán de León, Oaxaca; a 4 de Diciembre de 2009

Tesis presentada el 4 de Diciembre de 2009
ante los siguientes sinodales:
c. Dr. Heriberto Ildelfonso Hernández Martínez
Ing. Hugo Suárez Onofre
M.C. Arturo Pablo Sandoval García

Directores de tesis:
DR. Olexandr Glot
DR. Olexandr Bondarchuk

**Dedicado a mis padres: Gerardo y Magdalena
y hermanos: Juan Gerardo, Felix y Jorge**

-Andrea Ismeneé-

ÍNDICE

LISTA DE TABLAS.....	6
LISTA DE FIGURAS.....	8
SÍMBOLOS ABREVIATURAS.....	11
RESUMEN ABSTRACT.....	12
Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	13
1.1. Antecedentes.....	13
1.2. Planteamiento del problema.....	14
1.3. Objetivo	14
1.4. Justificación.....	15
1.5. Metodología de desarrollo.....	15
1.6. Estructura de la tesis.....	17
Capítulo 2 MARCO TEÓRICO.....	18
2.1. Características y parámetros de la fuente y unidad de medición Keithley 237.	18
2.1.1. Características generales.....	18
2.1.2. Keithley 237 como fuente de corriente y medidor de voltaje.....	21
2.1.3. Keithley 237 como fuente de voltaje y medidor de corriente.....	23
2.2. Tarjeta KPCI-488.....	25
2.2.1. Interfaz GPIB (IEEE 488/IEC 625).....	26
2.2.2. La fuente y unidad de medición Keithley 237 y el estándar IEEE 488..	30
2.3. Lenguajes de programación.....	30
2.3.1. Lenguajes de desarrollo para instrumentación electrónica.....	32
2.3.2. Características generales de C++.....	33
2.3.3. Características generales de OpenGL.....	33
2.4. Varistores.....	34
2.4.1. Característica de corriente voltaje.....	36
2.4.2. Parámetros básicos.....	37
2.4.3. Aplicaciones.....	39
Capítulo 3 DISEÑO DEL PROGRAMA.....	40
3.1. Requisitos del programa.....	41
3.2. Identificación de la solución.....	42
3.3. Modelo prescriptivo de proceso.....	42

3.4. Diseño del programa.....	43
3.4.1. Diseño modular del programa.....	43
3.4.2. Diseño de los módulos para la construcción y envío de comandos para Keithley 237.....	45
3.5. Generalidades de los modos de medición.....	49
3.5.1. Fuente de voltaje.....	49
3.5.2. Fuente de corriente.....	51
Capítulo 4 PRUEBAS.....	52
4.1 Pruebas aplicadas al hardware.....	52
4.2 Pruebas aplicadas al programa.....	53
4.2.1. Pruebas de caja blanca.....	53
4.2.2. Pruebas de caja negra.....	53
4.2.2.1. Resistores.....	54
4.2.2.2. Diodos.....	57
4.2.2.3. Varistores.....	62
Capítulo 5 CARACTERÍSTICAS CORRIENTE VOLTAJE DE VARISTORES EN BASE DE DIOXIDO DE ESTAÑO.....	73
Capítulo 6 CONCLUSIONES Y LINEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS....	80
BIBLIOGRAFÍA BIBLIOGRAFÍA.....	82
APÉNDICES APÉNDICES	
A: Especificaciones básicas de la norma IEEE 488.....	84
B: Manual de usuario.....	85
C: Empleo de la herramienta TRTest.....	88
D: Pruebas estructurales.....	89
E: Hojas de datos.....	92
F: Estimación del coeficiente de no linealidad (β).....	96
G: Mediciones realizadas a varistores.....	97

LISTA DE TABLAS|LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 2.1: Capacidades de la UFM Keithley 237 como fuente de corriente.....	22
Tabla 2.2: Capacidades de la UFM Keithley 237 como medidor de voltaje.....	22
Tabla 2.3: Capacidades de la UFM Keithley 237 como fuente de voltaje	24
Tabla 2.4: Capacidades de la UFM Keithley 237 como medidor de corriente	24
Tabla 2.5: Especificaciones de la Tarjeta KPCI- 488LP	26
Tabla 2.6: Especificaciones Eléctricas (TTL)	27
Tabla 2.7: Comandos básicos de comunicación para dispositivos	28
Tabla 2.8: Estados operacionales de dispositivos.....	29
Tabla 2.9: Protocolos de control del estándar IEEE 488.2.....	29
Tabla 2.10: Comandos de lenguajes de alto nivel para programar un sistema IEEE 488.....	29
Tabla 2.11: Comandos básicos de lenguajes de alto nivel para la UFM Keithley 237	29
Tabla 2.12: Comandos especializados para la UFM 237	31
Tabla 2.13: Librerías de OpenGL.....	34
Tabla 3.1: Requisitos funcionales y no funcionales del programa.....	41
Tabla 3.2: Comandos básicos de lenguajes de alto nivel usadas para programar la UFM Keithley 237	45
Tabla 3.3: Parámetros usados para configurar la UFM Keithley 237 como fuente de voltaje.....	47
Tabla 3.4: Parámetros usados para configurar la UFM Keithley 237 como señal tipo escalón.....	47
Tabla 3.5: Parámetros usados para configurar la UFM Keithley 237 como señal tipo impulso.....	49
Tabla 4.1: Lista de componentes eléctricos caracterizados en la etapa de pruebas.....	53
Tabla 4.2: Configuración de la UFM Keithley 237 para la caracterización del resistor de 5.6	54
Tabla 4.3: Configuración de la UFM Keithley 237 para la caracterización del resistor de $1.0 \cdot 10^3$	55
Tabla 4.4: Configuración de la UFM Keithley 237 para la caracterización del resistor de $68.0 \cdot 10^3$	56
Tabla 4.5: Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición el diodo 1N4002. Voltaje directo.....	57
Tabla 4.6: Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición el diodo 1N4002. Voltaje reverso.....	57
Tabla 4.7: Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del diodo Zener 1N4728A. Voltaje directo	59
Tabla 4.8: Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del diodo Zener 1N4728A. Voltaje reverso.....	60
Tabla 4.9: Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del diodo Zener 1N4728A. Voltaje reverso.....	61

Tabla 4.10: Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor S14K14.....	62
Tabla 4.11: Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor S14K14. Voltaje positivo	63
Tabla 4.12: Valores obtenidos al caracterizar el varistor S14K14 aplicando una señal impulso	65
Tabla 4.13: Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor S14K14. Señal escalón	65
Tabla 4.14: Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor S20K14.....	66
Tabla 4.15: Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor S20K14. Voltaje negativo	67
Tabla 4.16: Valores obtenidos al caracterizar el varistor S20K14 al aplicar voltaje positivo y negativo ($1 \cdot 10^{-3}A$)	69
Tabla 4.17: Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor Positrón. Voltaje positivo.....	69
Tabla 4.18: Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor Positrón. Voltaje negativo	70
Tabla 5.1: Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor F3P2-1350. Voltaje positivo.....	72
Tabla 5.2: Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor F3P2-1350. Impulso 100 ms / 100ms.....	75
Tabla 5.3: Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor F3P2-1350. Escalón 12 ms	75
Tabla 5.4: Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor F3P2-1350. Escalón 100 ms	75
Tabla 5.5: Parámetros obtenidos de la muestra F3P2-1350 al configurar la a Keithley 237 como se muestra en las tablas 5.2, 5.3, 5.4.....	76
Tabla 5.6: Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor SG-17A.....	76
Tabla A.1: Especificaciones Básicas de la norma IEEE 488	84
Tabla D.1: Casos de prueba.....	91
Tabla D.2: Tabla de cobertura de decisión.....	91

LISTA DE FIGURAS|LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1: Metodología de desarrollo para realizar la tesis	16
Figura 2.1: Fuente y unidad de medición Keithley 237	18
Figura 2.2: Capacidad de la UFM Keithley 237.....	19
Figura 2.3: Ciclo de medida-retardo	20
Figura 2.4: Formas de señal que genera Keithley 237 para realizar barridos	20
Figura 2.5: Configuración del sistema de medición.....	21
Figura 2.6: Configuración interna de Keithley 237 cuando funciona como fuente de corriente y medidor de voltaje	21
Figura 2.7: Ilustración de la protección contra sobrevoltaje, para una medición en el rango de 0 a 16mA y con un límite de protección de 12V.....	23
Figura 2.8: Configuración interna de la UFM Keithley 237 cuando funciona como fuente de voltaje y medidor de corriente.....	24
Figura 2.9: Ilustración de la protección contra sobrecorriente, para una medición en el rango de 0 a 10V y con un límite de protección de 25mA	25
Figura 2.10: Tarjeta KPCI-488.....	26
Figura 2.11: Conector de la interfaz GPIB.....	27
Figura 2.12: Ejemplo de una característica I(U) de un varistor	34
Figura 2.13: Diagrama de la microestructura de un varistor de óxido metálico ..	35
Figura 2.14: Diagrama energético para un borde de grano	35
Figura 2.15: Regiones de la característica j(E) de un varistor.....	36
Figura 2.16: Circuito equivalente de un varistor	37
Figura 2.17: Forma típica de una onda impulsiva	38
Figura 2.18: Campos de aplicación de los varistores	39
Figura 3.1: Diagrama a bloques de la comunicación	40
Figura 3.2: Modelo de cascada.....	42
Figura 3.3: Diagrama de flujo del programa	44
Figura 3.4: Secuencia de comandos para inicializar el sistema y configurar la UFM Keithley 237 como fuente de voltaje	46
Figura 3.5: Secuencia de comandos para configurar la UFM Keithley 237 como una señal tipo escalón	47
Figura 3.6: Secuencia de comandos para configurar la UFM Keithley 237 como una señal tipo impulso	48
Figura 3.7: Forma de la señal tipo escalón.....	50
Figura 3.8: Forma de la señal tipo impulso.....	50
Figura 3.9: Característica corriente voltaje de una muestra medida en modo “fuente de voltaje y medidor de corriente”	50
Figura 3.10: Característica corriente voltaje de una muestra (con resistencia diferencial negativa) medida como “fuente de corriente y medidor de voltaje” ..	51
Figura 4.1: Ciclo de pruebas.....	52
Figura 4.2: Característica corriente voltaje del resistor de 5.6	54
Figura 4.3: Característica corriente voltaje del resistor de $1.0 \cdot 10^3$	55

Figura 4.4: Característica corriente voltaje del resistor de $6.80 \cdot 10^4$	56
Figura 4.5: Característica corriente voltaje del diodo 1N4002. Modo de medición: fuente de voltaje y medidor de corriente. Voltaje directo.....	58
Figura 4.6: Característica corriente voltaje del diodo 1N4002. Modo de medición: fuente de voltaje y medidor de corriente. Voltaje reverso.....	58
Figura 4.7: Característica corriente voltaje del diodo 1N4728A. Modo de medición: fuente de voltaje y medidor de corriente. Voltaje directo.....	59
Figura 4.8: Característica corriente voltaje del diodo 1N4728A. Modo de medición: fuente de voltaje y medidor de corriente. Voltaje reverso.....	60
Figura 4.9: Característica corriente voltaje del diodo 1N4728A. Modo de medición: fuente de corriente y medidor de voltaje. Voltaje reverso.....	61
Figura 4.10: Característica corriente voltaje del varistor S14K14. Datos obtenidos con incremento de voltaje (1) y con decremento de voltaje (2). Señal aplicada impulso 100 ms/100 ms. Voltaje positivo.....	63
Figura 4.11: Característica corriente voltaje del varistor S14K14. Datos obtenidos con incremento de voltaje (1) y con decremento de voltaje (2). Señal aplicada impulso 100 ms/1000 ms	64
Figura 4.12: Comparación de la característica corriente voltaje del varistor S14K14. Datos obtenidos con un impulso de incremento de voltaje 100 ms/100 ms (1) y datos obtenidos con un impulso de incremento de voltaje 100 ms/1000 ms (2)	64
Figura 4.13: Característica corriente voltaje del varistor S14K14. Datos obtenidos con incremento de voltaje (1) y con decremento de voltaje (2). Señal aplicada escalón 100 ms. Voltaje positivo.....	66
Figura 4.14: Característica corriente voltaje del varistor S20K14. Datos obtenidos con incremento de voltaje (1) y con decremento de voltaje (2). Señal aplicada impulso de voltaje 100 ms/100 ms.....	67
Figura 4.15: Característica corriente voltaje del varistor S20K14. Datos obtenidos con incremento de voltaje (1) y con decremento de voltaje (2). Señal aplicada impulso de voltaje 100 ms/100 ms. Voltaje negativo.....	68
Figura 4.16: Característica corriente voltaje del varistor S20K14. Datos obtenidos polarizando con voltaje negativo (cuadros negros) y con voltaje positivo (círculos blancos)	68
Figura 4.17: Característica corriente voltaje del varistor de la compañía Positrón. Datos obtenidos con incremento de voltaje (1) y con decremento de voltaje (2). Señal aplicada impulso de voltaje 100 ms/100 ms. Voltaje positivo ..	70
Figura 4.18: Característica corriente voltaje del varistor de la compañía Positrón. Datos obtenidos con incremento de voltaje (1) y con decremento de voltaje (2). Señal aplicada impulso de voltaje 100 ms/100 ms. Voltaje negativo..	71
Figura 4.19: Característica corriente voltaje del varistor de la compañía Positrón. Datos obtenidos polarizando con voltaje negativo (cuadros negros) y con voltaje positivo (círculos blancos)	71
Figura 4.20: Característica corriente voltaje del varistor de la compañía Positrón. Escala lineal.....	72
Figura 5.1: Característica corriente voltaje del varistor F3P2-1350. Datos obtenidos con incremento de voltaje (1) y con decremento de voltaje (2). Señal aplicada impulso de voltaje 100 ms/100 ms.....	74

Figura 5.2: Característica corriente voltaje del varistor F3P2-1350. Datos obtenidos con un impulso de voltaje 12 ms / 1000 ms (cuadros), con un escalón de voltaje 12 ms (círculos) y con un escalón de voltaje 100 ms (triángulos)	74
Figura 5.3: Característica corriente voltaje del varistor SG-17A. Datos obtenidos con incremento de voltaje (1) y con decremento de voltaje (2). Señal aplicada impulso de voltaje 100 ms/100 ms. Voltaje positivo.....	77
Figura 5.4: Característica corriente voltaje del varistor SG-17A. Datos obtenidos con incremento de voltaje (1) y con decremento de voltaje (2). Señal aplicada impulso de voltaje 100 ms/100 ms. Voltaje negativo.....	77
Figura 5.5: Característica corriente voltaje del varistor de una muestra cerámica en base de dióxido de estaño, SnO ₂ -Co ₃ O ₄ -Nb ₂ O ₅ -Cr ₂ O ₃ sinterizada a diferentes temperaturas. Datos obtenidos con incremento de voltaje (de color negro) y datos obtenidos con decremento de voltaje (sin color)	78
Figura 5.6: Característica corriente voltaje del varistor en base de dióxido de estaño, SG-17A (1) y del varistor en base de zinc, de la compañía Positron (2) ..	79
Figura 5.7: Característica corriente voltaje del varistor en base de dióxido de estaño, SG-17A (1) y del varistor en base de zinc, S20K14 (2). Datos obtenidos con incremento de voltaje (de color negro) y datos obtenidos con decremento de voltaje (sin color)	79
Figura B.1: Menú inicial.....	85
Figura B.2 Menú para solicitar la información general acerca de la medición a realizar	86
Figura B.3 Menú para solicitar los datos para la configuración de la fuente y unidad de medición Keithley 237	87
Figura B.4 Menú para mostrar y verificar los datos para la configuración de la fuente y unidad de medición Keithley 237	87
Figura C.1 Aplicación “TRTEST” para control GPIB diseñada por CEC. Funciones.....	88
Figura C.2 Respuesta de Keithley 237 a la aplicación “TRTEST” para control GPIB diseñada por CEC	88
Figura D.1 Dibujo del código con grafos de flujo.....	90
Figura D.2 Dibujo del código con grafos de flujo e identificación de regiones...	91
Figura F.1. Aproximación del coeficiente de no linealidad (β)	96
Figura G.1. Característica corriente voltaje de los varistores S07K25 (=26.57), S10K17 (=24.9), S20K14 (=32.0) y S05K11 (=9.71). Señal aplicada impulso de voltaje 10 ms/100 ms.....	97
Figura G.2. Característica corriente voltaje de los varistores S10K17(=23.5), S014K14 (=18.6), Positron (33V, =16.4) y Positron (47V, =31.6). Señal aplicada impulso de voltaje 10 ms/100 ms.....	97
Figura G.3. Característica corriente voltaje de los varistores S20K14 (=19.5), S05K11 (=22.9), S05K11 (=9.7) y S05K11 (=15.9). Señal aplicada impulso de voltaje 10 ms/100 ms.....	98
Figura G.4. Característica corriente voltaje de los varistores S20K14 (=32.5), S07K25 (=27.7), Positron (22V, =20.11) y Positron (22V, =28.4). Señal aplicada impulso de voltaje 10 ms/100 ms.....	98

SÍMBOLOS | ABREVIATURAS

U	Voltaje
I	Corriente
E	Campo eléctrico
J, j	Densidad de corriente
R	Resistencia eléctrica
β	Coefficiente de no linealidad
ϕ	Altura de la barrera potencial
SDM	<i>Source Delay Measure</i>
ATE	<i>Automated Test Equipment</i>
KPCI	<i>Keithley PC Interface</i>
IEEE	<i>The Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IEC	<i>The International Electrotechnical Commission</i>
GPIB	<i>General Purpose Interface Bus</i>
UFM Keithley 237	Fuente y unidad de medición Keithley 237

RESUMEN | ABSTRACT

El presente trabajo de tesis continúa con la línea de investigación del proyecto SEP-2003-C02-42821 de CONACYT (2004-2007) cuyo objetivo fue desarrollar los fundamentos físicos y físico-químicos para la obtención de nueva cerámica en base de dióxido de estaño (SnO_2) con desviaciones significativas de la ley de Ohm.

El Objetivo general de la tesis es desarrollar un programa para la adquisición de datos de la fuente y unidad de medición Keithley 237, que automatice el sistema de mediciones de corriente voltaje de dispositivos con dos terminales.

El resultado de la tesis es un programa para la adquisición de datos de la fuente y unidad de medición Keithley 237, que realiza la caracterización de corriente voltaje de dispositivos electrónicos con dos terminales. El programa se desarrolló en el lenguaje C++ utilizando el entorno de desarrollo integrado Microsoft Visual C++, la librería de gráficos abierta (OpenGL) y la librería “ieee_32.h” proporcionada por el fabricante de Keithley 237.

El programa presenta una interfaz sencilla, configura la fuente y unidad de medición Keithley 237, lee las mediciones realizadas por el instrumento, realiza una aproximación del coeficiente de no linealidad del dispositivo sujeto a investigación, gráfica el valor de voltaje (o corriente) aplicado y del valor de corriente (o voltaje) medido, almacena los valores de la medición en un archivo y ofrece una protección a las muestras sujetas a investigación y al equipo para que no sufran daño alguno.

This thesis continues the research line of the project SEP-2003 C02-42821 from CONACYT (2004-2007) whose objective was to develop the physics and physical-chemical for the production of new ceramic based on tin dioxide (SnO_2) with significant deviations from Ohm's law. The objective of the thesis is to develop a program for data acquisition of information of the Keithley 237, which automate the measurement system voltage power devices with two terminals.

The result of the thesis is a program for data acquisition of information of Keithley 237, which performs the current-voltage characterization of electronic devices with two terminals. The program was developed in C++ using the integrated development environment Microsoft Visual C++, the open graphics library (OpenGL) and the library “ieee_32.h” provided by the manufacturer of Keithley 237.

The program features a simple interface, you configure the source and Keithley measurement unit 237, reads the measurements by the instrument, performs an approximation of the coefficient of nonlinearity of the device under investigation, graph the value of voltage (or current) applied and the value of current (or voltage) measured, stores the measured values in a file and offers protection to the samples under investigation and the team to no harm.

Capítulo 1 | INTRODUCCIÓN

La Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM) cuenta con un laboratorio de Electrocerámica, el cual sirve para la investigación y desarrollo de nuevos materiales para varistores. Una de las tareas más importantes que se realiza en este laboratorio, consiste en la caracterización de corriente voltaje de dispositivos semiconductores. Para realizar esta tarea, el laboratorio cuenta con una fuente y unidad de medición Keithley 237 (UFM Keithley 237), cuya configuración y uso es mediante el panel frontal del instrumento (forma manual). Las mediciones realizadas con la UFM Keithley 237 de forma manual son ineficientes, debido a que las características y propiedades de la fuente y unidad de medición no se utilizan por completo, y del tiempo necesario para efectuarlas.

Una de las principales características de la UFM Keithley 237, es que puede ser controlada mediante una computadora a través de una tarjeta GPIB, sin embargo, el fabricante no proporciona ningún software.

Por lo que, este trabajo de tesis propone el desarrollo de un programa para la adquisición de datos y el control de la fuente y unidad de medición Keithley 237. Este programa gestionará el flujo de datos y los diferentes comandos para el manejo de la UFM Keithley 237 de forma remota y por lo tanto será un bloque medular para automatizar el proceso de medición de los dispositivos cerámicos. Su uso puede reducir el tiempo empleado en realizar los experimentos, hacer el trabajo del operador más simple, eliminar los errores humanos, hacer uso de las características de la UFM Keithley 237, y contar con una opción de realizar un monitoreo remoto de las mediciones.

Derivado de las pruebas que se realicen al programa se planea efectuar una investigación de las características corriente voltaje de varistores comerciales y varistores fabricados manualmente en el laboratorio de Electrocerámica de la UTM.

1.1. Antecedentes

Este trabajo continúa con la línea de investigación del proyecto SEP-2003-C02-42821 de CONACYT (2004-2007).

Cabe mencionar algunos trabajos realizados en la UTM empleando el estándar IEEE 488 (bus interface de propósito general, GPIB):

1. *Estudio del protocolo IEEE 488 mediante el desarrollo de una herramienta de simulación*, Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2003 [1].
2. *Comunicación inalámbrica de sistemas IEEE 488 mediante una picored bluetooth*, Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2005 [2].

De manera más particular en el área de automatización de instrumentos usando GPIB:

3. *Administración de los recursos de un laboratorio de comunicaciones digitales mediante su instalación, configuración y puesta en funcionamiento*, Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2004 [3].

1.2. Planteamiento del problema

Este proyecto de tesis propone diseñar e implementar un programa para la adquisición de datos de la fuente y unidad de medición Keithley 237, para automatizar las mediciones eléctricas que se efectúan en el laboratorio de electrocerámica de corriente voltaje. El programa será capaz de controlar a la fuente y unidad de medición Keithley 237 de forma remota y realizará las siguientes funciones:

- 1) Configuración necesaria de la fuente y unidad de medición de la UFM Keithley 237.
- 2) Obtención de los datos (medición voltaje o corriente) en la muestra sujeta a investigación.
- 3) Almacenamiento de los datos resultados de las mediciones.
- 4) Presentación de los resultados de manera gráfica.

El programa se desarrollará en el lenguaje C++, y para su implementación se utilizará el entorno de desarrollo integrado Microsoft Visual C++, la librería de gráficos abierta (OpenGL) y la librería “ieee_32.h” proporcionada por el fabricante de Keithley 237.

A partir de la verificación del programa se realizará una investigación de las características de corriente voltaje de varistores comerciales y de muestras cerámicas con desviación de la ley de Ohm obtenidas en el laboratorio de la UTM.

1.3. Objetivo

El objetivo general de esta tesis es desarrollar un programa para la adquisición de datos de la fuente y unidad de medición Keithley 237; que automatice el sistema de mediciones de corriente voltaje de dispositivos con dos terminales.

Para cumplir con el objetivo general se proponen los siguientes objetivos específicos:

- 1) Estudiar las características de la UFM Keithley 237 y de la tarjeta KPCI-488.
- 2) Obtener las especificaciones del programa.
 - 2.1. Establecimiento de los requisitos.
 - 2.2. Establecimiento de las restricciones.
- 3) Desarrollar el programa.
 - 3.1. Diseño del algoritmo.
 - 3.2. Traducción del algoritmo al lenguaje C++.
 - 3.3. Verificación y corrección de errores.
- 4) Obtener las características corriente voltaje de varistores comerciales y elaborados en la UTM y análisis de los datos.
- 5) Mejorar el programa en base a los resultados de las pruebas efectuadas.

1.4. Justificación

La Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM) se creó para ofrecer oportunidades de formación científica y tecnológica relevantes y de calidad a quienes deseen proseguir estudios superiores, coadyuvar en el desarrollo de proyectos que activen la economía y creen empleo. Siendo uno de los propósitos principales de la UTM la investigación y la creación de nuevos proyectos, adaptando el modelo educativo a la evolución tecnológica.

En base a lo anterior, la UTM desarrolla un laboratorio de Electrocerámica con equipos que permiten conocer las características electrónicas de los dispositivos elaborados a base de cerámica. Las mediciones realizadas de corriente voltaje se efectúan de forma manual; por lo que este proyecto ambiciona mejorar las condiciones de medición en el laboratorio de electrocerámica de la UTM, automatizando el proceso de medición.

1.5. Metodología de desarrollo

Tal y como se desprende del objetivo del proyecto, éste se forma de dos partes esenciales, el desarrollo de un programa para la adquisición de datos de la fuente y unidad de medición Keithley 237 y de la investigación de las características de corriente voltaje de nuevos materiales electrónicos. Por lo tanto la metodología de desarrollo (Figura 1.1) se divide en las siguientes etapas:

1. Estudio de fuente y unidad de medición Keithley 237.
 - 1.1. Propiedades, características y limitaciones de la UFM Keithley 237.
 - 1.2. Protocolo de comunicación.
 - 1.3. Estudio del estándar IEEE 488 y de la tarjeta KPCI 488.
2. Estudio de los lenguajes de programación y elección del lenguaje a usar para el desarrollo del programa.
3. Obtención de las especificaciones del programa, especificación del comportamiento externo del sistema.
4. Segmentación del programa. Identificación de subsistemas para convertir el programa en varios subprogramas.
5. Diseño del programa. Diseño de la interface (Página 85), diseño de componentes y diseño de los algoritmos de los subprogramas.
6. Implementación. Se codificaron los algoritmos al lenguaje C++.
7. Pruebas. Se ejecutaron suficientes pruebas.
8. Investigación de las características corriente voltaje de varistores no comercial.

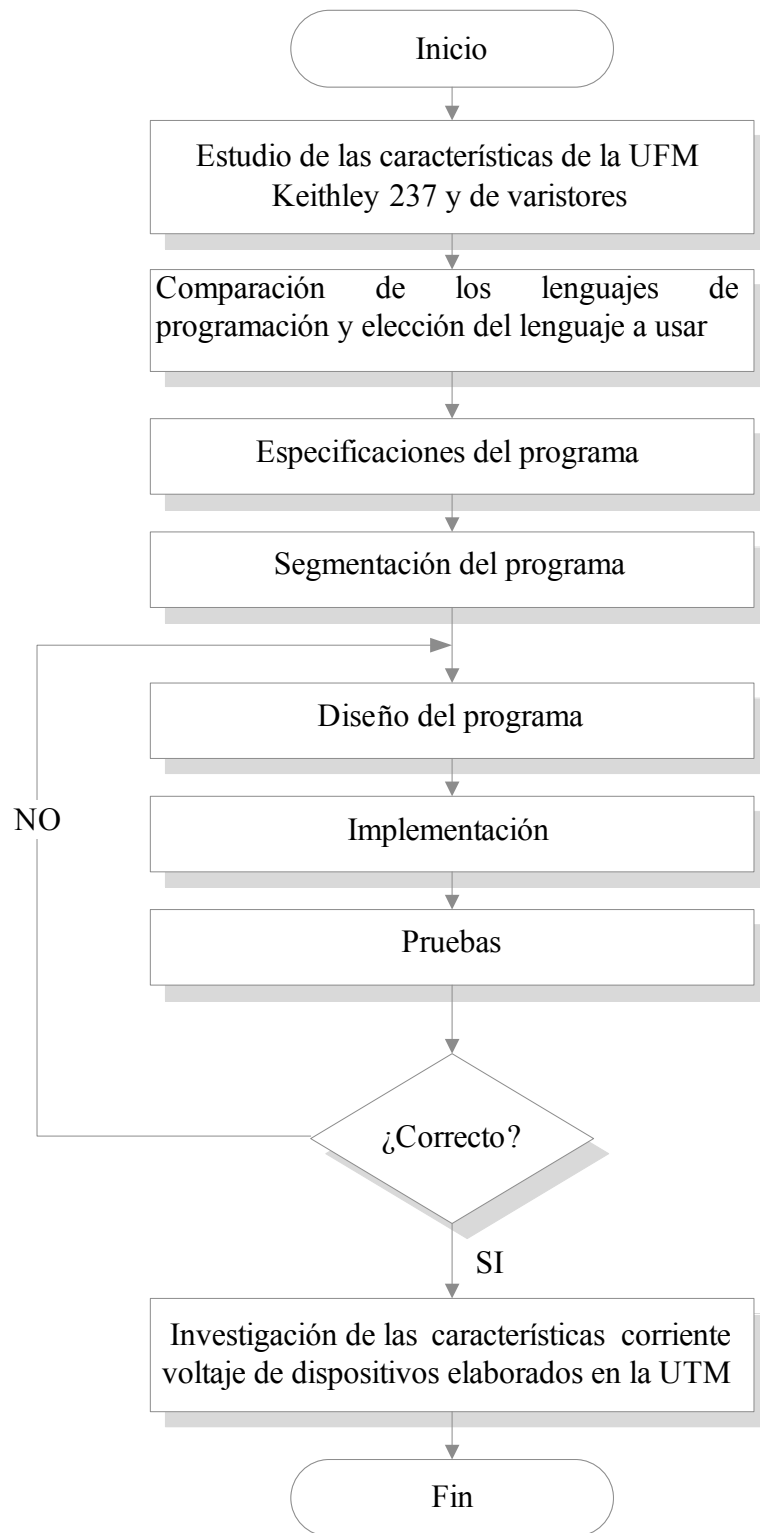


Figura 1.1 Metodología de desarrollo para realizar la tesis

1.6. Estructura de la tesis

La información pertinente para este trabajo se ha clasificado a lo largo de seis capítulos, y se ha estructurado de la siguiente manera:

Capítulo 1 presenta el planteamiento del problema, los objetivos, la justificación y metodología del trabajo de tesis.

Capítulo 2 expone el marco teórico de la fuente y unidad de medición Keithley 237; considerando las características generales, las especificaciones, y los comandos de programación. Se presenta el marco conceptual de la interfaz IEEE 488. Para después abordar el tema de los lenguajes de programación que comúnmente son usados en el área de instrumentación electrónica y termina con el estudio de los varistores.

Capítulo 3 hace referencia al diseño e implementación del programa con base en los requisitos y restricciones del sistema de medición.

En el capítulo 4 se presentan las pruebas realizadas para comprobar el correcto funcionamiento del programa.

En el capítulo 5 se muestran las características de corriente voltaje de los varistores en base de dióxido de estaño.

Se presentan las conclusiones del trabajo de tesis y las futuras líneas de trabajo. Por último se presentan las referencias bibliográficas y los Apéndices a los que se hacen referencia en el documento de tesis.

Capítulo 2 | MARCO TEÓRICO

En el mundo de la investigación es importante contar con fuentes de alimentación y poder medir los niveles de corriente y de voltaje de un sistema para verificar su operación e investigar efectos posibles. Un sistema de medición proporciona información acerca del valor físico de una variable, con el propósito de adquirir conocimiento [4]. En casos sencillos, el sistema puede consistir de una única unidad que da una salida de la lectura o señal de acuerdo con la magnitud de la variable desconocida. Los sistemas de medición modernos son complejos debido a que su estructura se forma generalmente por diferentes módulos cuyo control se desarrolla en una computadora, con el objetivo de que el sistema responda de un modo rápido, preciso y pueda ofrecer resultados durante la medición de ser necesario.

2.1. Características y parámetros de la fuente y unidad de medición Keithley 237

La fuente y unidad de medición Keithley 237 o también llamada UFM Keithley 237 (Figura 2.1) es un instrumento complejo. Completamente programable, capaz de generar y medir voltajes o corrientes en forma simultánea. Usado para la investigación y medición de dispositivos electrónicos [5].

A continuación se mencionarán las características y ventajas principales de éste instrumento.

2.1.1. Características generales

La fuente y unidad de medición Keithley 237 (Figura 2.1) es una herramienta que está integrada por cuatro instrumentos: fuente de voltaje, medidor de voltaje, fuente de corriente y medidor de corriente. Se puede controlar de forma manual o remota (debido a su característica de ser un instrumento completamente programable). La fuente y unidad de medición Keithley 237 opera en cuatro cuadrantes diferentes (Figura 2.2).



Figura 2.1 Fuente y unidad de medición Keithley 237

Este modelo es capaz de suministrar y medir voltaje en un rango de $1100V$ a $+1100V$, midiendo en el rango de $-100V$ a $100V$ corrientes de $\pm 10fA$ a $\pm 100mA$. Sin embargo en la gama de voltaje alto ($110V$ a $1100V$ o de $-100V$ a $-1100V$), la fuente de corriente o amperímetro opera hasta un valor máximo de $10mA$ [5].

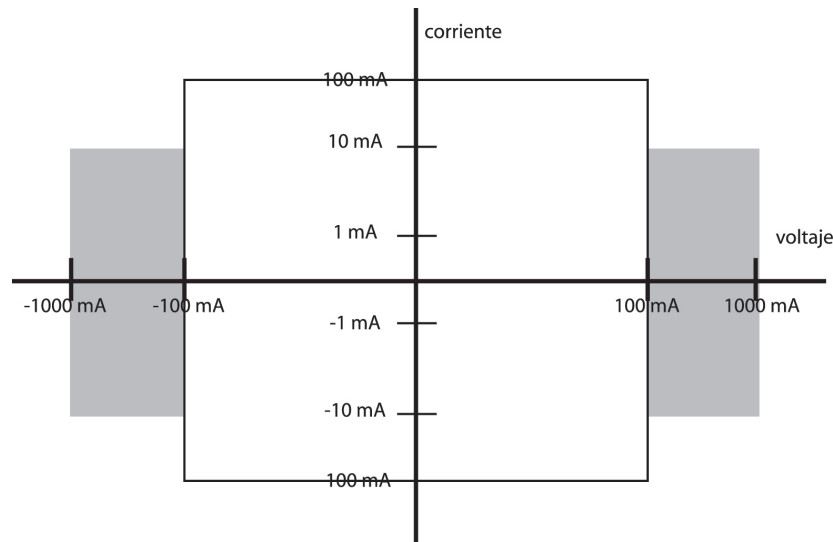


Figura 2.2 Capacidad de la UFM Keithley 237

La UFM Keithley 237 es idónea para medir corrientes y voltajes muy pequeños debido a que posee una sensibilidad de medición de $10fA/10\mu V$ [6]. Este instrumento tiene la ventaja de programar los límites de voltaje y corriente para proteger al dispositivo bajo prueba, circuito externo o a la misma UFM Keithley 237. El cumplimiento apropiado de los límites de corriente puede ser vital para prevenir la disipación de potencia excesiva en un dispositivo, mientras que, al cumplir con los límites de voltaje puede proteger un dispositivo susceptible a ser dañado por picos de sobre voltaje.

La UFM Keithley 237 nos ofrece una memoria interna de 1000 lecturas, lo que permite que las medidas puedan ser tomadas y registradas en la memoria interna (almacenando valores del voltaje/corriente de la fuente y el tiempo). Asimismo puede realizar hasta 1000 fuente/mediciones por segundo cuando se controla de forma programable [URL 2]. La UFM Keithley 237 puede trabajar de dos diferentes formas: DC o barrido. La acción que lleva a cabo la UFM en DC, es entregar a la salida un valor constante de DC de voltaje o corriente. Para trabajar en cualquiera de estos dos modos la UFM Keithley 237 realiza una serie de ciclos llamados en inglés como Source Delay Measure (SDM). Estos ciclos sirven para obtener valores más exactos debido a que realiza un promedio de mediciones, mediante tres pasos: primero se coloca el nivel de salida de la fuente, se realiza un retardo y por último se toma la medida. En la Figura 2.3 se muestra un ciclo SDM, el retardo se realiza para permitirle a la fuente colocar el nivel antes de que la medición sea hecha. El periodo total de tiempo de retardo incluye un retardo interno y el retardo programado por el usuario. El período de retardo real necesario puede ser calculado o determinado por prueba y error. Para cargas resistentes y corrientes más altas el retardo programable puede ser puesto a 0 milisegundos. Durante cada ciclo SDM, la

lectura medida se actualiza internamente y se despliega (el despliegue es más lento que la tasa interna de actualización de medida por lo que no todas las medidas son mostradas).

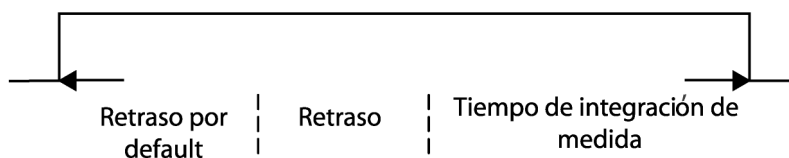


Figura 2.3 Ciclo de medida-retardo

En la otra forma de trabajo, en modo barrido, el voltaje y la corriente pueden ser barridos directamente, logarítmicamente, o mediante pulsos. Un ciclo SDM ocurre durante cada paso programado o punto del barrido. Keithley 237 cuenta con seis señales básicas de barrido (en la Figura 2.4 se muestran algunas de ellas) y permite la creación de nuevas señales. El usuario puede seleccionar los parámetros de la forma de onda, combinar múltiples formas, y seleccionar y cambiar cualquier punto en una forma de onda antes creada o añadida, mediante botones del panel frontal. Se puede programar el nivel de voltaje, el tiempo de retardo, y los puntos de medición, de acuerdo al tipo de barrido que se desea aplicar. Después de que se ejecuta un barrido, los datos (hasta 1000 puntos de medición) se almacenan en el buffer de barrido.

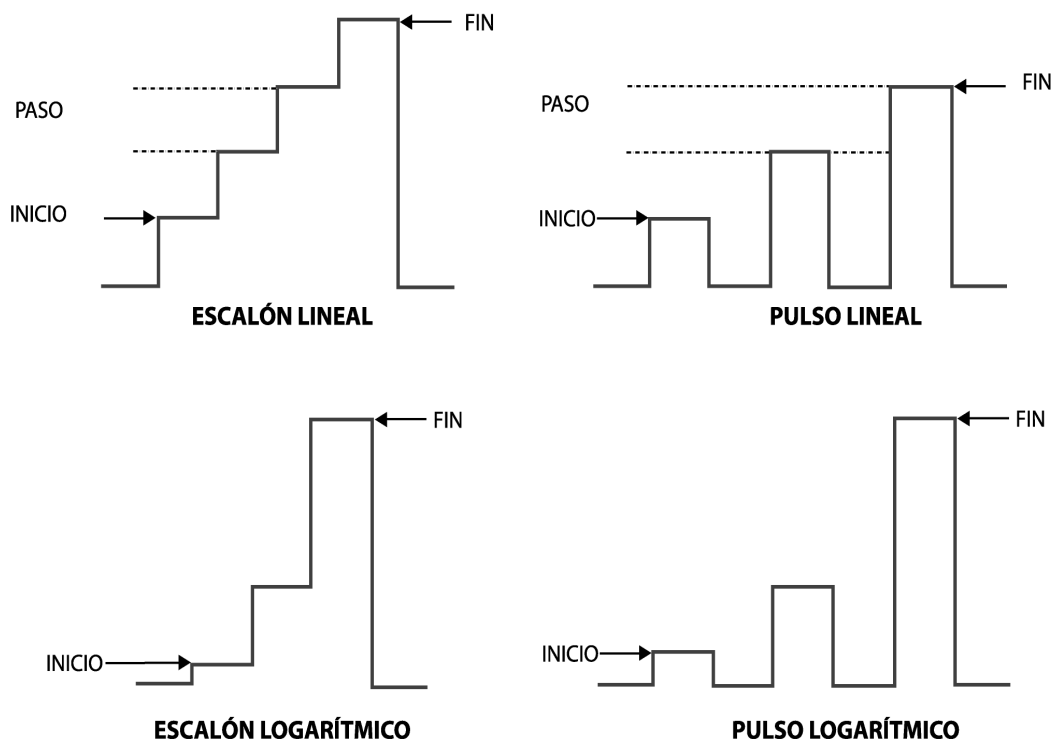


Figura 2.4 Formas de señal que genera Keithley 237 para realizar barridos

Se puede acceder a los datos resultados de una medición desde el panel frontal, o se envían a una computadora a través de un bus IEEE 488 para su análisis, siendo ésta una de las características más importante de la fuente y unidad de medición Keithley 237, debido a que el usuario puede realizar el control de la medición y registro de datos remotamente (haciendo uso de hardware y software adicional, ver Figura 2.5). Para el control de medición remoto se requiere de un modulo GPIB que se integra por una tarjeta controladora KPCI 488, cables GPIB y por un programa.



Figura 2.5 Configuración del sistema de medición

2.1.2. Keithley 237 como fuente de corriente y medidor de voltaje

En la Figura 2.6 se ilustra la configuración interna de la UFM cuando trabaja como fuente de corriente y medidor de voltaje. Internamente se tiene una fuente de corriente que suministra el valor con un voltímetro conectado en paralelo. En las terminales de salida (salida HI y salida LO) se encuentra el valor de corriente programa por el usuario. En la pantalla de LCD del instrumento se puede leer el valor de corriente que la UFM Keithley 237 está administrado al dispositivo bajo prueba (lado izquierdo de la pantalla del instrumento) así como también el voltaje registrado en las terminales del dispositivo (lado derecho de la pantalla del instrumento).

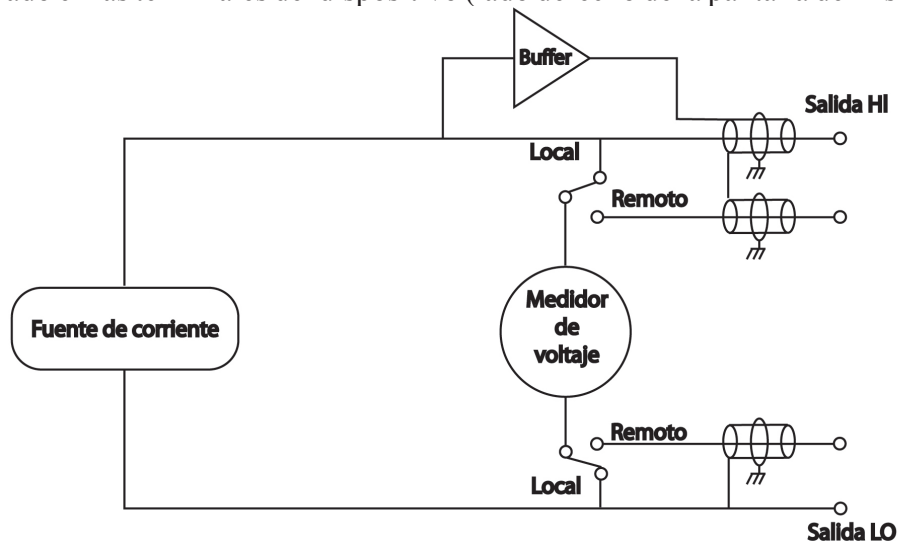


Figura 2.6 Configuración interna de Keithley 237 cuando funciona como fuente de corriente y medidor de voltaje

Es esta configuración, la UFM Keithley 237 funciona como una fuente de corriente de alta impedancia, característica de suma importancia para evitar cortocircuitos o que se queme el equipo por un mal uso. Por otra parte las características técnicas de la fuente de corriente son un factor importante a considerar en cualquier tipo de medición. En la Tabla 2.1 se presentan los parámetros más importantes de la UFM Keithley 237 cuando funciona como fuente de corriente, como lo son: rango, tamaño de paso y exactitud. Con la información proporcionada en la tabla, se puede decir que el tamaño de paso y la exactitud están relacionados directamente con el valor máximo de corriente.

Tabla 2.1 Capacidades de la UFM Keithley 237 como fuente de corriente [6]

Fuente de Corriente		
Rango (Máximo valor)	Paso (Tamaño)	Exactitud (1 año, 18-28 °C)
$\pm 1.0000nA$	$100fA$	$\pm (0.3 \% + 450fA)$
$\pm 10.0000nA$	$1pA$	$\pm (0.3 \% + 2pA)$
$\pm 100.0000nA$	$10pA$	$\pm (0.21 \% + 20pA)$
$\pm 1.0000\mu A$	$100pA$	$\pm (0.05 \% + 200pA)$
$\pm 10.0000\mu A$	$1nA$	$\pm (0.05 \% + 2nA)$
$\pm 100.0000\mu A$	$10nA$	$\pm (0.05 \% + 20nA)$
$\pm 1.0000mA$	$100nA$	$\pm (0.05 \% + 200nA)$
$\pm 10.0000mA$	$1\mu A$	$\pm (0.05 \% + 2\mu A)$
$\pm 100.0000mA$	$10\mu A$	$\pm (0.1 \% + 20\mu A)$

En la Tabla 2.2 se exhiben las capacidades para cuando la UFM Keithley 237 funciona como medidor de voltaje. En esta tabla se muestran el rango de medición con la resolución y exactitud que se pueden alcanzar. Esta exactitud es siempre la misma, no importando si la UFM Keithley 237 es programada local o remotamente. Cuando la UFM Keithley 237 opera localmente el voltaje es medido a la salida de la UFM Keithley 237, mientras que si es programada para un uso remoto la UFM Keithley 237 mide el voltaje en el dispositivo bajo prueba, eliminando cualquier caída de tensión que pueda ser provocada u originada por conexiones adicionales entre la UFM Keithley 237 y el dispositivo bajo prueba [6].

Tabla 2.2 Capacidades de la UFM Keithley 237 como medidor de voltaje [6]

Medidor de Voltaje			
Rango (Máximo valor)	Resolución		Exactitud (1 año, 18-28 °C)
	4 Dígitos	5 Dígitos	
$\pm 1.1000 V$	$100 \mu V$	$10 \mu V$	$\pm(0.028 \% + 300\mu V)$
$\pm 11.0000 V$	$1 mV$	$100 \mu V$	$\pm(0.025 \% + 1mV)$
$\pm 110.0000 V$	$10 mV$	$1 mV$	$\pm(0.025 \% + 10 mV)$
$\pm 1100.0000 V$	$100 mV$	$10 mV$	$\pm(0.035\% + 100 mV)$

Los límites de funcionamiento de la UFM Keithley 237 para cuando trabaja como fuente de corriente y medidor de voltaje se muestran en la Figuras 2.7. a) y 2.7. b). Las líneas de carga son líneas limítrofes (Figura 2.7). Mientras que la línea de carga de límite de voltaje representa el límite de cumplimiento programado por el usuario al medir el voltaje, UFM Keithley 237 no puede medir más voltaje que el programado, si por alguna razón el voltaje a medir estuviera fuera del límite la UFM Keithley 237 deja de trabajar (Figura 2.7. b). La línea de carga de corriente de la fuente representa la corriente de la fuente programada por el usuario, esta línea de carga nunca es sobrepasada por la UFM Keithley 237.

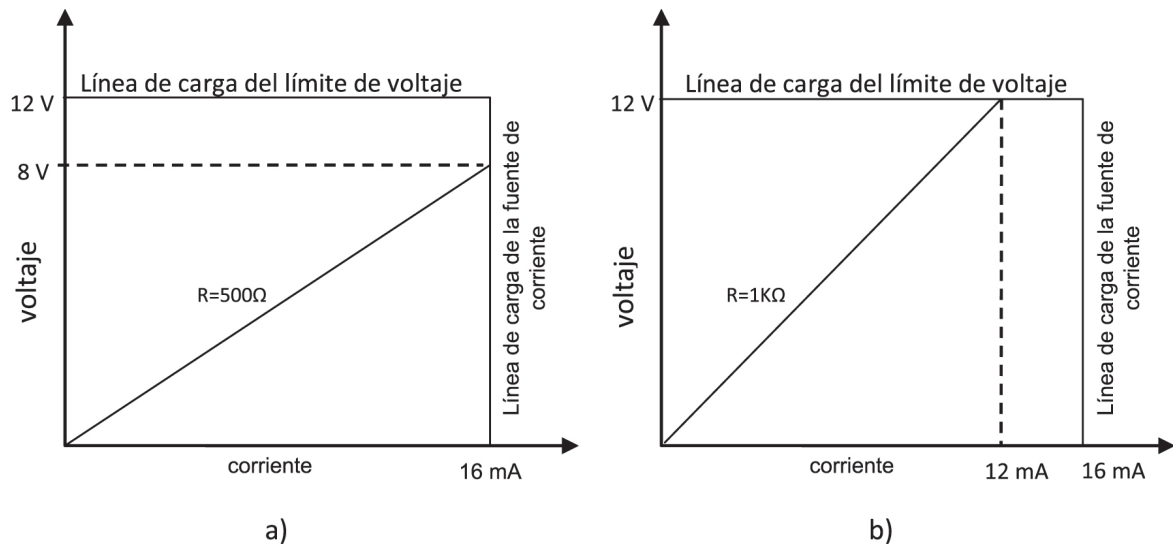


Figura 2.7 Ilustración de la protección contra sobrevoltaje, para una medición en el rango de 0 a 16mA y con un límite de protección de 12V. a) Operación normal, b) Operación con restricción

2.1.3. Keithley 237 como fuente de voltaje y medidor de corriente

La configuración interna de la UFM Keithley 237 cuando funciona como fuente de voltaje y medidor de corriente se ejemplifica en el circuito de la Figura 2.8. En esta configuración se realiza internamente un monitoreo constante de la salida de voltaje para ajustar el valor y eliminar errores. Cuando trabaja como fuente de voltaje, Keithley 237 puede entregar a través de sus terminales de -1100V a 1100V. En la Tabla 2.3 se presentan el rango, el tamaño de paso y la exactitud de la UFM Keithley 237 cuando funciona como fuente de voltaje, es importante saber que para cada rango de voltaje el tamaño de paso cambia, por ejemplo, el mínimo tamaño de paso es de $100\mu V$ para un valor de voltaje de -1100V a 1100V. Otro parámetro importante es la exactitud que proporciona el amperímetro de la UFM Keithley 237 (Tabla 2.4).

La Figura 2.9, es una representación de los límites de operación cuando funciona como fuente de voltaje y medidor de corriente. Las líneas de carga representan los límites de operación del instrumento. La línea de carga de la fuente de voltaje representa el voltaje programado por el usuario, mientras que la línea de carga del límite de corriente es el límite de cumplimiento programado para medir la corriente. Ninguna de estas dos líneas es sobrepasada durante el funcionamiento de la UFM Keithley 237, de ser así el instrumento detiene su operación (Figura 2.9.b).

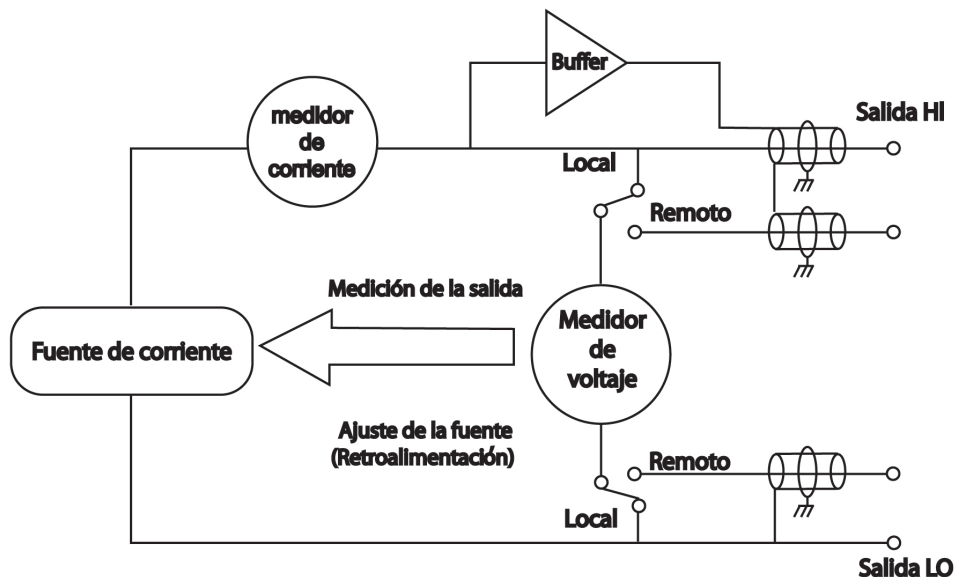


Figura 2.8 Configuración interna de la UFM Keithley 237 cuando funciona como fuente de voltaje y medidor de corriente

Tabla 2.3 Capacidades de la UFM Keithley 237 como fuente de voltaje [6]

Fuente de Voltaje		
Rango (Máximo valor)	Paso (Tamaño)	Exactitud (1año, 18-28 °C)
$\pm 1.1000V$	$100 \mu V$	$\pm(0.033\% + 650\mu V)$
$\pm 11.0000V$	$1mV$	$\pm(0.033\% + 2.4mV)$
$\pm 110.0000V$	$10mV$	$\pm(0.033\% + 24mV)$
$\pm 1100.0000V$	$100mV$	$\pm(0.033\% + 24mV)$

Tabla 2.4 Capacidades de la UFM Keithley 237 como medidor de corriente [6]

Medidor de Corriente			
Rango (Máximo valor)	Resolución		Exactitud (1año, 18-28 °C)
	4 Dígitos	5 Dígitos	
$\pm 1.0000nA$	$100fA$	$10fA$	$\pm(0.3 \% + 100fA)$
$\pm 10.0000nA$	$1pA$	$100fA$	$\pm(0.3 \% + 1fA)$
$\pm 100.0000nA$	$10pA$	$1pA$	$\pm(0.21 \% + 6fA)$
$\pm 1.0000\mu A$	$100pA$	$10pA$	$\pm(0.04 \% + 60fA)$
$\pm 10.0000\mu A$	$1nA$	$100pA$	$\pm(0.035\% + 700pA)$
$\pm 100.0000\mu A$	$10nA$	$1nA$	$\pm(0.035\% + 6nA)$
$\pm 1.0000mA$	$100nA$	$10nA$	$\pm(0.035\% + 60nA)$
$\pm 10.0000mA$	$1\mu A$	$100nA$	$\pm(0.038\% + 600nA)$
$\pm 100.0000mA$	$10\mu A$	$1\mu A$	$\pm(0.1\% + 6\mu A)$

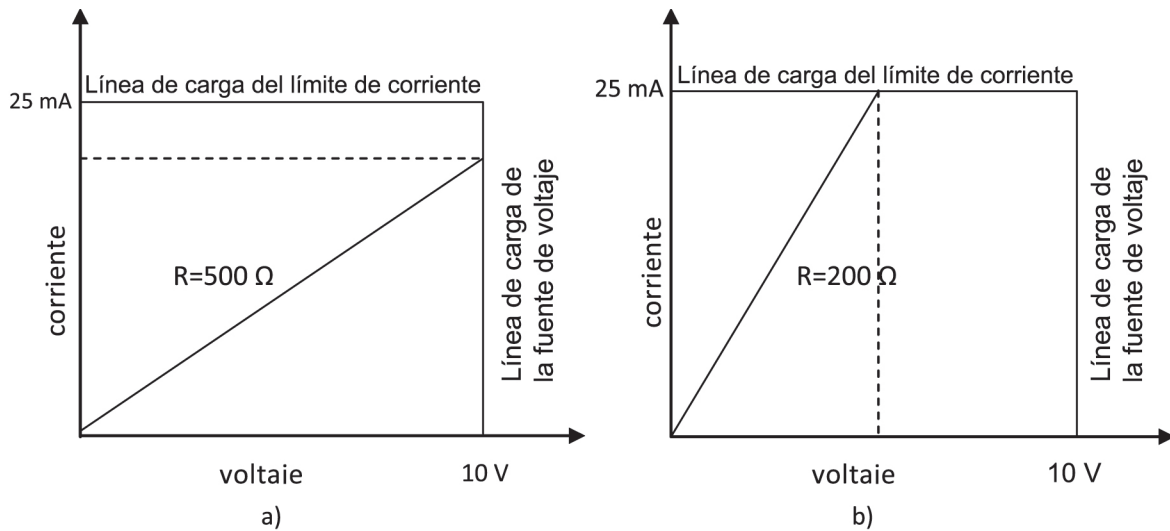


Figura 2.9 Ilustración de la protección contra sobrecorriente, para una medición en el rango de 0 a 10V y con un límite de protección de 25mA. a) Operación normal, b) Operación con restricción

2.2. Tarjeta KPCI-488

El sistema GPIB consiste en una serie de instrumentos de medida conectados a un bus, y controlados normalmente por una PC dotada de una tarjeta GPIB. Las tarjetas controladoras GPIB son parte del bloque de control del sistema de medición, y se encarga de enviar los comandos dictados por un programa de control (ejecutado en un PC) a cada dispositivo para que desempeñe su función. Este tipo de tarjetas hardware tienen las capacidades de controlar, leer y escribir sobre las líneas físicas que constituyen el bus GPIB.

Las tarjetas controladoras GPIB pueden conectarse a un bus que puede ser de tipo ISA, PCI, PCMCIA (portátiles), USB, Ethernet, Firewire, y los puertos serie y paralelo [7]. Son tarjetas de alta velocidad que pueden controlar no menos de 14 instrumentos GPIB u otros dispositivos a una distancia de hasta 20 metros. Son ideales para el control de equipo automatizado de prueba en los laboratorios y en la industria.

De manera particular, la tarjeta KPCI-488 (Figura 2.10) es una tarjeta interface GPIB para bus PCI (de 33MHz y 32 bits) que funcionan bajo DOS y WINDOWS a 16 ó 32 bits (3.X, 95/97, NT) [URL 3]. Esta tarjeta se incorpora a la computadora a través de una ranura PCI. Su interfaz PCI soporta ambientes PC de 3.3V y 5V, adecuado para la mayoría de las computadoras de escritorio y PC industriales. La Tabla 2.5 muestra sus especificaciones técnicas.

La velocidad de transferencia es de 1.5 Mbyte/s. Soporta los lenguajes: Basic, Qbasic, Quickbasic, Visual Basic, Delphi, C, C++, Visual C/C++, Watcom C, Fortran, HPVEE, LabVIEW.

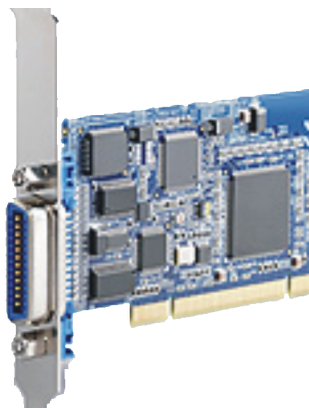


Figura 2.10 Tarjeta KPCI-488

A continuación se describirá y analizará la interfaz GPIB bajo la cual funciona la UFM Keithley 237 y la tarjeta KPCI-488 para controlar y comunicar instrumentos de medición. Se enfatizará en las características eléctricas, lenguaje de comunicación y las herramientas existentes para la programación de la UFM Keithley 237.

2.2.1. Interfaz GPIB (IEEE 488/IEC 625)

Para lograr la unión de distintos dispositivos electrónicos de forma tal que sean capaces de funcionar de manera compatible y coordinada, se debe tener en cuenta la estandarización de las conexiones (o interfaz). La interfaz del sistema puede ser serie (transmisión de datos serial) o paralela. La interfaz paralela realiza la transmisión simultáneamente de varios bits y la principal ventaja de una interfaz paralela, es la velocidad con que pueden ser transferidos los datos de una computadora a un dispositivo periférico.

Actualmente existen dos diferentes tipos de interfaces paralelas: Centronics printer port e IEEE 488, pero sin duda el bus IEEE 488 conocido también como GPIB o HP-IB es con mucho el más usado [8,9]. El objetivo principal de GPIB consiste en gestionar la transferencia de información entre dos o más dispositivos electrónicos digitales a una velocidad nominal de 1Mbyte/s. GPIB se convirtió en el bus y protocolo estándar para el control y comunicación con instrumentos de medida idóneo para la implementación de Sistemas de Pruebas Automáticas (*Automatic Test Equipment, ATE*) [8]. El diseño de sistemas de medición con este protocolo es fácil debido a la buena definición del protocolo de transmisión y a la lista de comandos. Los dispositivos que pueden ser clasificados en receptor (*listener*), emisor (*talker*) o controlador (*controller*) se comunican entre ellos mediante el uso de mensajes. A continuación se describen las tareas desempeñadas por un instrumento receptor, emisor o controlador.

Receptor (*listener*): Dispositivo capaz de recibir datos o señales de control de otros dispositivos conectados al bus al ser direccionados. Puede haber hasta catorce dispositivos receptores activos simultáneamente.

Emisor (*talker*): Dispositivos con la capacidad de colocar datos en el bus (una vez que es direccionado), sin la capacidad de recibir datos. Únicamente puede haber un dispositivo emisor activo en la interface en todo momento.

Controlador (*controller*): Dispositivo capaz de determinar la función que va a realizar cada equipo (emisor o receptor) en una transferencia de información en la que interviene él mismo. Usados para supervisar el flujo de datos.

Un dispositivo puede clasificarse en cualquiera de las tres definiciones anteriores, sin embargo debemos tener presente que algunos instrumentos tienen la capacidad de actuar en un tiempo dado como receptor y después como emisor, sin llegar a ser emisor y receptor al mismo tiempo. Cada dispositivo en el sistema GPIB ya sea un emisor, receptor o controlador tiene asociada una dirección irreplicable, esto se logra, mediante la asignación de una dirección codificada con 7 bits para cada instrumento [10].

El estándar IEEE 488 actualmente se integra por el estándar IEEE 488.1 (que define el hardware: en las especificaciones mecánicas, eléctricas, y el protocolo básico de GPIB) y el estándar IEEE 488.2 (que define el formato de los comandos o los datos).

Bajo el estándar IEEE 488.1 se especifica que GPIB permite la conexión de hasta 15 dispositivos de medición (incluyendo al controlador). Además la norma dicta que la longitud máxima del bus (del controlador al último dispositivo) no debe ser mayor a 20 metros. El bus está constituido por ocho líneas de datos que son paralelas y bidireccionales, usadas para transferir datos, direcciones, comandos, y el estado de los bytes. Además de 3 líneas para el establecimiento de la comunicación y 5 líneas para el control del bus. Esto corresponde a 16 líneas de señal y 8 tierras (Ver Figura 2.13). La interfaz GPIB utiliza un conector especial de 24 terminales, dispuestos en 2 filas paralelas. La Figura 2.11 muestra el aspecto físico del conector y el estándar de la distribución de las líneas.

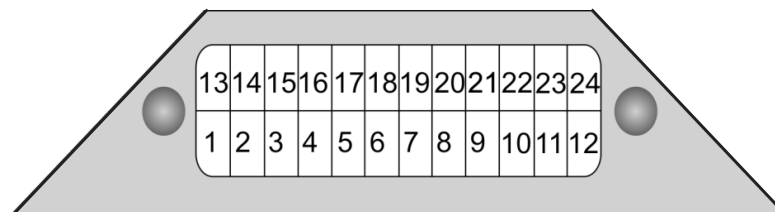


Figura 2.11 Conector de la interfaz GPIB

Las normas del estándar IEEE 488.1 definen que todo sistema GPIB debe trabajar con lógica negativa, en la Tabla 2.6, se muestran los rangos para determinar el valor de falso o verdadero del nivel lógico de recibido.

Tabla 2.6 Especificaciones Eléctricas (TTL)

Nivel lógico	Voltaje
Falso (0)	$> +2V$
Verdadero (1)	$< 0.8V$

El estándar IEEE 488.2, surge con la finalidad de resolver ambigüedades y problemas (siendo un complemento de IEEE 488.1). IEEE 488.2 especifica la estructura de los mensajes, las instrucciones que todos los dispositivos deben implementar, reporte de estatus (Standard Status Reporting Structure) y los protocolos para los dispositivos controladores. El documento definió el formato requerido para cualquier tipo de mensaje que se envíe, incluyendo número y cadena de caracteres. Los tipos de números especificados son: binario, octal y hexadecimal. En cuanto a los mensajes, éstos se integran por un cuerpo y un terminador de mensaje.

El cuerpo puede estar constituido por una o más unidades. Se definió la existencia de dos tipos de unidades, los comandos de programación y las preguntas. Los dos tipos de unidades se componen de una cabecera y de datos. Las cabeceras pueden ser de tres tipos: simples, compuestas y comandos comunes. La terminación del mensaje se puede realizar con activación de la línea EOI o con el carácter NL.

La norma define 39 comandos comunes. De ellos 13 (Tabla 2.7) deben ser interpretados por todos los dispositivos conectados al bus GPIB. Estos comandos básicos de comunicación con el equipo pueden a la vez ser utilizados por lenguajes de programación de alto nivel (C++®, visual®, MATLAB®, etc.). Además describe un protocolo de intercambio de mensaje para ser usado en el bus IEEE 488.1.

Tabla 2.7 Comandos básicos de comunicación para dispositivos [11]

Comando	Función
*CLS	Borra toda la información de estado del dispositivo.
*ESE	Evento habilitar estatus.
*ESE?	Indagar el evento habilitar estatus.
*ESR?	Indagar el evento registro de estatus.
*IDN?	Solicita la identificación del dispositivo.
*OPC	Sirve para indicar que una operación ha sido terminada.
*OPC?	Indaga si la operación ha sido terminada.
*RST	Provoca una inicialización del dispositivo.
*SRE	Habilitar la solicitud de servicio.
*SER?	Habilitar el servicio de solicitud de consulta.
*STB?	Solicita el valor del registro de estado.
*TST?	Provoca que el dispositivo realice una secuencia de prueba interna y envíe un mensaje con el resultado.
*WAI	Impide que el dispositivo realice ninguna operación hasta que la operación en curso haya sido completada.

Se ha definido un conjunto de estados operacionales para implementar el protocolo de mensaje a dispositivo de IEEE 488.2, tal y como se puede apreciar en la Tabla 2.8. Todo esto con la finalidad de poder desarrollar interfaces más amigables con el usuario y que faciliten la extracción de información de forma remota del equipo. Un dispositivo de control debe implementar protocolos, que son rutinas de alto nivel que combinan secuencias de control para realizar operaciones básicas en los sistemas de instrumentación. El estándar IEEE 488.2 define 2 protocolos obligatorios (RESET y ALLSPOLL) y 6 opcionales, como se muestra en

la Tabla 2.9. Este protocolo se utiliza al iniciar la ejecución de una aplicación, para verificar la configuración del sistema y para que el dispositivo controlador genere una lista de todos los instrumentos disponibles.

Tabla 2.8 Estados operacionales de dispositivos [1,8]

Estado	Propósito
IDLE	En espera de mensaje.
READ	Lee y ejecuta mensajes.
QUERY	Almacena respuestas para ser enviadas.
SEND	Envía respuestas.
RESPONSE	Concluyendo envió de respuestas.
DONE	Envío de respuestas finalizado.
DEADLOCK	No cabe más dato en el buffer.
UNTERMINATED	Intento de leer un mensaje sin terminador.
INTERRUPTED	Interrumpido por un mensaje mientras enviaba una respuesta.

Tabla 2.9 Protocolos de control del estándar IEEE 488.2 [8]

Nombre	Descripción
ALLSPOLL	Sondeo serial de todos los dispositivos conectados al bus.
FINDLSTN	Buscar y lista todos los dispositivos conectados al bus.
FINDRQS	Busca el primer dispositivo que busca servicio (con SRQ verdadero).
PASSCTL	Pasa el control del bus.
REQUESTCLT	Pide el control del bus
RESET	Restablece todos los dispositivos de bus.
SETADD	Configurar dirección.
TESTSYS	Auto verificación del sistema.

En cuanto a los lenguajes de alto nivel se presenta la Tabla 2.10 que muestra un conjunto de comandos de lengua de alto nivel que pueden ser usados para programar un sistema IEEE 488.

Tabla 2.10 Comandos de lenguajes de alto nivel para programar un sistema IEEE 488

Comando	Función
ABORT	Finaliza el actual dispositivo seleccionado y el mando. Sino se encuentra el dispositivo, el bus es limpiado y ajustado a la situación dada en el último comando CONFIG.
CLEAR	Limpia o restablece el o los dispositivos seleccionados. Si no se encuentra el dispositivo, el bus es limpiado y colocado al último estado conocido.
CONFIG	Configura el bus con los requisitos dados. El bus quedará configurado hasta que se vuelva a configurar.
ENTER	Lee datos del dispositivo seleccionado.
EOI	Envía un byte de datos para el dispositivo con EOI verdadera. El dispositivo debe programarse como emisor antes de que el comando se ejecute.

Tabla 2.10 (continuación)	
LOCAL	Pone el dispositivo (s) seleccionado en modo local. Si ningún dispositivo es especificado entonces todos los dispositivos sobre el bus son puestos en modo local.
OUTPUT	Envía una cadena al receptor seleccionado. Si ningún oyente es especificado en la orden, entonces todos los receptores recibirán la cadena especificada.
PARPOL	Lee el byte de estado de los dispositivos que han sido puestos para un sondeo paralelo.
PASCTL	Pasa el control del bus al dispositivo especificado.
PPCONF	Ajusta la configuración de sondeo paralelo para el dispositivo especificado.
PPUNCF	Restablece la configuración de sondeo paralelo para el dispositivo especificado.
REMOTE	Selecciona el modo remoto para el dispositivo seleccionado.
REQUEST	Solicita servicio de un controlador activo.
STATUS	Lee un (sondeo serie) byte de estado el dispositivo seleccionado.
SYSCON	Configura el sistema para una configuración de usuario. El comando inicializa una serie de variables del sistema incluyendo MAD. La dirección del controlador del sistema. CIC. El controlador a cargo. NOB. El número de controladores en el bus. BA0. La base de direcciones E/S para el primer controlador de bus. BA1. La base de direcciones E/S para el segundo controlador de bus.
TIMEOUT	Establece la duración de intervalo de espera cuándo se transfieren datos hacia y desde dispositivos.

2.2.2. La fuente y unidad de medición Keithley 237 y el estándar IEEE 488

La fuente y unidad de medición Keithley 237 funciona bajo los estándares IEEE 488, con la característica de adoptar los estados de emisor (talk), receptor (listener) y funcionar en un modo local o remoto. La UFM 237 soporta los siguientes comandos del bus GPIB: REN (Remote Enable), IFC (Interface Clear), LLO (Local Lockout), GTL (Go To Local), DCL (Device Clear), SDC (Selective Device Clear), GET (Group Execute Trigger), SPE y SPD (Serial Polling). La dirección principal de la UFM 237 es el valor predeterminado 16 (asignada desde su fabricación). Para programar la UFM Keithley 237 en un lenguaje de alto nivel, los comandos básicos de inicialización, envió, lectura y sondeo siguen la sintaxis mostrada en la Tabla 2.11. Además de estos comandos la UFM Keithley 237 puede programarse mediante una serie de comandos especializados, como los comandos LISTENERPRESENT y TRANSMIT, además de las transferencias de datos sencillas. En la Tabla 2.12 se observa la sintaxis para implementar los comandos en algún lenguaje de alto nivel.

Tabla 2.11 Comandos básicos de lenguajes de alto nivel para la UFM Keithley 237

Comando	Descripción	Función
INITIALIZE	INITIALIZE (my.address, level)	Inicialización del sistema.
SEND	SEND (address, info, status)	Envío de datos.
ENTER	ENTER (recv, maxlength, length, address, status)	La rutina ENTER sirve para leer desde un dispositivo.
SPOLL	SPOLL (address, poll, status)	Sondeo serial. Esta rutina sirve para conocer el estado actual de único dispositivo.
PPOLL	PPOLL (poll)	Sondeo paralelo. Una encuesta paralela regresa un byte.

Tabla 2.12 Comandos especializados para la UFM 237

Comando	Descripción	Función
SRQ	srq	Verificación
LISTENERPRESENT	ListenerPresent (addr)	Comprobación de la presencia de un dispositivo receptor.
TRANSMIT	TRANSMIT(command, status)	Programar cualquier comando. El parámetro <i>command</i> es una cadena que contiene una serie de comandos GPIB y datos.
RECEIVE	RECEIVE (recv, maxlength, length, status)	Se puede utilizar para leer datos desde un dispositivo.
TARRAY	TARRAY (data.array, count, eoi, status)	Permite el envío de un paquete de datos binarios de la computadora a los dispositivos receptores conectados al bus GPIB.
RARRAY	RARRAY (data.array, count, length, status)	Se utiliza para recibir hasta 64K bytes de datos binarios.

Resumiendo las especificaciones del estándar IEEE 488 se presenta el apéndice A, en el cual se concentran las especificaciones mecánicas, eléctricas y de procedimiento, abarcando las normas IEEE 488.1 e IEEE 488.2.

2.3. Lenguajes de programación

Un lenguaje de programación es un sistema notacional para describir computaciones en una forma legible tanto para la máquina como para el ser humano [12]. De manera práctica los lenguajes de programación son herramientas que permiten crear programas, normalmente llamados software. En la actualidad existe una gran diversidad de lenguajes de programación, los cuales se clasifican en: lenguajes de bajo nivel y lenguajes de alto nivel.

Dentro de los lenguajes de alto nivel existen lenguajes de programación orientados a la instrumentación, que cuentan con funciones y/o herramientas para realizar el diseño y manejo

de los aparatos electrónicos. Este tipo de lenguajes facilitan el control de instrumentos y dispositivos, además de permitir el diseño de interfaces sofisticadas. Entre los lenguajes de programación más usados de este tipo, se encuentran: LabVIEW, LABWindows/CVI, Agilent VEE Pro, TestPoint y DasyLab. Siendo el lenguaje gráfico LabVIEW de la compañía National Instruments el líder para el diseño de sistemas de medida y automatización [4]. A continuación se describirán brevemente algunos de estos lenguajes de programación.

2.3.1 Lenguajes de desarrollo para instrumentación electrónica

- 1) LabWindows/CVI. Es un sistema de software para programadores en C. Orientado para aplicaciones de adquisición de datos y control de instrumentos. Un programa en LabWindows/CVI consta básicamente de dos partes: de una interfaz gráfica y un programa escrito en C que gestiona los mensajes de control. Crear una interfaz gráfica (GUI) para controlar y visualizar tareas en una determinada aplicación, se puede construir sin tener que escribir ni una sola línea de código fuente gracias al editor de interfaz de usuario. La interfaz puede constar de: paneles, pulsadores, y otros tipos de controles. En todo tipo de interfaz creada en LabWindows se van generando controles que definen eventos y que serán manejados por el programa de control escrito en C. La importancia de LabWindows/CVI radica en sus librerías. Para la adquisición de datos cuenta con cinco librerías: Instrument Library, GPIB/GPIB 488.2 Library, Data Acquisition Library, RS-232 Library y VXI Library [13].
- 2) Agilent VEE (*Visual Engineering Environment*) Pro. Es un ambiente de programación gráfico optimizado; diseñado específicamente para aplicaciones de pruebas y medición. Los programas desarrollados en VEE Pro se construyen mediante la selección de elementos de programas, llamados objetos que se conectan entre sí. Estos objetos pueden realizar diversas funciones (por ejemplo: operaciones de entrada-salida, análisis, y graficar funciones). Soporta las interfaces de bus: ISA, PCI, y otros. Mejora el control de entradas y salidas de los instrumentos controlados por GPIB, VXI, comunicación serial, tarjetas para PC LAN y Plug-in. Cuenta con la opción de importar código de lenguajes como: C/C++, Visual Basic, Pascal y Fortran [14].
- 3) LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*). Es un lenguaje de programación gráfico para el diseño de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control. Los programas desarrollados mediante LabVIEW se denominan Instrumentos Virtuales (VIs) porque su apariencia y funcionamiento imitan los de un instrumento real. Permite diseñar interfaces entendible a la vista, eficaces y muy reales. En el ambiente de trabajo de LabVIEW existen dos paneles: el panel frontal y el panel de programación o diagrama de bloques. En el panel frontal se diseña la interfaz de usuario, y en el panel de programación se relacionan los elementos utilizados en la interfaz mediante operaciones que determinan en sí como funciona el programa [4]. LabVIEW posee extensas librerías de funciones y subrutinas. Además de las funciones básicas de todo lenguaje de programación, LabVIEW incluye librerías específicas para la adquisición de datos, control de instrumentación VXI, GPIB y comunicación serie, análisis presentación y guardado de datos. LabVIEW también proporciona potentes herramientas que facilitan la depuración de los programas.

Por otra parte entre los tres lenguajes de programación más usados actualmente según TIOBE Software, se encuentran: Java, C y C++ [12]. El Lenguaje C constituye uno de los lenguajes de programación más difundidos y utilizados en la actualidad por los ingenieros, tanto para la resolución de problemas científicos y técnicos como para el desarrollo de aplicaciones de propósito general.

Mediante el empleo de cualquier lenguaje de programación de alto nivel y con el uso de las órdenes de lenguaje de alto nivel definidas en el estándar IEEE 488 para programar un sistema, se puede establecer una comunicación entre instrumentos programables, para construir sistemas automáticos de pruebas (ATE) o sistemas de control de instrumentación.

2.3.2. Características generales de C++

A principios de los ochenta Bjarne Stroustrup desarrollo una extensión de C en los laboratorios Bell, inicialmente se llamo C con clases, para posteriormente tomar su nombre definitivo C++ cuando fue publicado en 1983 [15]. Aunque en un principio C++ se plantea como una mejora de C, en la actualidad es un lenguaje independiente, conservando la compatibilidad con C. En el diseño del lenguaje C++ se utilizaron tres principios: encapsulamiento, herencia y polimorfismo. Al aplicar estas tres propiedades el lenguaje C++ permite mantener ordenado grandes proyectos al utilizar clases, resultando un código más flexible, modular y escalable. Las principales características de C++ son la abstracción, el soporte para programación orientada a objetos y el soporte de plantillas o programación genérica. C++ es un lenguaje híbrido en el que es posible la programación estructurada, la programación genérica y la programación orientada a objetos. También se puede emplear mediante programación basada en eventos para crear programas que usen interfaz grafica de usuario [12]. Entre las ventajas que se consiguen al utilizar C++ se encuentran, la reutilización del código en forma de librerías de usuario, generación de programas más compactos y rápidos. C++ es un lenguaje de programación de propósito general, en el que se puede programar desde sistemas operativos y compiladores, base de datos, procesadores de texto y aplicaciones que resuelvan un problema particular.

2.3.3. Características generales de OpenGL

En 1992 Silicon Graphics presentó Open Graphics Library (OpenGL), una interface de programación de aplicaciones (API) multilenguaje y multiplataforma, que permite el trazado de gráficos de alto rendimiento. OpenGL es un conjunto de primitivas geométricas: puntos, líneas y polígonos, y comandos que actúan sobre estas primitivas y que permiten realizar tareas como sombreado, iluminación y texturizado. Se ha consolidado como la librería por excelencia para desarrollar aplicaciones 2D y 3D con independencia de la plataforma o el hardware gráfico. OpenGL está dividido en varias librerías, cada una de ellas con funcionalidades específicas que facilitan el trabajo de programar. En la Tabla 2.13 se muestran las tres librerías utilizadas para desarrollar gráficos con OpenGL. OpenGL puede ser usado para todo tipo de aplicaciones que necesiten visualización en tiempo real de alto rendimiento y calidad (aplicaciones científicas, médicas, militares, simuladores y videojuegos). Se puede trabajar con él desde diferentes lenguajes como C++, C#, Java y Visual Basic.

Tabla 2.13 Librerías de OpenGL

Librería	Descripción
Librería de OpenGL GL	Integrada por las funciones básicas de OpenGL
OpenGL Utility (GLU)	Compuesta por una serie de funciones de dibujo de alto nivel que, a su vez, se basan en las rutinas primitivas de OpenGL
OpenGL Utility Toolkit (<i>GLUT</i>)	Es una librería de utilidades para programas OpenGL que principalmente proporciona diversas funciones de entrada/salida con el sistema operativo. Entre las funciones que ofrece se incluyen declaración y manejo de ventanas y la interacción por medio de teclado y ratón.

2.4. Varistores

Un varistor (resistor variable) es un dispositivo semiconductor cuya resistencia óhmica $R=R(U)$ disminuye cuando el voltaje que se le aplica aumenta. Estos dispositivos de estado sólido con característica de corriente voltaje no lineal y simétrico (Figura 2.12) [16]. Realizan la función sensar y limitar los sobrevoltajes transitorios. A bajos voltajes el varistor opera como circuito abierto, pero al alcanzar el voltaje de ruptura actúa como componente protector absorbiendo todos los picos mayores a su tensión nominal, mediante el cambio del valor de su resistencia.

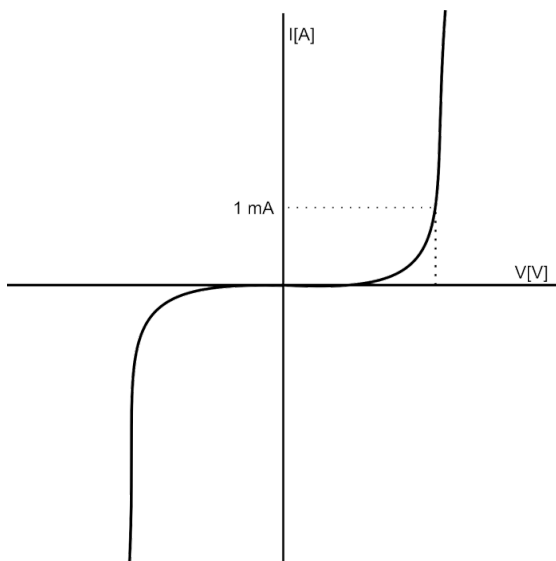


Figura 2.12 Ejemplo de una característica $I(U)$ de un varistor

Las propiedades de los varistores son dependientes de una microestructura generada durante el proceso de fabricación. En el proceso de fabricación se distinguen principalmente tres etapas: incorporación de dopantes al compuesto base, moldeado deseado del material y sinterización (tratamiento térmico en que las partículas del material se unen por calentamiento a una temperatura alta). Para la fabricación de varistores se utilizan materiales óxidos (ZnO , SnO_2 , TiO_2 y otros). El material para varistor presenta una estructura multigrano, compuestas principalmente por granos (elemento básico) y bordes (límites o fronteras) de grano (Figura

2.13). La respuesta eléctrica no lineal de un varistor es semejante a la de dos diodos Zener conectados frente a frente, en cuya interface se establece una barrera de potencial frente a la conducción eléctrica [17]. El límite de grano es posible presentar como dos barrera Schottky (Figura 2.14).

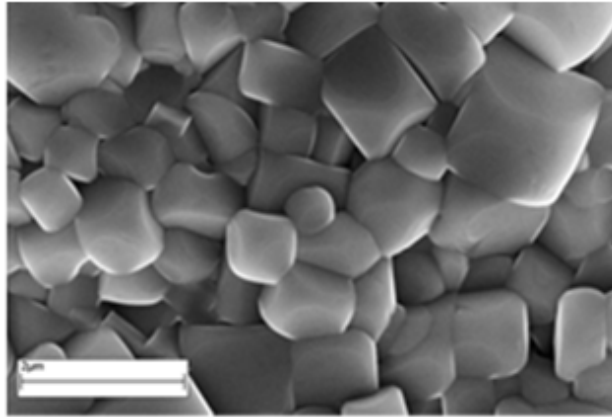


Figura 2.13 Diagrama de la microestructura de un varistor de óxido metálico

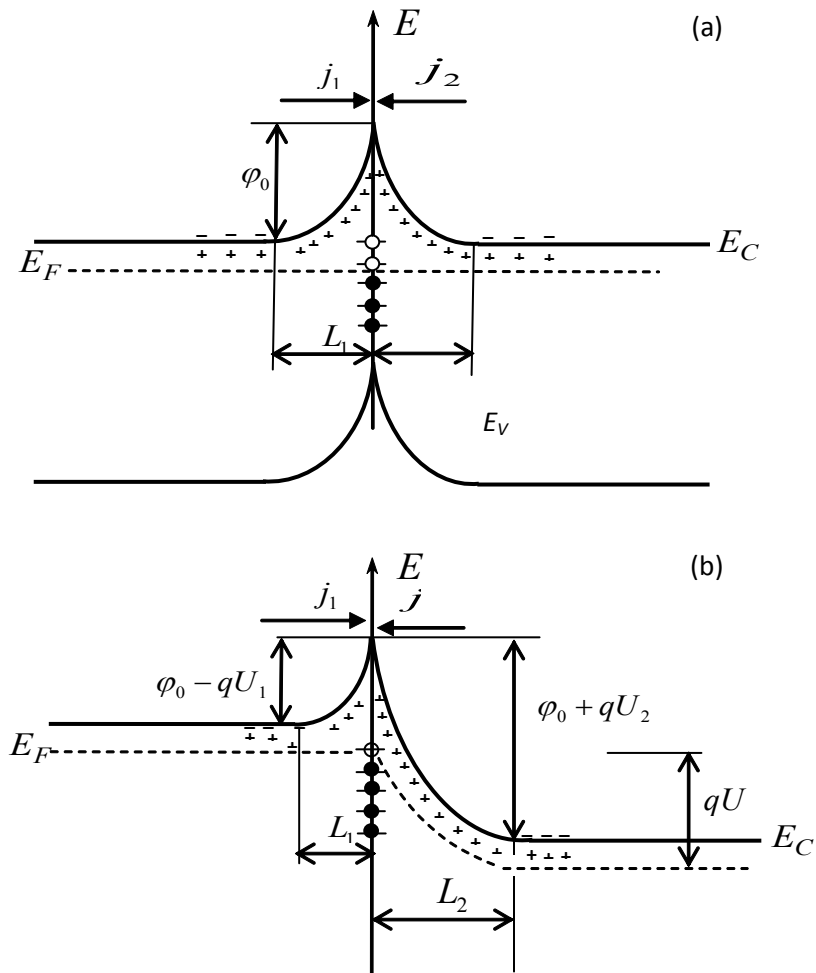


Figura 2.14 Diagrama energético para un borde de grano (a) sin voltaje aplicado (b) con un voltaje U aplicado

El diagrama energético del límite de grano se presenta en la Figura 2.14, ϕ_0 es la altura de la barrera, E_v representa la parte superior de la banda de valencia y E_c simboliza la parte inferior de la banda de conducción. Cada borde de grano equivale a una unión n-p-n, que produce una doble barrera de potencial eléctrico que impide el paso de corriente en ambas direcciones, y las fronteras intergrano realizan la función de controlar la conducción. Normalmente para su fabricación se utilizan ZnO, SnO₂ y TiO₂ como compuestos base para la formación de los varistores, adicionándoles otros óxidos para mejorar su comportamiento eléctrico.

2.4.1. Característica de corriente voltaje

Para un varistor la propiedad más importante es su característica de corriente voltaje (característica I(U)) no lineal. La característica I(U) de un varistor presenta tres regiones: región de pre ruptura, región de ruptura y región de pos ruptura (Figura 2.18). Estas tres regiones muestran las propiedades del varistor:

- a) Región de pre ruptura: región lineal. Se relaciona a densidad de corrientes menores a $10^{-4} A \cdot cm^{-2}$
- b) Región de ruptura es una región no lineal, en la cual el varistor conduce una gran cantidad de corriente con solo un pequeño incremento de voltaje.
- c) Región de pos ruptura es una región de alta corriente (mayor a $10^3 A \cdot cm^{-2}$) que tiene un comportamiento aproximadamente lineal.

En la región de ruptura, se puede expresar una relación entre el voltaje y la corriente:

$$I = BV^\beta \tag{1}$$

donde β representa el coeficiente de no linealidad y cuyo valor puede ser determinado a partir de la pendiente de la característica I(U) [16,17,18] (Figura 2.15).

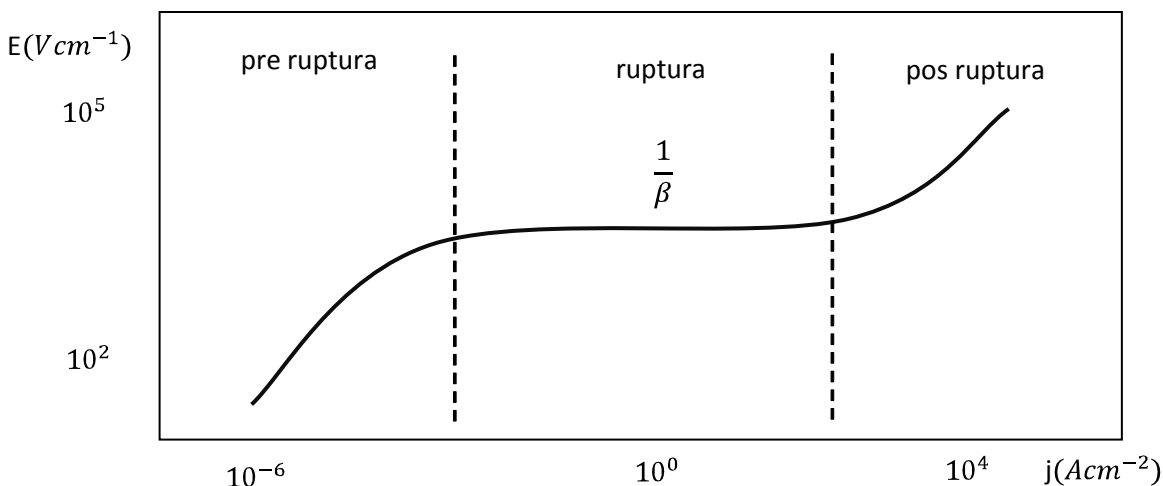


Figura 2.15 Regiones de la característica j(E) de un varistor

El comportamiento de un varistor viene definido por una transición abrupta desde un estado de material prácticamente aislante a un estado casi conductor, para un cierto valor del campo

eléctrico aplicado. La Figura 2.16 es un esquema del circuito equivalente de un varistor.

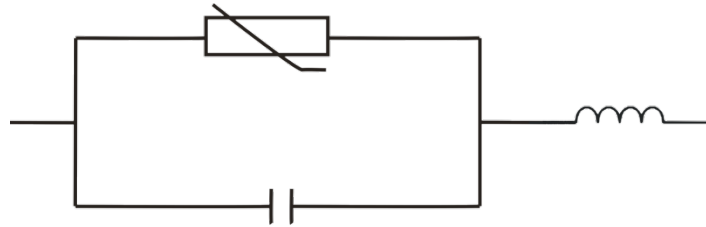


Figura 2.16 Circuito equivalente de un varistor

2.4.2. Parámetros básicos

Un varistor se caracteriza generalmente mediante dos parámetros: el coeficiente de no-linealidad β y el voltaje (frecuentemente a 1mA). En el caso de referirse a materiales para varistores es común usar coeficientes de no linealidad β y E_j , donde E_j está definido a densidad de corriente de $1 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$. El coeficiente de no linealidad se puede definir mediante la expresión:

$$\beta = \frac{R_e}{R_d} \quad (2)$$

Este coeficiente es determinado por los valores de la resistencia estática ($R_e = V/I$) y de la resistencia dinámica ($R_d = dV/dI$). Si sustituimos estas expresiones en la ecuación 2, se obtiene:

$$\beta = \frac{U}{I} \frac{dI}{dU} \quad (3)$$

Si integramos la ecuación diferencial (3), cuando β es constante, se obtiene la ecuación (1). Cuanto más alto es el valor del coeficiente de no linealidad (β) mayor es el efecto de protección en los equipos contra un impulso de sobrevoltaje.

Los parámetros más importantes del varistor son el coeficiente de no linealidad (β), el voltaje (a corriente fija) y la corriente de fuga (a un voltaje pequeño). Estos parámetros son controlados por el tamaño de grano y la naturaleza de los bordes de grano (estructura). Debido a la importancia de la estructura del varistor se han realizado numerosos estudios para mejorarla y obtener un elevado coeficiente de no linealidad. Normalmente para la elaboración de los varistores se usaba como compuesto base ZnO. También se forman en base de SnO_2 y TiO_2 , adicionándoles otros óxidos para mejorar la no linealidad y por lo tanto su comportamiento eléctrico [19].

La energía absorbida de un varistor se relaciona con la corriente mediante la ecuación:

$$W = \int_{t_0}^{t_1} v(t)i(t)dt \quad (4)$$

donde $v(t)$ es el voltaje en el varistor e $i(t)$ es la corriente.

Para determinar la máxima energía de absorción que es capaz de absorber un varistor sin destruirse se utilizan distintas onda impulsivas, tal como, impulso 8/20 μ s, 10/350 μ s, 10/1000 μ s (la industria de supresión de transitorios ha adoptado el documento IEEE C62.41-1991 de la Sociedad de Ingeniería de Potencia del IEEE, con el título “IEEE RECOMMENDED PRACTICE ON SURGE VOLTAGES IN LOW-VOLTAGE AC POWER CIRCUITS” como la norma para someter a pruebas a los supresores de transitorios) [20].

La energía que es capaz de absorber sin destruirse está caracterizada por el tiempo t_2 , en donde la onda vale la mitad de su valor máximo. El tiempo t_2 (Figura 2.17) es el parámetro más importante de una onda impulsiva. Estas ondas impulsivas también son útiles para determinar el tiempo de respuesta. La generación de estas ondas impulsivas se realiza mediante generadores de impulsos de corriente de alto costo.

Una alternativa para determinar la máxima energía de absorción es elegir un impulso rectangular, los resultados serán similares a los que se obtengan con una onda impulsiva y dependerán del tiempo t_2 , con que se caracteriza la duración de la onda impulsiva (el estándar IEC 60060 propone el uso de una onda rectangular de 2ms) [20].

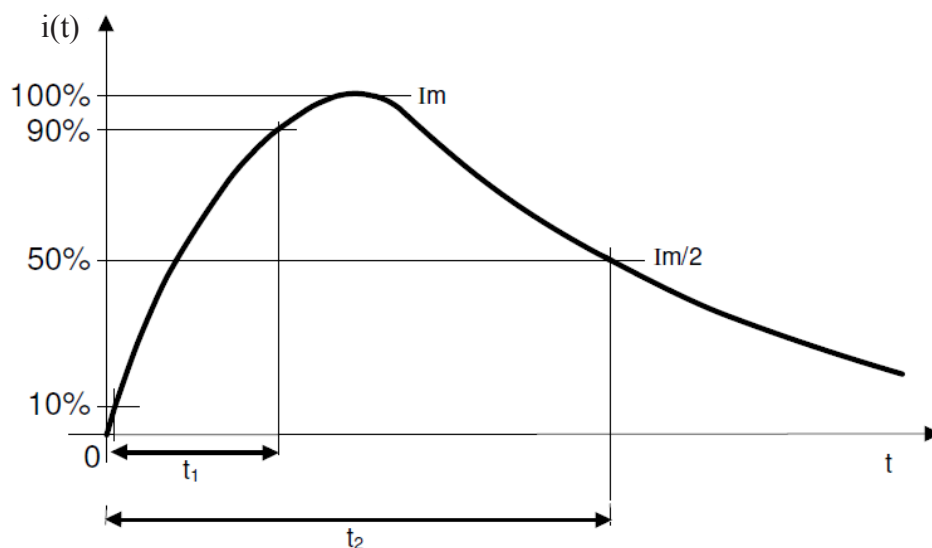


Figura 2.17 Forma típica de una onda impulsiva

2.4.3. Aplicaciones

Debido a que los varistores tienen la capacidad de actuar de distinta forma según el voltaje al que se encuentren sometidos, conmutando de aislante a conductor y regresar a su estado original, estos dispositivos son utilizados como supresores de sobrevoltaje para proteger tanto líneas de transmisión como circuitos electrónicos.

El segundo uso más común de un varistor es como regulador de voltaje. Asimismo se encuentran en circuitos para el control de motores, supresión de ruido y fuentes de poder. Los campos de aplicación de los varistores se muestran en la Figura 2.18. En la actualidad existe una gran cantidad de dispositivos cuya función consiste en proteger los equipos electrónicos sensibles a sobretensiones transitorias. Los supresores de transitorios hechos por diferentes fabricantes utilizan diferentes tecnologías de supresión, como por ejemplo: el selenio, varistores de óxido de metal, diodos supresores de avalancha de silicio, etc.



Figura 2.18 Campos de aplicación de los varistores

Capítulo 3 | DISEÑO DEL PROGRAMA

El programa forma parte de un sistema (Figura 2.5), por lo que interactúa con diversos dispositivos: fuente y unidad de medición Keithley 237 y tarjeta KPCI-488. Para el diseño del programa se descompuso el sistema en componentes para identificar las relaciones y dependencias en el sistema. A continuación se describirán brevemente los componentes y la relación que existirá entre estos:

- 1) **Tarjeta KPCI-488.** La tarjeta KPCI-488, es una tarjeta interface GPIB para bus PCI que permite aprovechar las ventajas de este bus en cuanto a velocidad y «Plug & play». Funciona bajo DOS y WINDOWS a 16 ó 32 bits. Incluyen software completo soportando numerosos lenguajes de alto nivel y herramientas. Las especificaciones que debe cumplir la computadora que aloje a la tarjeta son: sistema operativo Windows, 256 MB RAM (512 MB recomendado) y ranuras para tarjetas. Con esta tarjeta se pueden controlar hasta 14 instrumentos, que utilicen la interfaz IEEE 488.2. Este tipo de tarjetas son ideales para el control de equipo automatizado de prueba en los laboratorios y en la industria.
- 2) **Fuente y unidad de medición Keithley 237.** Cuatro instrumentos en uno (fuente de voltaje, medidor de voltaje, fuente de corriente y medidor de corriente), completamente programable, capaz de generar y medir voltajes o corrientes en forma simultánea. Este es el instrumento a controlar y entre sus características se destaca la posibilidad que tiene de ser controlada mediante la interfaz GPIB.
- 3) **Programa.** El programa tiene por objetivo adquirir datos de la fuente y unidad de medición Keithley 237 para automatizar el sistema de mediciones de corriente voltaje de dispositivos con dos terminales. Para esta tarea cuenta con un subsistema de comunicación y control. El flujo de comunicación que se establece entre la UFM Keithley 237 y la computadora se representa en la Figura 3.1. La comunicación inicia al introducir los parámetros de medición en la interfaz de usuario, los datos obtenidos se envían a la computadora a través del bus GPIB y de la tarjeta KPCI-488. El programa se encarga del envío de comandos a la UFM Keithley 237 para que trabaje simultáneamente como fuente y unidad de medición, en base a los parámetros dados por el usuario.



Figura 3.1 Diagrama a bloques de la comunicación

3.1. Requisitos del programa

De acuerdo al usuario se obtuvo una lista de requisitos. Estos fueron clasificados en requisitos funcionales y no funcionales. Los requisitos funcionales son todos aquellos requisitos dados por el usuario para obtenerse como resultado del programa. Mientras que los requisitos no funcionales son las restricciones que el usuario pidió que el programa tuviera para la seguridad, precisión y manejo de errores. En la Tabla 3.1 se presenta la lista de requisitos funcionales y no funcionales.

Tabla 3.1 Requisitos funcionales y no funcionales del programa

Tipo de requisito	Descripcion
Requisitos Funcionales	
Comunicar la UFM Keithley 237 con la computadora.	El programa debe establecer una comunicación entre la computadora y la UFM Keithley 237 a través de la tarjeta KPCI-488.
Establecer el modo de trabajo de la UFM Keithley 237.	Mediante la interfaz gráfica el usuario podrá elegir la opción del modo de trabajo de Keithley 237; configurándola como fuente de voltaje o como fuente de corriente.
Establecer el tipo de señal.	El usuario debe seleccionar el tipo de señal (escalón o impulso) que desea aplicar a la muestra sujeta a investigación.
Requerir los parámetros de la señal.	El usuario debe configurar la UFM Keithley 237 dando los valores de inicio, paso, fin e I_{max} .
Representar gráficamente la característica I-U.	El programa debe graficar la característica corriente voltaje del dispositivo sujeto a prueba en tiempo de ejecución
Almacenar los datos.	El programa debe guardar los datos de la medición en un archivo.
Entendible.	La interfaz gráfica debe de ser adecuada al usuario.
Mantenible.	Debe de ser posible que el programa evolucione y siga cumpliendo con sus especificaciones.
Requisitos no funcionales	
No aceptar parámetros de la señal fuera del rango.	El programa debe identificar cuándo los valores dados por el usuario no son correctos y mandar un mensaje de error.
No dejar algún valor de voltaje en las terminales del instrumento al terminar la medición.	El programa debe proteger a la muestra sujeta a investigación, al usuario y a la UFM Keithley 237; por lo tanto debe tomar el mayor número de precauciones.
Verificar el equipo.	El usuario debe estar al pendiente de la medición y del equipo; por lo tanto debe verificar el equipo antes de iniciar la medición.
Realizar un zoom.	El programa debe utilizar toda la pantalla para mostrar gráficamente la característica I-U.

3.2. Identificación de la solución

Para desarrollar el programa para la adquisición de datos de la fuente y unidad de medición Keithley 237, se seleccionó como lenguaje de programación C++ utilizando el entorno de desarrollo integrado Microsoft Visual C++, además de la librería de gráficos abierta (OpenGL) y la librería “ieee_32.h” (proporcionada por el fabricante de Keithley 237). Se optó como lenguaje de programación C++ por las siguientes ventajas:

1. Es uno de los tres lenguajes de programación más usados actualmente.
2. La programación se realiza en alto nivel pero con la posibilidad de tener un mayor control de la aplicación y un mejor rendimiento.
3. La compañía Keithley proporciona ejemplos para programar el dispositivo en C++.

3.3. Modelo prescriptivo de proceso

Los modelos prescriptivos de proceso se propusieron originalmente para ordenar el caos del desarrollo de software. Los modelos son “prescriptivos” porque prescriben un conjunto de elementos del proceso (actividades de marco de trabajo, acciones de ingeniería de software, tareas, productos de trabajo, aseguramiento de la calidad, etc.) y el flujo de trabajo. El modelo seleccionado para el desarrollo del programa fue el modelo de cascada, por lo tanto, el proceso empleado para el diseño e implementación del programa se apego lo más posible a las fases del modelo prescriptivo (Figura 3.2).

Se eligió este modelo prescriptivo porque el usuario especificó claramente los requisitos del programa, por lo tanto, el proceso de desarrollo fue secuencial e inicio con la especificación de los requisitos.

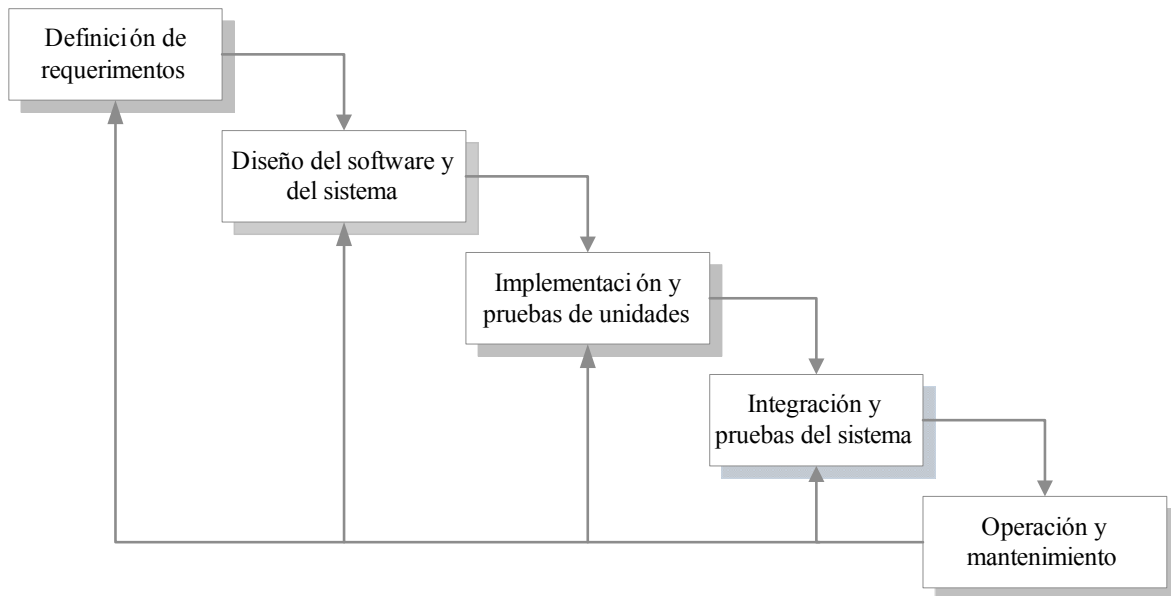


Figura 3.2 Fases del modelo de cascada

3.4. Diseño del programa

En este subcapítulo se presenta el algoritmo, diagrama de flujo del programa y la interfaz de usuario. Se muestran los módulos que componen al programa y se explica la función que realizan.

3.4.1. Diseño modular del programa

El programa para la configuración de la UFM Keithley 237 se integra por módulos diseñados para ejecutar una tarea en particular. Los módulos se dividen en internos y externos. Los bloques externos son aquellos que forman parte de la interfaz gráfica, mientras que los bloques internos realizan tareas transparentes para el usuario relacionadas con la configuración de la UFM Keithley 237. A continuación se especificará la función que desempeñan los módulos del programa y la relación que existe entre ellos, para una mejor comprensión se muestra el diagrama de flujo en la Figura 3.3.

Módulo de entrada de datos: para obtener los datos del usuario se generan menús (Figuras B.1, B.2, B.3 del Apéndice B) que solicitan información para realizar la medición, ésta es:

- 1) Nombre del experimentador,
- 2) Número de muestra,
- 3) Número de medición,
- 4) Comentarios,
- 5) Tipo de señal (escalón o impulso),
- 6) Modo de medición de Keithley 237(fuente de voltaje y medidor de corriente o fuente de corriente y medidor de voltaje),
- 7) Modo de cambio de la señal (“Inicio—Fin—PARAR” o “Inicio—Fin—Inicio”),
- 8) Valor de corriente máximo permitido (I_{max}), y
- 9) Valores de inicio, paso, tiempo de impulso (t_i), tiempo de pausa (t_p), y fin de la señal seleccionada.

Los valores introducidos por el usuario para la configuración de la UFM Keithley 237 deben de ser correctos para que el programa continúe. Si los datos introducidos son correctos y el usuario pulsa el botón de “Siguiente” se muestra un menú de verificación de datos (Figura B.4.).

Módulo de verificación de datos: el bloque de verificación es un resumen de los datos proporcionados por el usuario para realizar la medición. En este menú (Figura B.4.) se muestran los valores configurados anteriormente. En este paso se puede seleccionar la opción de reconfigurar para cambiar algún valor o parámetro de la medición, en caso contrario, si se pulsa el botón de siguiente se realizará la tarea de construir y enviar comandos a la UFM Keithley 237 mediante el bloque interno “Construcción y envío de los comandos para Keithley 237” (Figura 3.3).

Construcción y envío de los comandos para Keithley 237: este módulo se encarga de modificar los comandos básicos de lenguaje de alto nivel para la UFM Keithley 237 y enviarlos a la UFM Keithley 237 de acuerdo a la configuración de la medición hecha por el usuario (Figura 3.3).

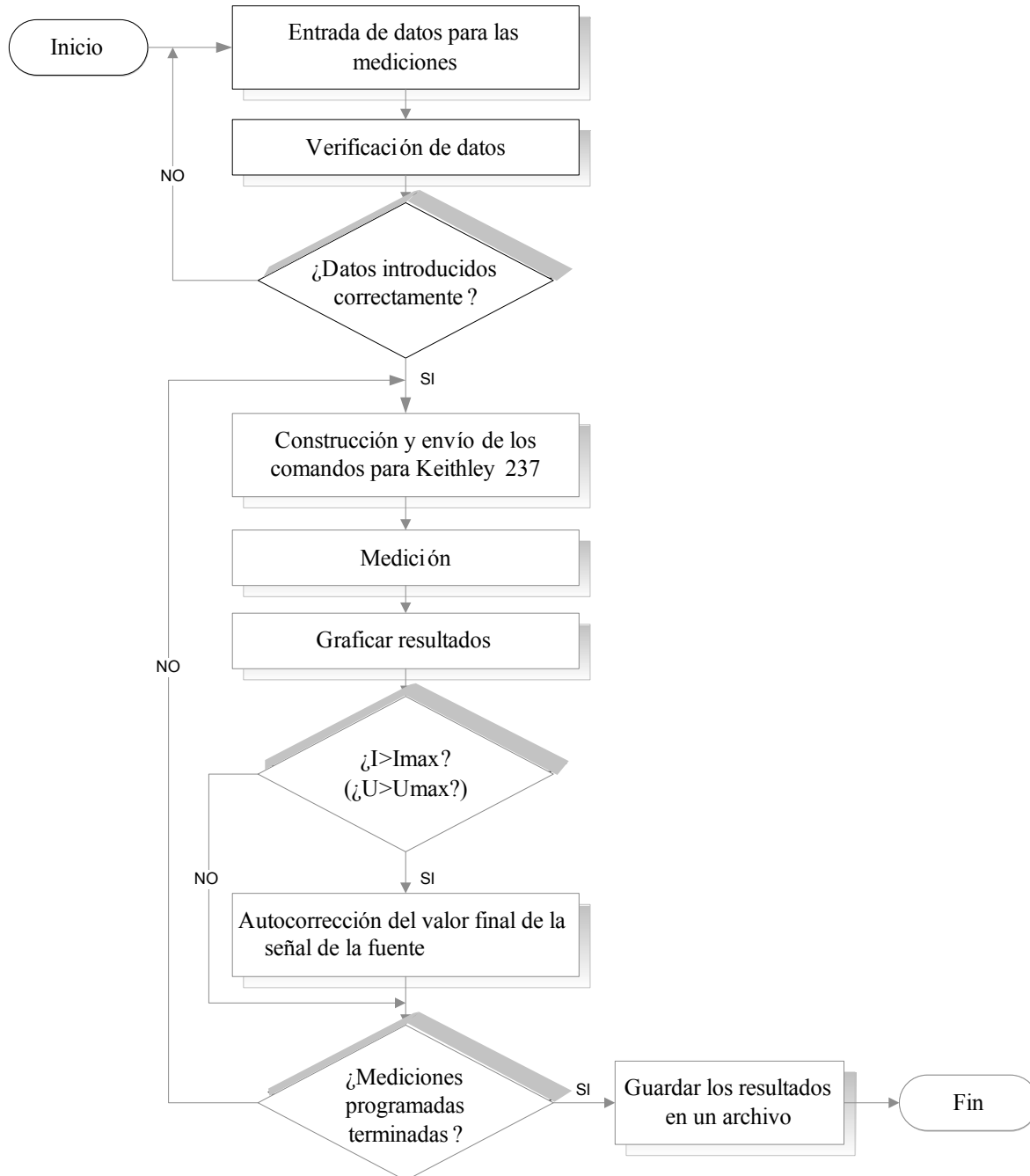


Figura 3.3 Diagrama de flujo del programa. Donde I es la corriente actual e Imax es la corriente máxima seleccionada por el usuario. U es el voltaje actual y Umax es el voltaje máxima permitido.

Medición: una vez que Keithley 237 está configurada con el valor de voltaje o corriente de acuerdo al bloque de Construcción y envió de los comandos para Keithley 237 se realiza una medición (Figura 3.3).

Gráfica de resultados: este bloque grafica el resultado de la medición en tiempo ejecución. Después se verifica la condición $I > I_{max}$ (cuando se configura en el modo de trabajo “fuente de voltaje”) o $U > U_{max}$ (cuando se configura en el modo de trabajo “fuente de corriente”) (I es la corriente actual, I_{max} es la corriente máxima permitida, V es el voltaje actual, V_{max} es el voltaje máximo permitido).

Si esta condición no se cumple el programa verifica si ya se cumplió con el número total de mediciones programadas.

Si no se ha alcanzado el número total de mediciones programadas se regresa al bloque de “Construcción y envío de los comandos para Keithley 237”.

Cuando se cumple con el número total de mediciones programadas se guardan los resultados en un archivo y termina el programa.

En caso de que la condición $I > I_{max}$ (o $U > U_{max}$) se cumpla el programa ejecuta el modulo de “Autocorrección del valor final de la señal de la fuente programado”, enseguida verifica si ya se cumplió con el número total de mediciones programadas.

Autocorrección del valor final de la señal de la fuente: este modulo se ejecuta cuando la corriente actual es mayor o igual a la corriente máxima permitida. En este modulo se hace un ajuste del valor final de la señal de acuerdo al modo de cambio de señal seleccionado.

Generación de archivo: este bloque guarda los valores obtenidos de la medición (resultados del bloque Medición) en un archivo .txt.

La interfaz de usuario del programa desarrollado es sencilla de usar y se integra por menús emergentes para obtener los datos necesarios para configurar la UFM Keithley 237 (ver apéndice B).

3.4.2. Diseño de los módulos para la construcción y envío de comandos para Keithley 237

Para el diseño y programación de los módulos que configuran la UFM Keithley 237 se usaron tres comandos básicos (Tabla 3.2). Estos tres comandos son suficientes para crear cualquier tipo de programa para el control de instrumentos. A continuación se presentan los algoritmos base usados para la construcción de los módulos que usan los comandos GPIB propias del instrumento UFM Keithley 237.

Tabla 3.2 Comandos básicos de lenguajes de alto nivel usadas para programar la UFM Keithley 237

Comandos básicos	Descripción
INITIALIZE	Inicialización del sistema. Este comando hace uso de dos parámetros <i>my.address</i> , <i>level</i> . El primer parámetro, <i>my.address</i> , es un entero en el rango de 0 a 30 y <i>level</i> puede adoptar el valor de cero cuando se desea inicializar un controlador y el valor de 2 cuando se trata de un dispositivo. INITIALIZE (my.address,level)
SEND	Envío de datos. Cuenta con tres parámetros. El primer parámetro es <i>address</i> y sirve para indicar la dirección del dispositivo destino. El segundo parámetro es <i>info</i> y se trata de la cadena que va a ser enviada, el último parámetro es <i>status</i> , que sirve para indicar que la transferencia fue correcta. SEND (address,info,status)

Tabla 3.2 (continuación)	
ENTER	<p>La rutina ENTER sirve para leer desde un dispositivo. Formada por 5 parámetros. El parámetro <i>recv</i> es una cadena variable que contiene los datos recibidos. El segundo parámetro es <i>maxlength</i>, es un valor que especifica el número máximo de caracteres que desea recibir, <i>length</i> contendrá el número real de caracteres recibidos, <i>address</i> es la dirección del dispositivo a leer, y el <i>status</i> que indica que la transferencia se realizó de forma correcta.</p> <p style="text-align: center;">ENTER (recv,maxlength,length,address,status)</p>

Para inicializar el sistema y configurar la UFM Keithley 237 como fuente de voltaje se realizan los pasos mostrados en la Figura 3.4. Primero se inicializa la tarjeta de adquisición de datos. Después se acondiciona el equipo para iniciar las mediciones y por último se configura la UFM Keithley 237 como fuente de voltaje. En la Tabla 3.3 se especifican los parámetros usados para la secuencia de comandos mostrados en la Figura 3.4. Siguiendo la ideología (Figura 3.4) se puede inicializar el sistema y configurar la UFM Keithley 237 como fuente de corriente enviando el parámetro "F1, 0X" en el último comando.

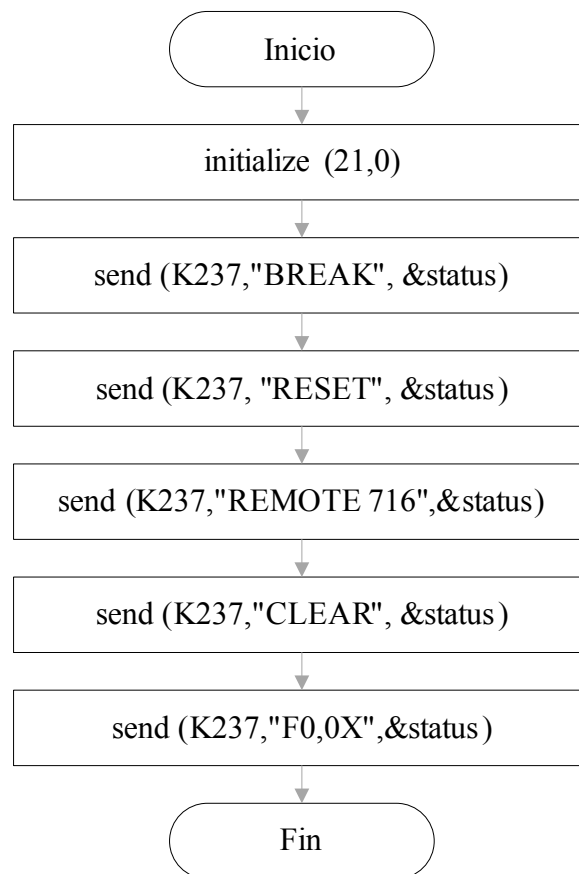


Figura 3.4 Secuencia de comandos para inicializar el sistema y configurar la UFM Keithley 237 como fuente de voltaje

Tabla 3.3 Parámetros usados para configurar la UFM Keithley 237 como fuente de voltaje

Parámetro	Descripción
K237	Dirección GPIB del equipo.
&status	Indica si la transferencia se realizó correctamente.
F0,0X	Parámetro para configurar la UFM Keithley 237 como fuente de voltaje.

Para configurar la UFM Keithley 237 y que entregue en sus terminales un voltaje con la forma de una señal tipo escalón se siguen los pasos mostrados en la Figura 3.5. En la Tabla 3.4 se especifican los parámetros a los que se hace referencia en los comandos usados. Durante este tipo de procesos es importante verificar que la transferencia de datos se realice correctamente esto se puede hacer con el monitoreo del parámetro &status.

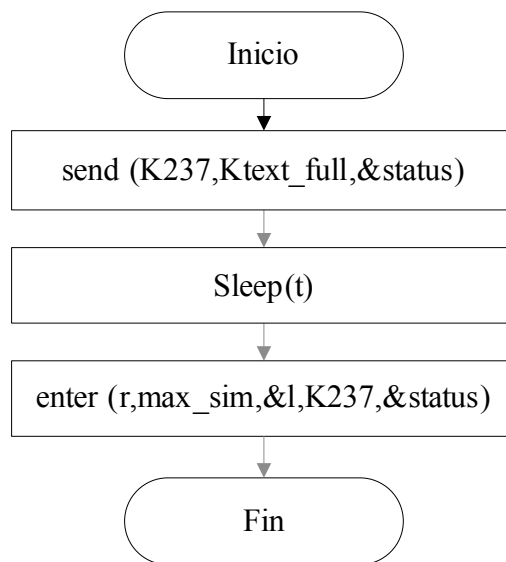


Figura 3.5 Secuencia de comandos para configurar la UFM Keithley 237 como una señal tipo escalón

Tabla 3.4 Parámetros usados para configurar la UFM Keithley 237 como señal tipo escalón

Parámetro	Descripción
K237	Dirección GPIB del equipo.
&status	Indica si la transferencia se realizó correctamente.
Ktext_full	Datos: parámetros de señal y modo de trabajo de Keithley 237.
max_sim	Especifica el número máximo de caracteres.
&l	Contiene el número real de caracteres recibidos.
r	Contiene los resultados de la medición en forma de texto.

Para configurar la UFM Keithley 237 y que entregue en sus terminales un voltaje con la forma de una señal tipo impulso se deben seguir los pasos mostrados en la Figura 3.6. En la Tabla 3.4 se especifican los parámetros que deben usarse para configurar Keithley 237 como una señal tipo impulso.

No se detallan las demás secuencias de comandos porque siguen la misma ideología y emplean los mismos comandos básicos de las ya presentadas.

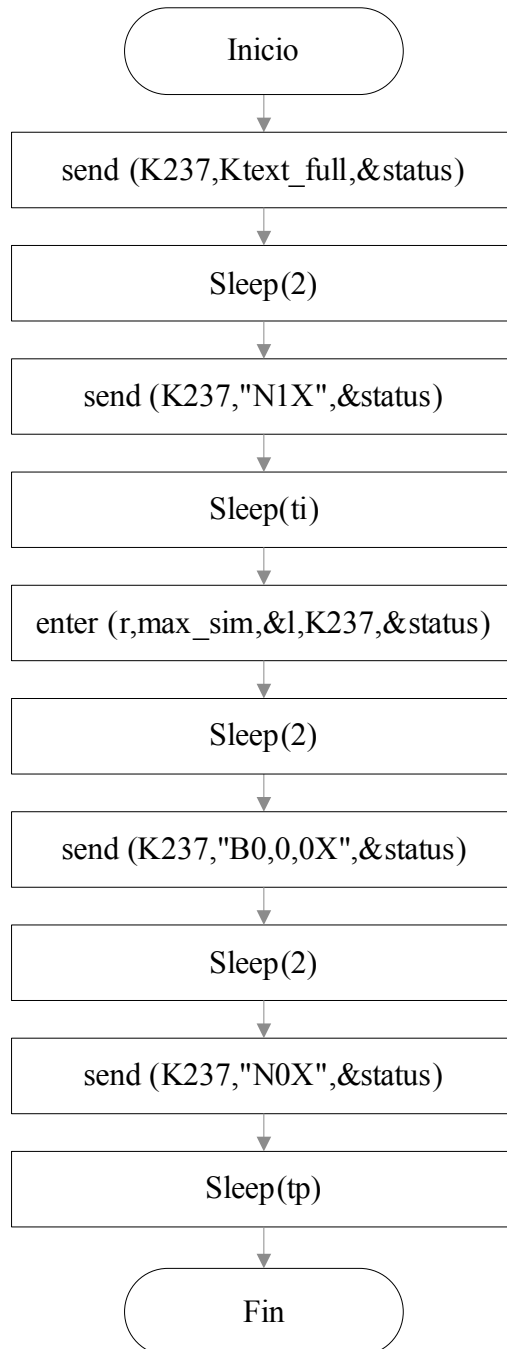


Figura 3.6 Secuencia de comandos para configurar la UFM Keithley 237 como una señal tipo impulso

Tabla 3.5 Parámetros usados para configurar la UFM Keithley 237 como señal tipo impulso

Parámetro	Descripción
K237	Dirección GPIB del equipo.
Ktext_full	Datos: parámetros de señal y modo de trabajo de Keithley 237.
B0,0,0X	Parámetro para establecer el voltaje a 0V.
r	Contiene los resultados de la medición en forma de texto.
max_sim	Especifica el número máximo de caracteres.
length	Contiene el número real de caracteres recibidos.
&status	Indica si la transferencia se realizó correctamente.
N1X	Activación del voltaje en las terminales.
N0X	Apagado del voltaje en las terminales.
ti	Tiempo de impulso.
tp	Tiempo de pausa.

3.5. Generalidades de los modos de medición

Los modos de medición son las distintas formas en que se puede configurar la UFM Keithley 237, esto es: como fuente de voltaje y medidor de corriente o como fuente de corriente y medidor de voltaje. Seleccionar el modo adecuado de medición es vital para obtener los resultados esperados de la medición. A partir de esta elección se piden los parámetros para la configuración del equipo. Por todo lo anterior es necesario abordar el tema.

3.5.1. Fuente de voltaje

En este modo de medición la fuente proporciona un voltaje a la carga externa y mide la corriente que circula a través de ella. Cuando la UFM Keithley 237 se configura como fuente de voltaje (en el rango de $\pm 100\mu\text{V}$ a $\pm 1100\text{V}$) es posible aplicar las señales de voltaje mostradas en las Figuras 3.7 y 3.8. Una de las señales de voltaje tiene la forma de onda de un escalón (Figura 3.7), cuando se utiliza esta señal se debe configurar el voltaje de inicio, voltaje final, el paso de voltaje (Δx) y el tiempo que debe durar un voltaje dado. Por otra parte la Figura 3.8 es una señal de impulsos, útil para conocer el comportamiento del varistor sin sobrecalentamiento. Con este tipo de señales (escalón e impulso) se trata de evitar el sobrecalentamiento de las muestras sujetas a investigación, para obtener la característica de corriente voltaje lo más exacta posible. La importancia de configurar la UFM Keithley 237 como fuente de voltaje radica en el estudio de dispositivos electrónicos con una característica corriente voltaje como la mostrada en la Figura 3.9, en este caso la corriente disminuye con el voltaje y es necesario usar la fuente de voltaje. Si se fija un valor de voltaje se puede medir corriente pero si se configura como fuente

de corriente y se fijan los valores de corriente se pueden obtener diversos valores de voltaje y obtener incertidumbre en la medición.

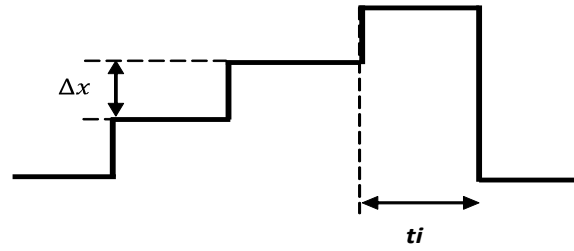


Figura 3.7 Forma de la señal (voltaje V(t) o corriente I(t)) tipo escalón

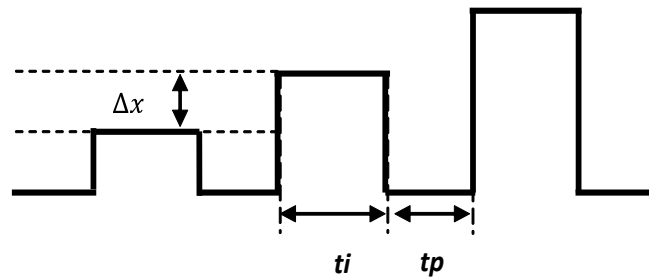


Figura 3.8 Forma de la señal (voltaje V(t) o corriente I(t)) tipo impulso

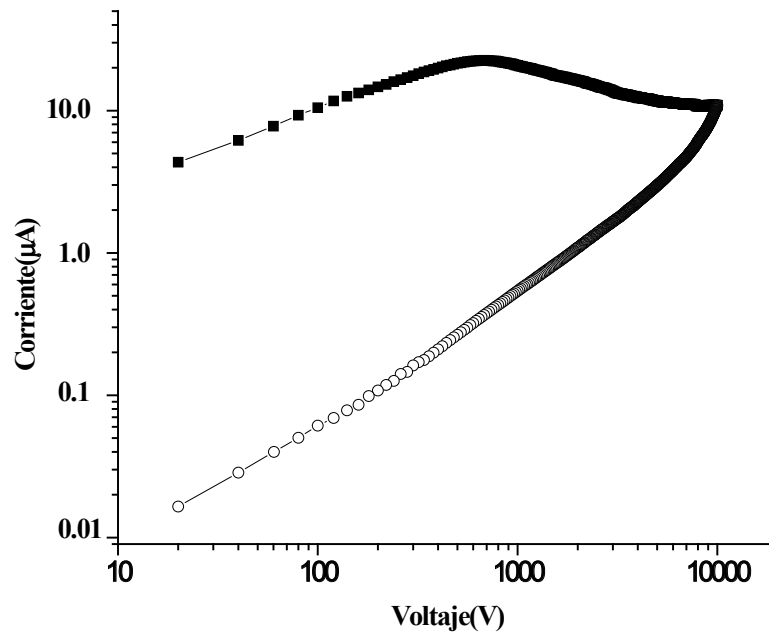


Figura 3.9 Característica corriente voltaje de una muestra medida en modo “fuente de voltaje y medidor de corriente”

3.5.2. Fuente de corriente

En este modo de medición la fuente proporciona corriente a la carga externa y mide el voltaje en las terminales. Este régimen de medición es útil debido a que los cambios del comportamiento de las muestras son desconocidos. Algunas muestras presentan un comportamiento como el mostrado en la figura 3.10.

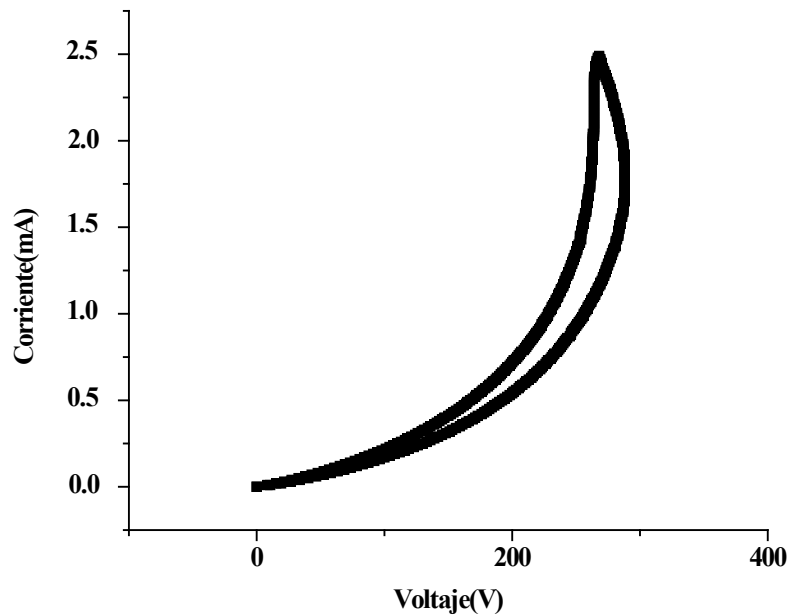


Figura 3.10 Característica corriente voltaje de una muestra (con resistencia diferencial negativa) medida como “fuente de corriente y medidor de voltaje”

Muestras con conducta “diferente” (Figura 3.10) es mejor caracterizarlas teniendo a la UFM Keithley 237 como fuente de corriente, debido a que a un determinado valor de voltaje la corriente puede cambiar abruptamente al punto de dañar la muestra o al equipo de medición. Para este tipo de régimen es posible aplicar las señales mostradas en las Figuras 3.7 y 3.8.

Capítulo 4 | PRUEBAS

El objetivo de esta etapa consistió en comprobar el funcionamiento del programa de acuerdo con las especificaciones y a los requisitos del usuario. El capítulo considera las pruebas que se realizaron para comprobar el correcto funcionamiento del equipo y del programa. Debido a la importancia que tienen las pruebas en este trabajo de tesis se siguieron las fases del ciclo de pruebas que se muestra en la Figura 4.1. Durante el capítulo se enfatiza en las pruebas funcionales debido a que a partir de ellas se realizó una investigación.

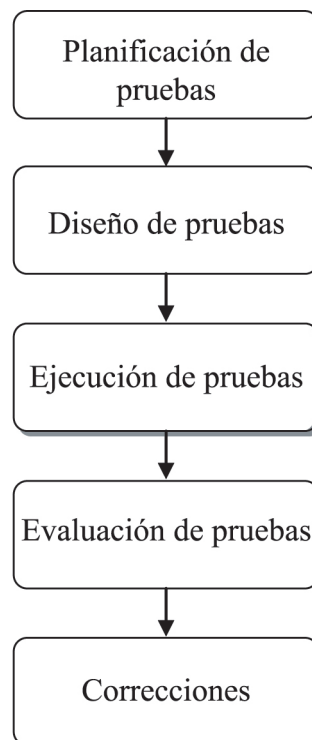


Figura 4.1 Ciclo de pruebas

4.1 Pruebas aplicadas al hardware

Para comprobar el correcto funcionamiento de la UFM Keithley 237 en forma remota se realizaron una serie de pruebas usando la herramienta TRTest (ver apéndice C). TRTest es una aplicación para control GPIB diseñada por la compañía CEC (Capital Equipment Corporation). Con TRTest se verificó la comunicación entre la computadora y el equipo.

4.2. Pruebas aplicadas al programa

4.2.1. Pruebas de caja blanca

En este apartado se realizaron pruebas sobre las funciones internas de los módulos que componen el programa. En el apéndice D se describe el proceso que se llevó a cabo para efectuar las pruebas estructurales al código.

4.2.2. Pruebas de caja negra

Después se verificó la relación entrada salida de los módulos que componen el programa. Se introdujeron todas las posibles opciones que pueden ser elegidas; con el objetivo de conocer la respuesta de las funciones internas. Se enviaron diferentes valores de entrada y se compararon con las salidas esperadas.

Durante este tipo de pruebas se verificó el funcionamiento de:

1. La interfaz de usuario, se verificó que los datos proporcionados fueran correctamente validados y aceptados por el programa.
2. Se verificaron las funciones que usan comandos básicos de lenguaje de alto nivel para programar la UFM Keithley 237. Se ejecutó el programa y se verificó que Keithley 237 respondiera de acuerdo a la instrucción.
3. Se verificó el módulo para crear la gráfica del resultado de la medición en tiempo ejecución y el módulo de aproximación del coeficiente de no linealidad.
4. Se realizó la verificación de la creación de archivo.

El segundo bloque de pruebas consistió en obtener la característica de corriente voltaje de diferentes componentes electrónicos (Tabla 4.1), con el objetivo de evaluar lo que es capaz de hacer el programa y su funcionalidad.

Tabla 4.1 Lista de componentes eléctricos caracterizados en la etapa de pruebas

Tipo de dispositivo	Nomenclatura	Descripción	Figura
Resistor	5.6Ω	Resistor de 5.6Ω, 1W	4.2
Resistor	1.0KΩ	Resistor de $1.0 \cdot 10^3 \Omega$, 0.5W	4.3
Resistor	68.0KΩ	Resistor de $6.8 \cdot 10^4 \Omega$, 0.5W	4.4
Diodo	1N4002	Diodo de silicio estándar. 1A,100V	4.5 4.6
Diodo zener	1N4728A	Diode zener. 1W, 3.3V	4.7 4.9
Varistor	S14K14	Varistor en base de ZnO	4.10
Varistor	S20K14	Varistor en base de ZnO	4.14
Varistor	Positron	Varistor en base de ZnO	4.17
Varistor	F3P2-1350	Varistor en base de SnO ₂	5.1
Varistor	SG-17A	Varistor en base de SnO ₂	5.3

4.2.2.1. Resistores

El primer componente caracterizado fue un resistor lineal, debido a que su respuesta de corriente voltaje es comprobable al tener un voltaje directamente proporcional a la corriente que fluye a través de él. Usando el programa se configuró la UFM Keithley 237 con los parámetros mostrados en la Tabla 4.2, enseguida se iniciaron las mediciones de forma remota y se mostró en tiempo real la característica I(U) del resistor. La característica corriente voltaje generada por el programa se muestra en la Figura 4.2.

Tabla 4.2 Configuración de la UFM Keithley 237 para la caracterización del resistor de 5.6Ω

Parámetros de medición	Valores	Comentario
Modo de medición	Fuente de voltaje y medidor de corriente	
Tipo de señal	Impulso	Fig. 3.8
Modo de cambio de la señal	Inicio-Fin-Inicio	
Valor de corriente máximo permitido (I_{max})	$1 \cdot 10^{-3} A$	
Valor de inicio	$0V$	
Valor final	$6 \cdot 10^{-3} V$	
Valor de paso	$0.1 \cdot 10^{-3} V$	
Tiempo de impulso (t_i)	$100 \cdot 10^{-3} s$	
Tiempo de pausa (t_p)	$100 \cdot 10^{-3} s$	

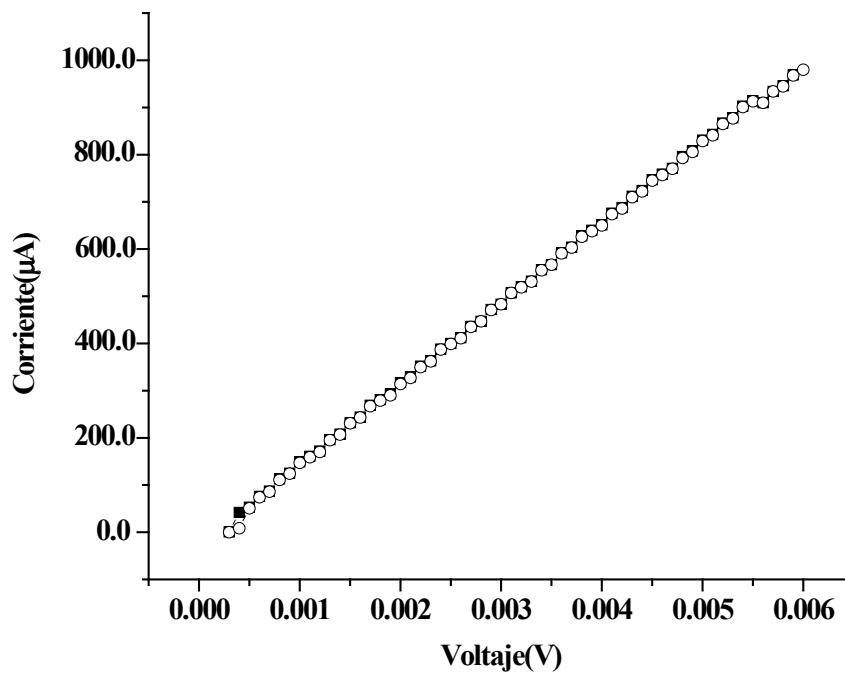


Figura 4.2 Característica corriente voltaje del resistor de 5.6Ω

Los cuadros negros son los resultados de la medición hecha de inicio a fin (incrementando voltaje) y los círculos blancos son el resultado de la medición realizada de fin a inicio (decrementando voltaje). La característica I(U) correspondiente es una línea recta; al determinar el valor de la pendiente de la recta de la Figura 4.2 se obtiene el valor del resistor medido que es aproximadamente igual al valor nominal de la muestra estudiada (5.6Ω) lo que demuestra que el resistor se caracterizó correctamente.

Enseguida se configuró la UFM Keithley 237 de acuerdo al valor nominal y a la potencia del resistor de $1.0 \cdot 10^3 \Omega$ (Tabla 4.3), se obtuvo la característica I (U) mostrada en la Figura 4.3.

Tabla 4.3 Configuración de la UFM Keithley 237 para la caracterización del resistor de $1.0 \cdot 10^3 \Omega$

Parámetros de medición	Valores
Modo de medición	Fuente de voltaje y medidor de corriente
Tipo de señal	Impulso
Modo de cambio de la señal	Inicio-Fin-Inicio
Valor de corriente máximo permitido (I_{max})	$1 \cdot 10^{-3} A$
Valor de inicio	$0V$
Valor final	$2V$
Valor de paso	$10 \cdot 10^{-3} V$
Tiempo de impulso (t_v)	$100 \cdot 10^{-3} s$
Tiempo de pausa (t_p)	$100 \cdot 10^{-3} s$

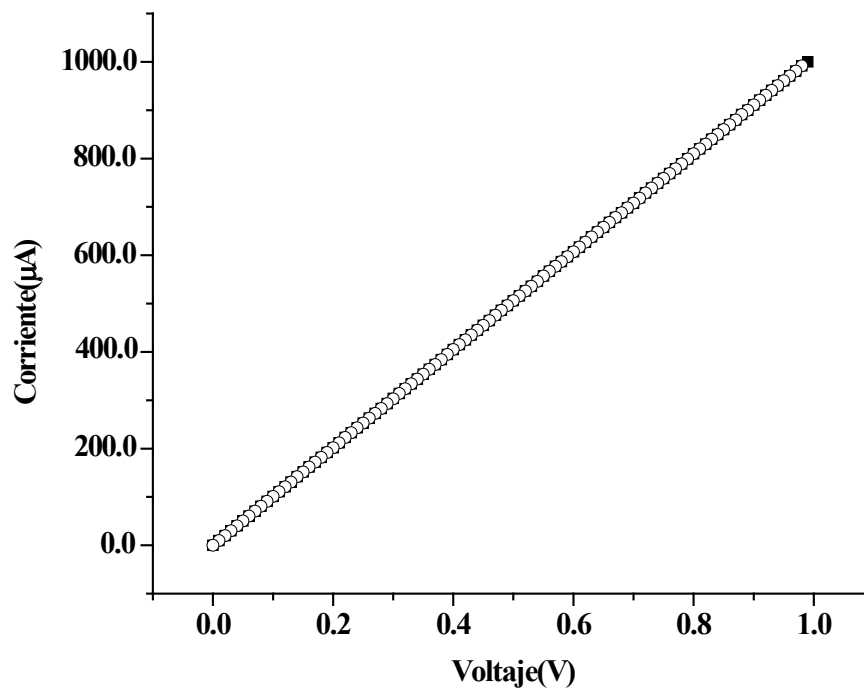


Figura 4.3 Característica corriente voltaje del resistor de $1.0 \cdot 10^3 \Omega$

Durante la medición el programa detuvo el proceso de aplicar voltaje y medir corriente ocasionando no alcanzar el valor final de voltaje configurado ($2V$). Esto se debe a que valor de corriente máximo permitido ($1mA$) se alcanzó antes ($1V$) (Figura 4.3). Comprobando la protección que el programa ofrece a las muestras al no medir y aplicar voltaje una vez que se alcanza el valor configurado de I_{max} .

Por último se caracterizó un resistor con un valor nominal mayor ($6.8 \cdot 10^4 \Omega$). Se configuró el equipo de acuerdo a la Tabla 4.4. El valor final dado fue de $100V$ para comprobar el funcionamiento del programa en un rango de voltaje mayor en comparación al de las mediciones anteriores. El resultado es una característica de corriente voltaje que pasaba por el origen y que tiene una pendiente de 66.6 (Figura 4.4).

Tabla 4.4 Configuración de la UFM Keithley 237 para la caracterización del resistor de $68.0 \cdot 10^3 \Omega$

Parámetros de medición	Valores
Modo de medición	Fuente de voltaje y medidor de corriente
Tipo de señal	Impulso
Modo de cambio de la señal	Inicio-Fin-Inicio
Valor de corriente máximo permitido (I_{max})	$1 \cdot 10^{-3} A$
Valor de inicio	$0V$
Valor final	$100V$
Valor de paso	$0.5V$
Tiempo de impulso (t_i)	$100 \cdot 10^{-3} s$
Tiempo de pausa (t_p)	$100 \cdot 10^{-3} s$

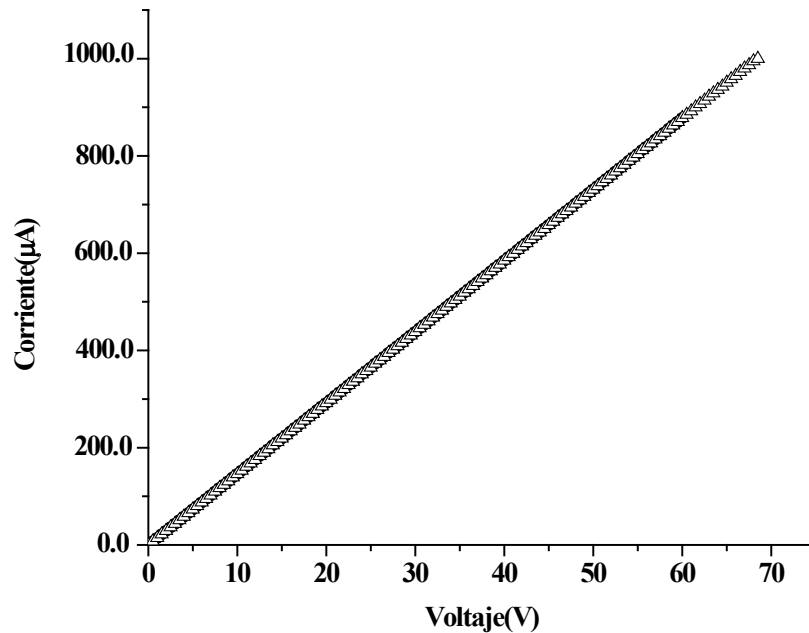


Figura 4.4 Característica corriente voltaje del resistor de $6.80 \cdot 10^4 \Omega$

Al terminar con las mediciones de los resistores se confirmó que el programa funciona correctamente con este tipo de dispositivos al coincidir el valor de la pendiente de la característica I (U) obtenida con el valor nominal del resistor.

4.2.2.2. Diodos

El siguiente dispositivo caracterizado fue un diodo. Dispositivo semiconductor con característica de corriente voltaje no lineal; cuyo funcionamiento es parecido a un interruptor que solo pasa corriente en una dirección y cuya característica I(U) puede ser comprobada mediante la hoja de especificaciones correspondiente. Se caracterizó el diodo 1N4002 configurando la UFM Keithley 237 como se muestra en la Tabla 4.5. El diodo se conectó polarizado directamente (positivo), el resultado se presenta en la Figura 4.5, el incremento de corriente está dado en mA y la escala para el voltaje está en décimas de volts (cambio característico en los diodos polarizados positivamente). Enseguida se aplicó voltaje negativo en las terminales del diodo como se muestra en la Tabla 4.6 y se obtuvo la respuesta mostrada en la Figura 4.6. Para la caracterización del diodo en su región de polarización inversa se utilizó la propiedad del sistema de proporcionar valores negativos de voltaje o corriente, por lo que no fue necesario cambiar la polaridad del diodo.

Tabla 4.5 Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición el diodo 1N4002. Voltaje directo

Parámetros de medición	Valores
Modo de medición	Fuente de voltaje y medidor de corriente
Tipo de señal	Impulso
Modo de cambio de la señal	Inicio-Fin-Inicio
Valor de corriente máximo permitido (I_{max})	$1 \cdot 10^{-3} A$
Valor de inicio	$0V$
Valor final	$100V$
Valor de paso	$0.5V$
Tiempo de impulso (t_i)	$100 \cdot 10^{-3}s$
Tiempo de pausa (t_p)	$100 \cdot 10^{-3}s$

Tabla 4.6 Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición el diodo 1N4002. Voltaje reverso

Parámetros	Valores
Modo de medición	Fuente de voltaje y medidor de corriente
Tipo de señal	Impulso
Modo de cambio de la señal	Inicio-Fin-Inicio
Valor de corriente máximo permitido (I_{max})	$-1 \cdot 10^{-3} A$
Valor de inicio	$0V$
Valor final	$-50V$
Valor de paso	$-0.5V$
Tiempo de impulso (t_i)	$100 \cdot 10^{-3}s$
Tiempo de pausa (t_p)	$100 \cdot 10^{-3}s$

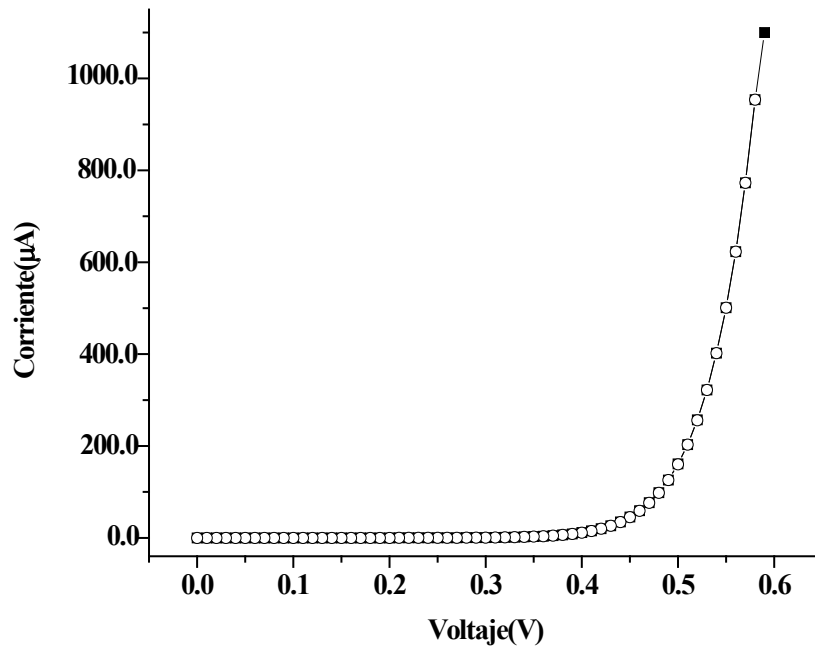


Figura 4.5 Característica corriente voltaje del diodo 1N4002. Modo de medición: fuente de voltaje y medidor de corriente. Voltaje directo

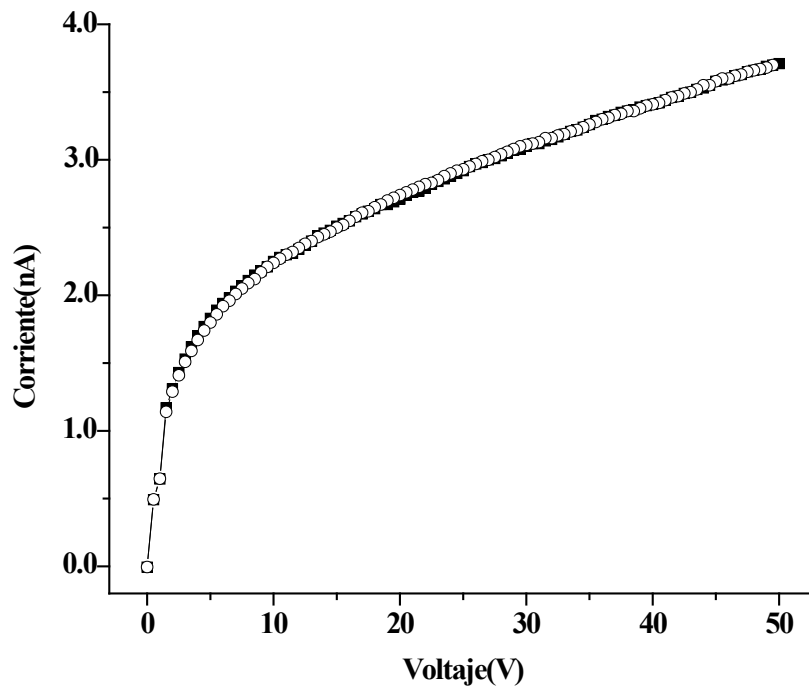


Figura 4.6 Característica corriente voltaje del diodo 1N4002. Modo de medición: fuente de voltaje y medidor de corriente. Voltaje reverso

Es importante observar que el eje de la corriente se mide en nanoamperes y el eje del voltaje incrementa en decenas de volts. En resumen las características de corriente voltaje obtenidas al polarizar directamente e inversamente el diodo 1N4002 coinciden con la respuesta de este tipo de dispositivos al encontrarse dentro del rango (apéndice E).

El siguiente dispositivo caracterizado fue un tipo de diodo especial, el diodo Zener. Este tipo de diodos se caracteriza por trabajar en la región inversa del diodo. Se emplean para producir entre sus extremos un voltaje constante e independiente de la corriente que atraviesa por sus terminales. Para probar el programa se usó el diodo Zener 1N4728A configurando la UFM Keithley 237 como se muestra en la Tabla 4.7. El diodo 1N4728A se conectó de forma aleatoria; el resultado de la medición se muestra en la Figura 4.7.

Tabla 4.7 Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del diodo Zener 1N4728A. Voltaje directo

Parámetros de medición	Valores
Modo de medición	Fuente de voltaje y medidor de corriente
Tipo de señal	Impulso
Modo de cambio de la señal	Inicio-Fin
Valor de corriente máximo permitido (I_{max})	$15 \cdot 10^{-6} A$
Valor de inicio	$0V$
Valor final	$1V$
Valor de paso	$0.01V$
Tiempo de impulso (t_v)	$100 \cdot 10^{-3}s$
Tiempo de pausa (t_p)	$100 \cdot 10^{-3}s$

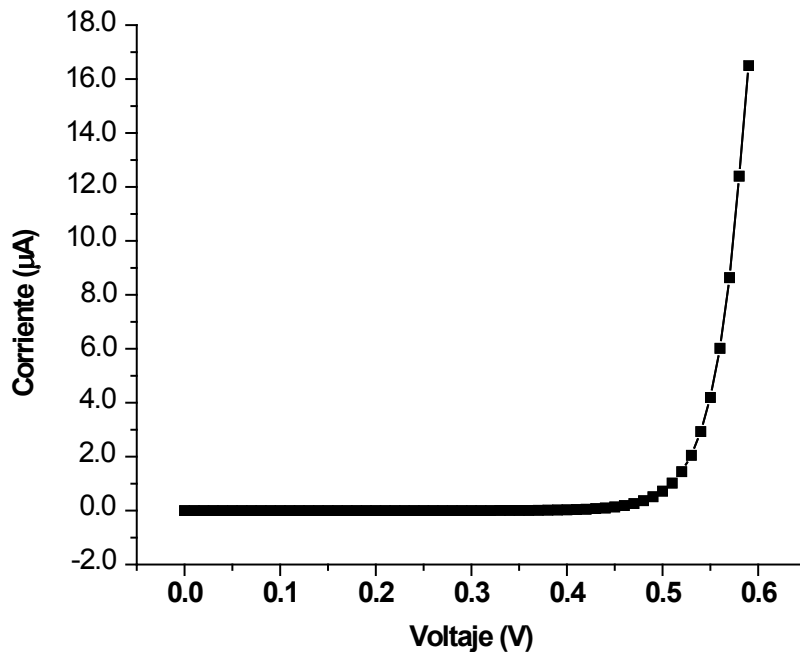


Figura 4.7 Característica corriente voltaje del diodo 1N4728A. Modo de medición: fuente de voltaje y medidor de corriente. Voltaje directo

A partir de la Figura 4.7 se afirma que el diodo se encuentra polarizado directamente, debido a que su comportamiento es semejante a cualquier diodo de silicio rectificador, al permanecer con un voltaje en sus terminales cercano al rango de 0.6 a 0.7V sin importar la corriente que circule por él. Enseguida se polarizó inversamente el diodo Zener configurando la UFM Keithley 237 como se muestra en la Tabla 4.8 y se obtuvo la característica I(U) mostrada en la Figura 4.8. Este resultado no es el esperado para la respuesta del diodo polarizado inversamente. Durante la medición se observó un voltaje no constante y un salto brusco de corriente que al alcanzar el valor de I_{max} detuvo la caracterización del dispositivo (como se muestra en la Figura 4.8). Debido a los resultados obtenidos se cambió el modo de trabajo de fuente de voltaje y medidor de corriente a fuente de corriente y medidor de voltaje.

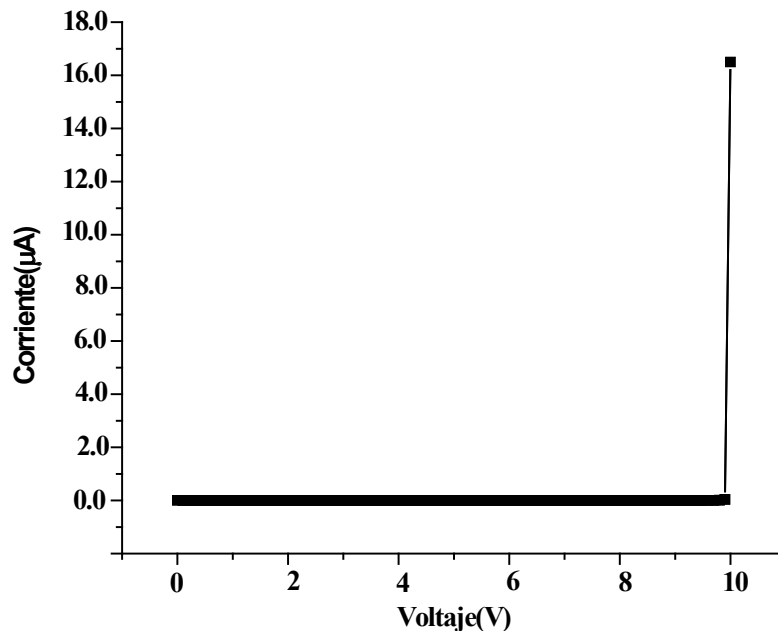


Figura 4.8 Característica corriente voltaje del diodo 1N4728A. Modo de medición: fuente de voltaje y medidor de corriente. Voltaje reverso

Tabla 4.8 Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del diodo zener 1N4728A. Voltaje reverso

Parámetros de medición	Valores
Modo de medición	Fuente de voltaje y medidor de corriente
Tipo de señal	Impulso
Modo de cambio de la señal	Inicio-Fin
Valor de corriente máximo permitido (I_{max})	$-15 \cdot 10^{-6} A$
Valor de inicio	0V
Valor final	-15V
Valor de paso	-0.1V
Tiempo de impulso (t_i)	$100 \cdot 10^{-3} s$
Tiempo de pausa (t_p)	$100 \cdot 10^{-3} s$

Como resultado de la nueva configuración (Tabla 4.9) se fija un valor de corriente pequeño y se mide el voltaje en cada paso. Cuando se caracteriza en el modo de trabajo fuente de voltaje el sistema no pudo ser caracterizado porque a un nivel constante de voltaje se tienen diferentes valores de corriente, y al medir la corriente el sistema no sabe qué valor es el correcto, originando incertidumbre en la medición. La característica I(U) obtenida del diodo Zener se ejemplifica en la Figura 4.9. La respuesta obtenida del diodo para esta configuración no muestra totalmente la característica I(U) al polarizar este dispositivo con voltaje reverso. El valor de paso dado ($-0.5 \cdot 10^{-6} A$) no permite medir el voltaje a corrientes más pequeñas (como se muestra en la Figura 4.6 para un diodo rectificador). Sin embargo, se observa un voltaje constante e independiente de la corriente que circula a través de él. El voltaje Zener nominal es de $10V$ como se especifica en su hoja de datos (apéndice E).

Tabla 4.9 Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del diodo zener 1N4728A. Voltaje reverso

Parámetros de medición	Valores
Modo de medición	Fuente de corriente y medidor de voltaje
Tipo de señal	Impulso
Modo de cambio de la señal	Inicio-Fin
Valor de corriente máximo permitido (I_{max})	$-100 \cdot 10^{-6} A$
Valor de inicio	$0 A$
Valor final	$-100 \cdot 10^{-6} A$
Valor de paso	$-0.5 \cdot 10^{-6} A$
Tiempo de impulso (t_i)	$100 \cdot 10^{-3} s$
Tiempo de pausa (t_p)	$100 \cdot 10^{-3} s$

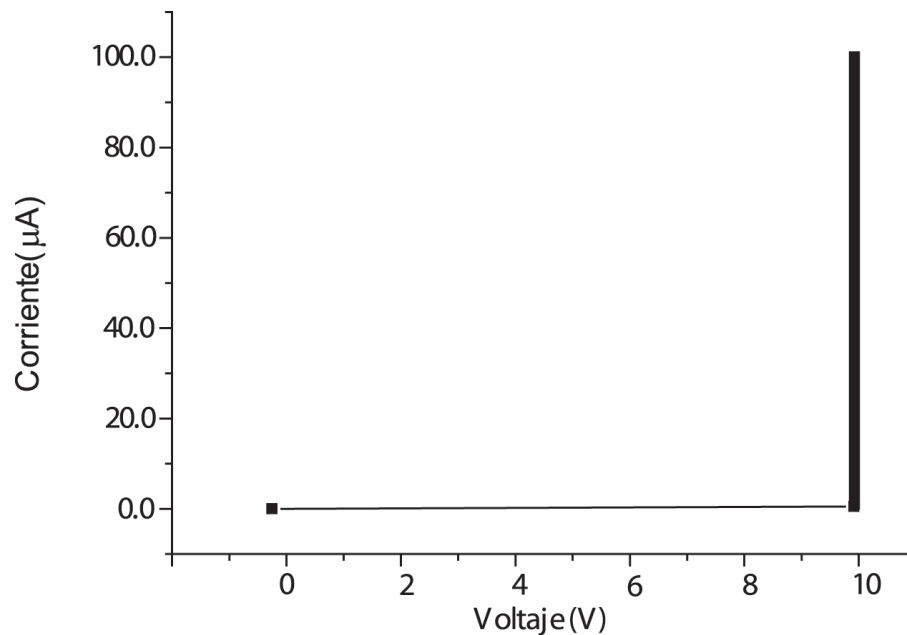


Figura 4.9 Característica corriente voltaje del diodo 1N4728A. Modo de medición: fuente de corriente y medidor de voltaje (voltaje reverso).

En resumen las características de corriente voltaje obtenidas al polarizar directamente e inversamente (voltaje reverso) el diodo Zener 1N4728A coinciden con los valores proporcionados por el fabricante en la hoja de especificaciones (apéndice E). Es importante mencionar que se debe de seleccionar el modo de medición de acuerdo a las características de la muestra a estudiar para que pueda ser caracterizada correctamente.

4.2.2.3. Varistores

A continuación se configuró la UFM Keithley 237 para caracterizar varistores. Se escogió como primer varistor al dispositivo S14K14 de la compañía Siemens (apéndice E) con un voltaje a corriente fija de 18V. La caracterización corriente voltaje se llevo a cabo a temperatura ambiente y el equipo se configuró de acuerdo a los valores mostrados en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10 Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor S14K14

Parámetros de medición	Valores
Modo de medición	Fuente de voltaje y medidor de corriente
Tipo de señal	Impulso
Modo de cambio de la señal	Inicio-Fin-Inicio
Valor de corriente máximo permitido (I_{max})	$1 \cdot 10^{-3} A$
Valor de inicio	0V
Valor final	30.0V
Valor de paso	0.5V
Tiempo de impulso (t_r)	$100 \cdot 10^{-3} s$
Tiempo de pausa (t_p)	$100 \cdot 10^{-3} s$

Como resultado se obtuvo la característica I (U) de la Figura 4.10 que presenta la no linealidad del dispositivo y un voltaje a corriente fija de aproximadamente 20V como lo indica el fabricante (apéndice E). También se observa que los últimos puntos obtenidos al decrementar el voltaje no son los mismos puntos iniciales al incrementar voltaje. Este fenómeno se puede explicar al considerar cada límite de grano como dos barreras Schottky (subcapítulo 2.4). En cada límite de grano se forma una barrera potencial variable cuya altura depende del voltaje aplicado. Cuando el varistor es caracterizado incrementando voltaje al llegar al valor final (voltaje alto) el campo eléctrico entre los granos es intenso y la corriente aumenta; por lo tanto la altura de la barrera potencial es más pequeña. Al decrementar el voltaje existe carga atrapada entre los límites de grano, sin embargo, la barrera potencial probablemente es más alta (y por lo tanto la corriente es menor) que cuando se aplicó el mismo voltaje incrementándolo. Esto puede provocar diversos fenómenos (tunelaje electrónico o avalancha de portadores) y por lo tanto variaciones de la característica I(U) del dispositivo. También el calentamiento de Joule puede inducir variaciones de la característica corriente voltaje del varistor. Se decidió modificar el parámetro de tiempo pausa por un valor de $1000 \cdot 10^{-3} ms$ (Tabla 4.11), para dar un lapso mayor sin aplicar voltaje y no provocar perturbaciones en la característica I(U).

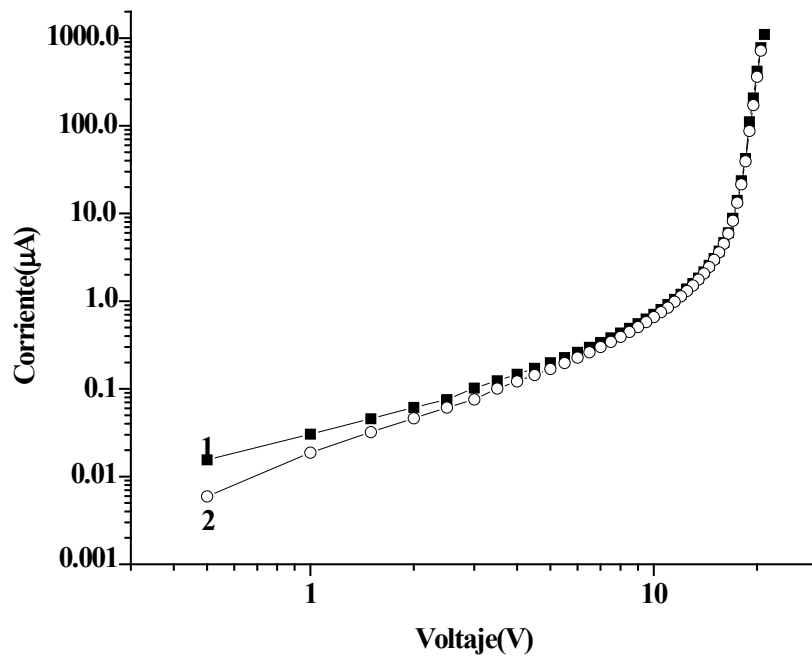


Figura 4.10 Característica corriente voltaje del varistor S14K14. Datos obtenidos con incremento de voltaje (1) y con decremento de voltaje (2). Señal aplicada impulso 100ms/100ms. Voltaje positivo

Tabla 4.11 Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor S14K14. Voltaje positivo

Parámetros de medición	Valores
Modo de medición	Fuente de voltaje y medidor de corriente
Tipo de señal	Impulso
Modo de cambio de la señal	Inicio-Fin-Inicio
Valor de corriente máximo permitido (I_{max})	$1 \cdot 10^{-3} A$
Valor de inicio	0V
Valor final	30.0V
Valor de paso	0.5V
Tiempo de impulso (t_i)	$100 \cdot 10^{-3} s$
Tiempo de pausa (t_p)	$1000 \cdot 10^{-3} s$

Se obtuvo la característica de la Figura 4.11. Al comparar el resultado, la característica obtenida al decrementar e incrementar voltaje son prácticamente la misma y presentan menos variación. La Figura 4.12 muestra las características I(U) obtenidas al aplicar una señal impulso 100 ms/100 ms y una señal impulso 100 ms/1000 ms a la misma muestra. A partir de los resultados de la medición se tiene la Tabla 4.12.

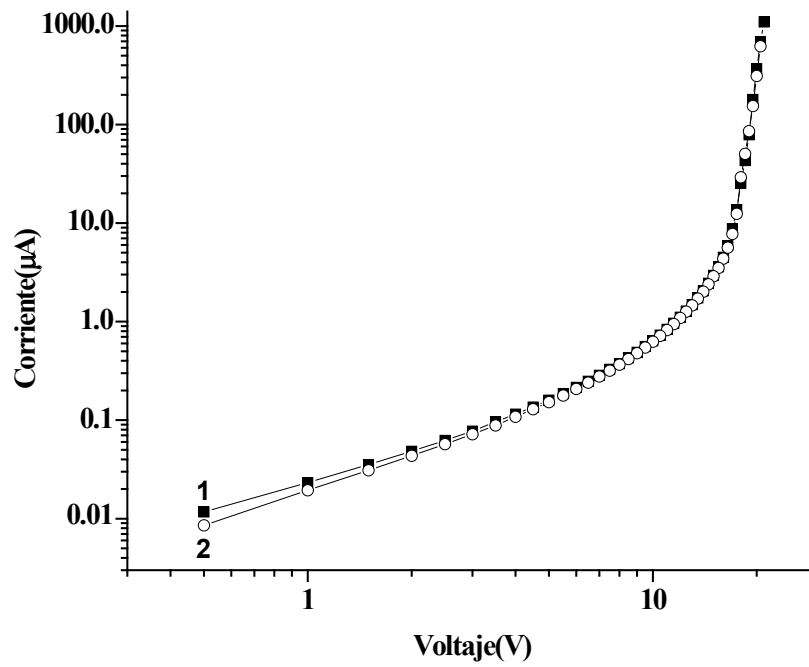


Figura 4.11 Característica corriente voltaje del varistor S14K14. Datos obtenidos con incremento de voltaje (1) y con decremento de voltaje (2). Señal aplicada impulso 100ms/1000ms

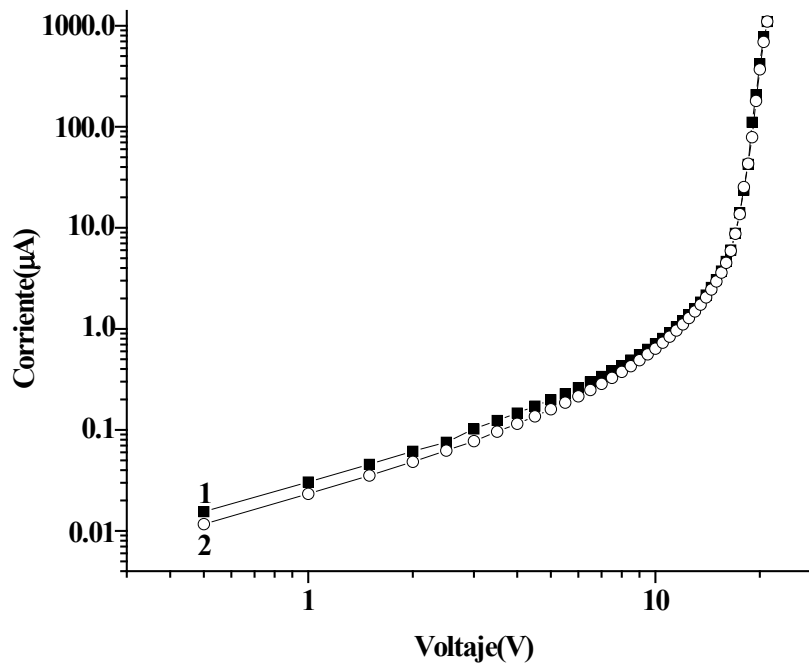


Figura 4.12 Comparación de la característica corriente voltaje del varistor S14K14. Datos obtenidos con un impulso de incremento de voltaje 100ms/100ms (1) y datos obtenidos con un impulso de incremento de voltaje 100ms/1000ms (2)

El coeficiente de no linealidad cambia en las mediciones realizadas, esto se debe a que un aumento en la temperatura causa un decremento de β . Por lo tanto, una variación del tiempo pausado da como resultado una característica I(U) diferente.

Tabla 4.12 Valores obtenidos al caracterizar el varistor S14K14 aplicada una señal impulso

Parámetros de tiempo de la señal tipo impulso $t_{impulso} / t_{pausa}$, ms/ms	Coefficiente de no linealidad β	Voltaje a corriente fija ($1 \cdot 10^{-3} A$) U_1 , V
100 ms / 100 ms	14.33	21
100 ms / 1000 ms	19.17	21

En resumen las variaciones observadas en la medición se deben al comportamiento del varistor y no al sistema de medición (programa y UFM Keithley 237).

Para continuar con la exposición del programa a diversas situaciones y encontrar anomalías o estados que pudieran dañar al equipo o a las muestras, se configuró la UFM Keithley 237 para aplicar una señal escalón al varistor S14K14. La Tabla 4.13 muestra los valores de la señal configurada para realizar la caracterización I(U) del varistor. El resultado se muestra gráficamente en la Figura 4.13, y presenta una variación mayor de la característica I(U) (comparada con las característica I (U) obtenidas con un impulso de voltaje 100 ms/100 ms y con un impulso de voltaje 100 ms/1000 ms). Se observa que los valores obtenidos al medir la corriente al decrementar el voltaje (círculos blancos) son menores en magnitud comparados con los obtenidos al incrementar el voltaje (cuadros negros). Por lo tanto el aplicar la señal escalón de 100ms originó un fenómeno de la barrera potencial provocando un aumento de temperatura y una variación de la característica I(U). Sin embargo, este tipo de configuración es útil para conocer el comportamiento del varistor cuando opere en un circuito electrónico como protector contra picos de sobrevoltaje y tenga que soportar un cambio brusco.

Tabla 4.13 Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor S14K14. Señal escalón

Parámetros de medición	Valores	Comentarios
Modo de medición	Fuente de voltaje y medidor de corriente	
Tipo de señal	Escalón	Fig. 3.7
Modo de cambio de la señal	Inicio-Fin-Inicio	
Valor de corriente máximo permitido (I_{max})	$1 \cdot 10^{-3} A$	
Valor de inicio	0V	
Valor final	30.0V	
Valor de paso	0.5V	
Tiempo de impulso (t_i)	$100 \cdot 10^{-3} s$	

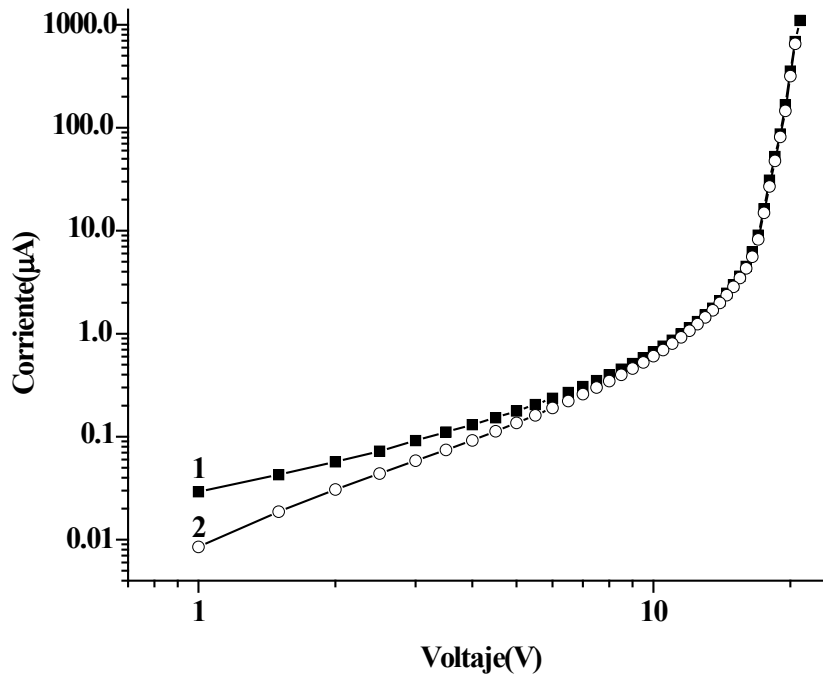


Figura 4.13 Característica corriente voltaje del varistor S14K14. Datos obtenidos con incremento de voltaje (1) y con decremento de voltaje (2). Señal aplicada escalón 100 ms. Voltaje positivo

Enseguida se caracterizó el varistor S20K14, de la compañía Siemens (apéndice E) con un voltaje a corriente fija de $18V$ y un diámetro mayor al del varistor S14K14. A esta muestra se le aplicó una señal tipo impulso con las especificaciones de la Tabla 4.14. El resultado (Figura 4.14) es un voltaje de corte cuya magnitud de $24V$ no es excedido como lo indica el fabricante (apéndice E). Para comprobar la simetría de la característica corriente voltaje del varistor se configuró la UFM Keithley 237 de acuerdo a la Tabla 4.15, aplicando un voltaje negativo a las terminales del mismo varistor. La respuesta a esta configuración se muestra en la Figura 4.15.

Tabla 4.14. Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor S20K14

Parámetros de medición	Valores
Modo de medición	Fuente de voltaje y medidor de corriente
Tipo de señal	Impulso
Modo de cambio de la señal	Inicio-Fin-Inicio
Valor de corriente máximo permitido (I_{max})	$1 \cdot 10^{-3} A$
Valor de inicio	$0V$
Valor final	$30.0V$
Valor de paso	$0.5V$
Tiempo de impulso (t_i)	$100 \cdot 10^{-3} s$
Tiempo de pausa (t_p)	$100 \cdot 10^{-3} s$

Para comparar la característica I(U) de este componente se graficaron las dos mediciones obteniendo la Figura 4.16, en la cual se observa la no linealidad y simetría del dispositivo.

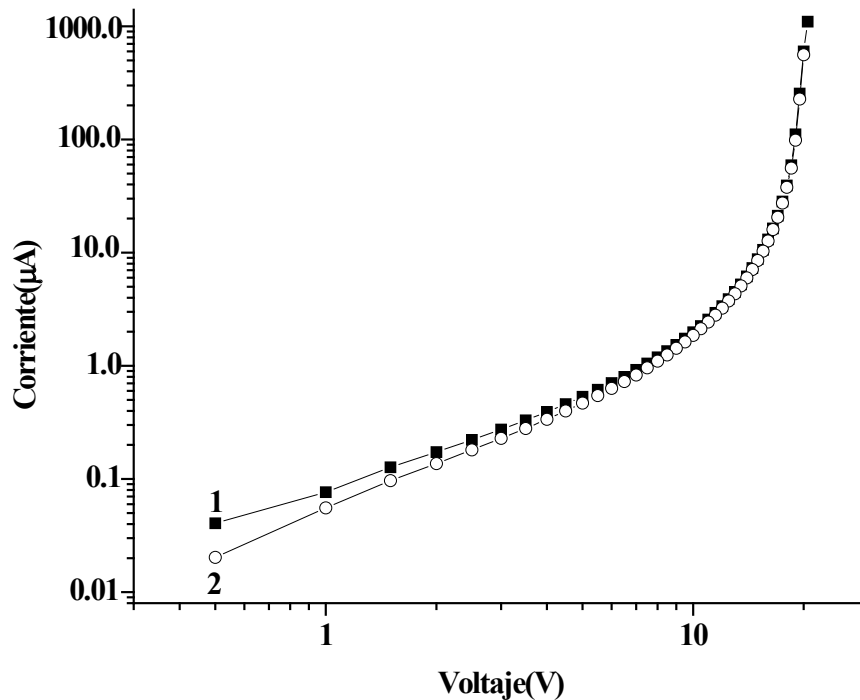


Figura 4.14 Característica corriente voltaje del varistor S20K14. Datos obtenidos con incremento de voltaje (1) y con decremento de voltaje (2). Señal aplicada impulso de voltaje 100 ms/100 ms

Tabla 4.15 Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor S20K14. Voltaje negativo

Parámetros de medición	Valores
Modo de medición	Fuente de voltaje y medidor de corriente
Tipo de señal	Impulso
Modo de cambio de la señal	Inicio-Fin-Inicio
Valor de corriente máximo permitido (I_{max})	$-1 \cdot 10^{-3} A$
Valor de inicio	0V
Valor final	-30.0V
Valor de paso	-0.5V
Tiempo de impulso (t_i)	$100 \cdot 10^{-3} s$
Tiempo de pausa (t_p)	$100 \cdot 10^{-3} s$

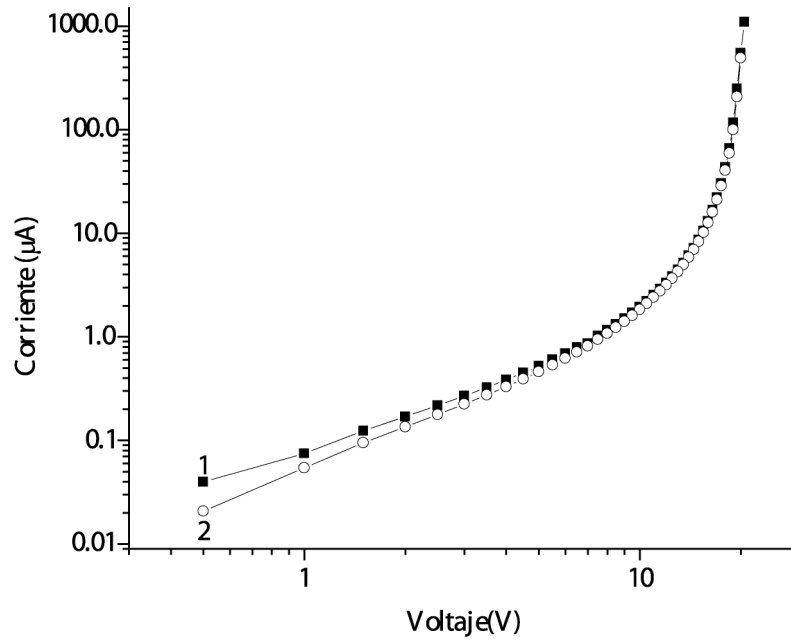


Figura 4.15 Característica corriente voltaje del varistor S20K14. Datos obtenidos con incremento de voltaje (1) y con decremento de voltaje (2). Señal aplicada impulso de voltaje 100ms/100ms. Voltaje negativo

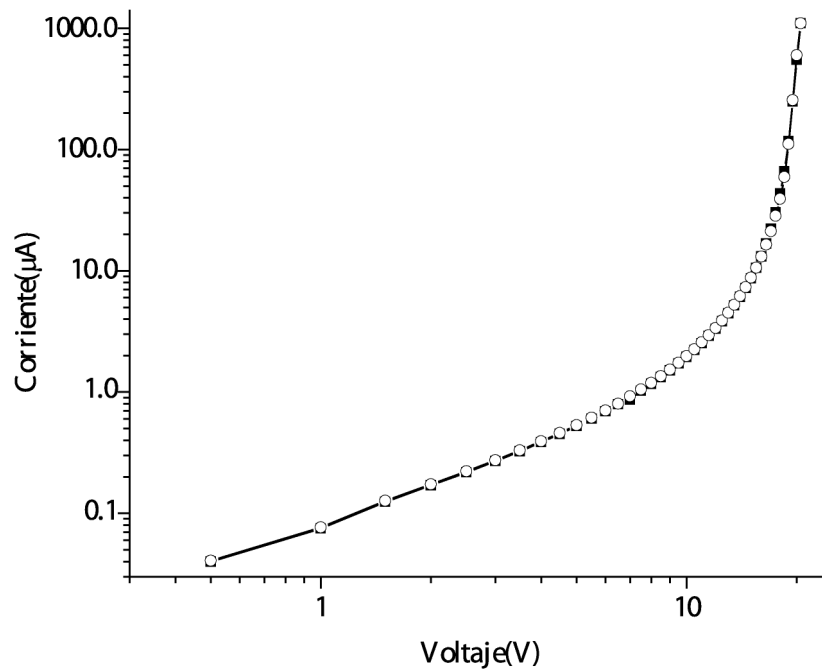


Figura 4.16 Característica corriente voltaje del varistor S20K14. Datos obtenidos polarizando con voltaje negativo (cuadros negros) y con voltaje positivo (círculos blancos)

En la Tabla 4.16 se registraron los valores de las características I(U) obtenidas a $1 \cdot 10^{-3}A$, el varistor presenta una variación del valor de β .

Tabla 4.16 Valores obtenidos al caracterizar el varistor S20K14 al aplicar voltaje positivo y negativo ($1 \cdot 10^{-3}A$)

Voltaje	Coefficiente de no linealidad, β	Voltaje a corriente fija ($1 \cdot 10^{-3} A$)
Señal de voltaje positivo tipo impulso 100ms/100ms	24.5	20.5
Señal de voltaje negativa tipo impulso 100ms/100ms	28.1	-20.5

A continuación se caracterizó un varistor fabricado por la empresa Positrón del que se desconocen sus datos. Se aplicó un voltaje en el rango de $0V$ a $150V$. El voltaje final fue mucho mayor al voltaje aplicado a las muestras anteriores con la intención de probar el programa en un rango de mayor voltaje. La respuesta del varistor a la configuración de los parámetros mostrados en la Tabla 4.17 (Figura 4.17) muestra una mayor variación. Sin embargo, a partir de la Figura 4.17 se puede determinar el voltaje a corriente fija de este dispositivo, éste es de aproximadamente $100V$, pues a partir de este voltaje la corriente se incrementa súbitamente en varios órdenes de magnitud.

La variación entre los datos obtenidos al incrementar y decrementar voltaje se presenta a bajas corrientes y puede ser originado por diversas causas, por ejemplo: a que el proceso de medición se realizó sin dejar descansar la muestra, el varistor es una muestra antigua y pudo sufrir alguna degradación por el uso, o por el efecto de la altura de la barrera potencial.

Enseguida se configuró la UFM Keithley 237 para proporcionar valores negativos y caracterizar la muestra con una polaridad diferente. En la Tabla 4.18 se exhibe la configuración para la caracterización del varistor, la respuesta de este dispositivo se muestra en la Figura 4.18, presenta una característica corriente voltaje aproximadamente igual a la obtenida al aplicar voltaje positivo.

Tabla 4.17 Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor Positron. Voltaje positivo

Parámetros de medición	Valores
Modo de medición	Fuente de voltaje y medidor de corriente
Tipo de señal	Impulso
Modo de cambio de la señal	Inicio-Fin-Inicio
Valor de corriente máximo permitido (I_{max})	$1 \cdot 10^{-3}A$
Valor de inicio	$0V$
Valor final	$150.0V$
Valor de paso	$1.0V$
Tiempo de impulso (t_i)	$100 \cdot 10^{-3}s$
Tiempo de pausa (t_p)	$100 \cdot 10^{-3}s$

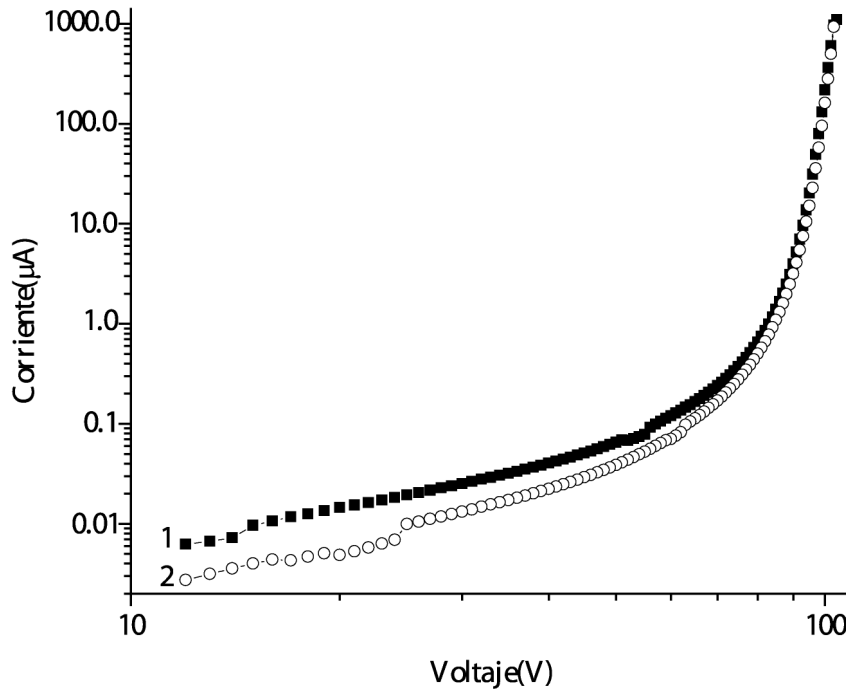


Figura 4.17 Característica corriente voltaje del varistor de la compañía Positrón. Datos obtenidos con incremento de voltaje (1) y con decremento de voltaje (2). Señal aplicada impulso de voltaje 100 ms/100 ms. Voltaje positivo

Tabla 4.18 Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor Positrón. Voltaje negativo

Parámetros de medición	Valores
Modo de medición	Fuente de voltaje y medidor de corriente
Tipo de señal	Impulso
Modo de cambio de la señal	Inicio-Fin-Inicio
Valor de corriente máximo permitido (I_{max})	$-1 \cdot 10^{-3} A$
Valor de inicio	0V
Valor final	-120.0V
Valor de paso	-1.0V
Tiempo de impulso (t_i)	$100 \cdot 10^{-3} s$
Tiempo de pausa (t_p)	$100 \cdot 10^{-3} s$

Se graficó la característica I(U) con voltaje negativo y positivo (Figura 4.19) y se dedujo que este varistor presenta simetría y no linealidad. En la Figura 4.20 se presenta la característica I(U) del dispositivo para voltaje positivo y negativo, en una escala lineal. La magnitud del voltaje que pasa por este dispositivo no excede el nivel definido por sus características de fabricación.

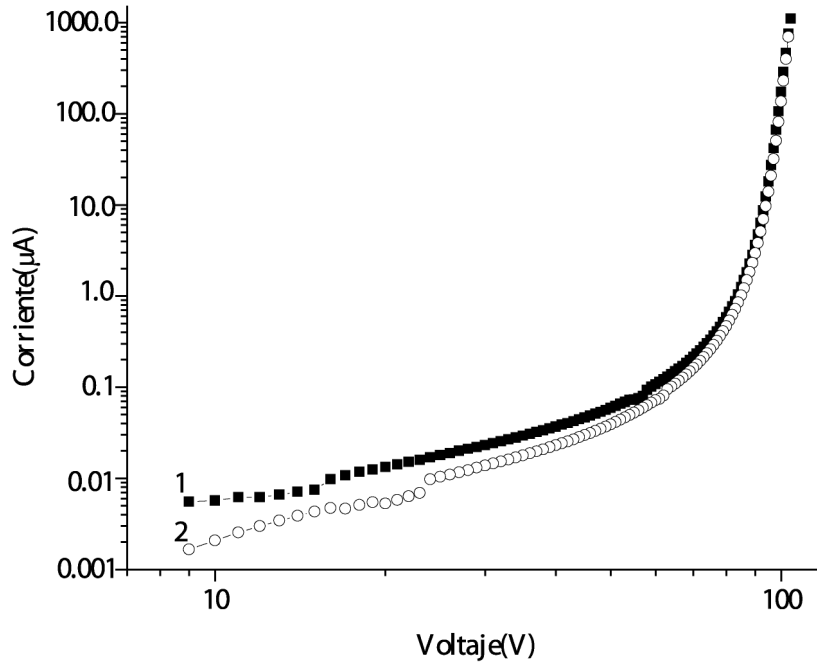


Figura 4.18 Característica corriente voltaje del varistor de la compañía Positron. Datos obtenidos con incremento de voltaje (1) y con decremento de voltaje (2). Señal aplicada impulso de voltaje 100 ms/100 ms. Voltaje negativo

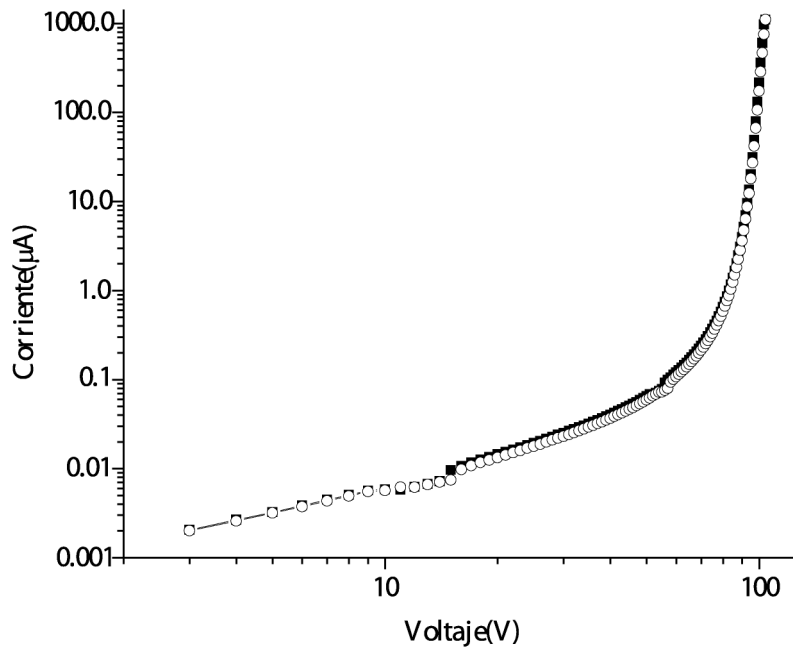


Figura 4.19 Característica corriente voltaje del varistor de la compañía Positron. Datos obtenidos polarizando con voltaje negativo (cuadros negros) y con voltaje positivo (círculos blancos)

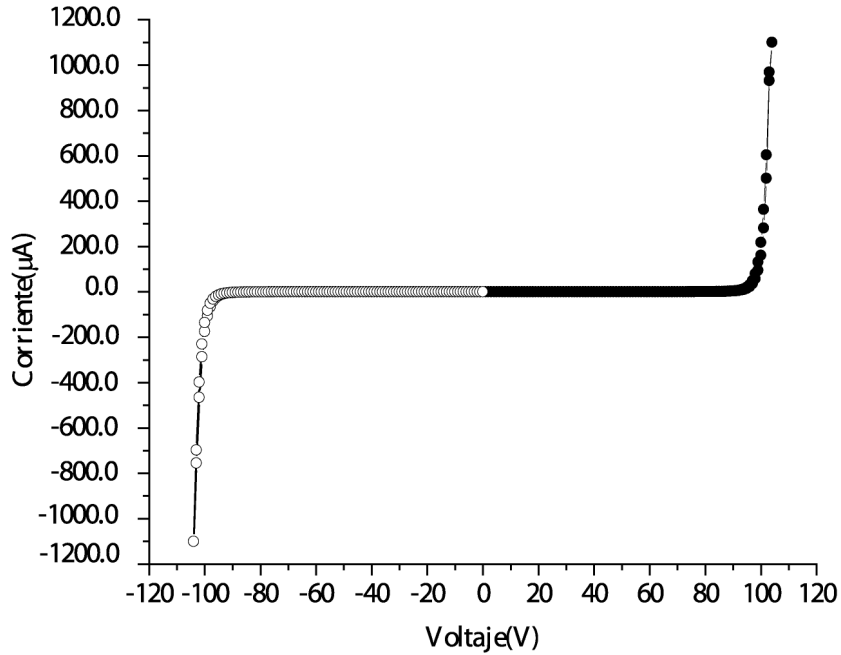


Figura 4.20 Característica corriente voltaje del varistor de la compañía Positron. Escala lineal

En el apéndice G se muestran más características $I(U)$ de varistores obtenidas al configurar la UFM Keithley 237 con el programa desarrollado. Es notable que el programa puede configurar la UFM Keithley 237 en un amplio rango de voltaje y medir los valores. Además realiza una aproximación del valor de β (en tiempo real) para voltajes negativos y positivos de acuerdo a las consideraciones mostradas en el Apéndice F.

Capítulo 5 | CARACTERÍSTICAS CORRIENTE VOLTAJE DE VARISTORES EN BASE DE DIOXIDO DE ESTAÑO

Recientemente se ha incrementado el interés por la formación de varistores en base de SnO_2 debido a que presentan características eléctricas altamente no lineales, semejante a las de los varistores en base de ZnO , aunado a las siguientes ventajas [21]: los varistores en base de SnO_2 presentan una estructura simple a diferencia de los varistores en base de ZnO y requiere de concentraciones bajas de dopantes para alcanzar una buena característica varistora. Por lo anterior y de las pruebas efectuadas al programa se realizó una investigación entre los varistores en base de óxido de zinc y los varistores en base de óxido de estaño.

Se seleccionaron algunos varistores elaborados en el laboratorio de Electrocerámica de la UTM en base de dióxido de estaño con valores del coeficiente de no linealidad en el rango de 3 a 40. En la Figura 5.1 se presenta la característica corriente voltaje del varistor F3P2-1350 obtenida de la configuración realizada con los valores de la Tabla 5.1. En el rango de valores bajos de voltaje la característica $I(U)$ es prácticamente lineal. Sin embargo, al aumentar el voltaje la característica presenta una desviación de la ley de Ohm. A $1 \cdot 10^{-3} A$ el coeficiente de no linealidad es de 3.4 y el voltaje es de $93 V$. Al decrementar el voltaje la curva $I(U)$ prácticamente coincide con la característica obtenida al incrementar el voltaje (Figura 5.1). Este suceso puede significar que el autocalentamiento de la muestra (por efecto de Joule) no afecta demasiado los resultados de la medición.

Tabla 5.1 Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor F3P2-1350. Voltaje positivo

Parámetros de medición	Valores
Modo de medición	Fuente de voltaje y medidor de corriente
Tipo de señal	Impulso
Modo de cambio de la señal	Inicio-Fin-Inicio
Valor de corriente máximo permitido (I_{max})	$1 \cdot 10^{-3} A$
Valor de inicio	$0 V$
Valor final	$120.0 V$
Valor de paso	$0.5 V$
Tiempo de impulso (t_p)	$100 \cdot 10^{-3} s$
Tiempo de pausa (t_p)	$100 \cdot 10^{-3} s$

Con el fin de observar la influencia que provoca el autocalentamiento en las características $I(U)$ se sometió al varistor F3P2-1350 a otra prueba. La prueba consistió en aplicar consecutivamente tres diferentes señales de la fuente, la configuración del equipo para este experimento se muestra en las tablas 5.2, 5.3 y 5.4. Primero se aplicó una señal de voltaje tipo impulso ($12 ms/1000 ms$), se descanso la muestra por $1000 ms$ y enseguida se aplicó $12 ms$ de voltaje (Figura 5.2, cuadros). Después se aplicó una señal tipo escalón cuya magnitud se incrementaba cada $12 ms$ (Figura 5.2, círculos). Por último se incrementó la señal de voltaje

escalón cada 100 ms (Figura 5.2, triángulos). Para la caracterización de esta muestra se usó un soporte (ver apéndice F) para sujetar el varistor (con terminales delgadas para no permitirle a la muestra disipar energía en él).

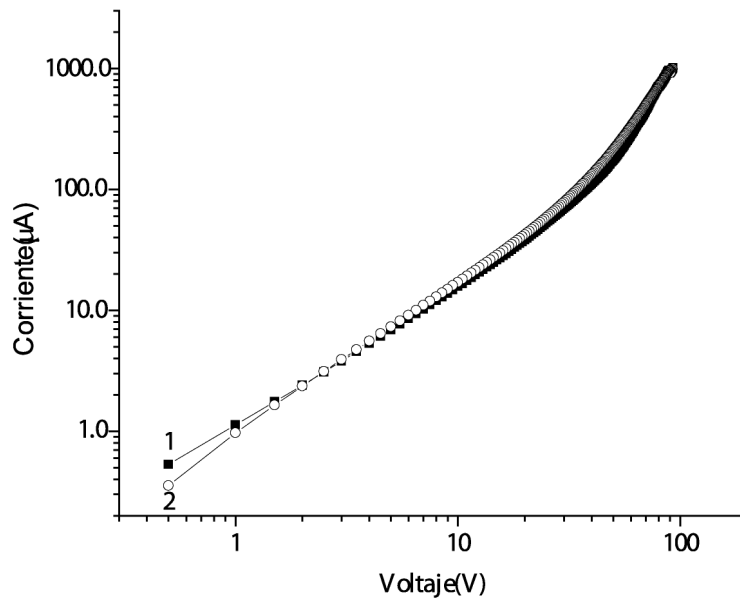


Figura 5.1 Característica corriente voltaje del varistor F3P2-1350. Datos obtenidos con incremento de voltaje (1) y con decremento de voltaje (2). Señal aplicada impulso de voltaje 100 ms/100 ms

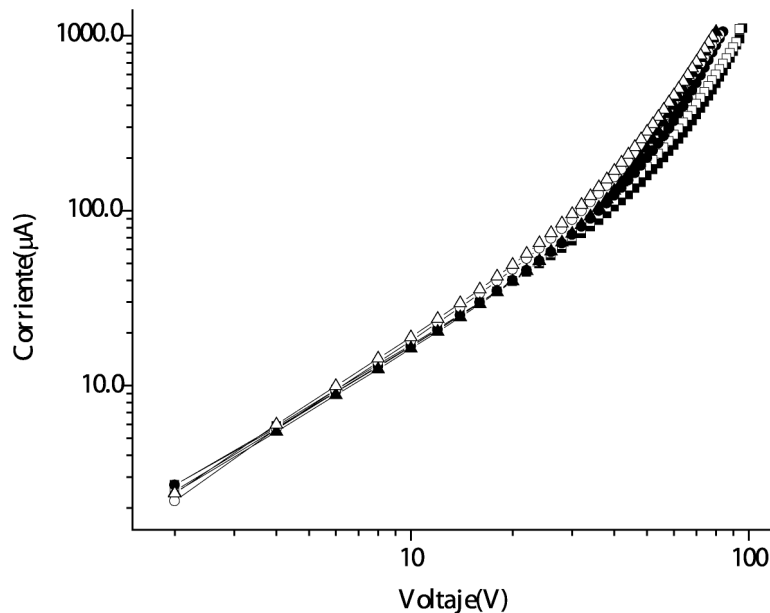


Figura 5.2 Característica corriente voltaje del varistor F3P2-1350. Datos obtenidos con un impulso de voltaje 12 ms / 1000 ms (cuadros), con un escalón de voltaje 12 ms (círculos) y con un escalón de voltaje 100 ms (triángulos)

Tabla 5.2 Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor F3P2-1350. Impulso 100 ms/100ms

Parámetros de medición	Valores
Modo de medición	Fuente de voltaje y medidor de corriente
Tipo de señal	Impulso
Modo de cambio de la señal	Inicio-Fin-Inicio
Valor de corriente máximo permitido (I_{max})	$1 \cdot 10^{-3} A$
Valor de inicio	0V
Valor final	120.0V
Valor de paso	2V
Tiempo de impulso (t_i)	$12 \cdot 10^{-3} s$
Tiempo de pausa (t_p)	$100 \cdot 10^{-3} s$

Tabla 5.3 Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor F3P2-1350. Escalón 12 ms

Parámetros de medición	Valores
Modo de medición	Fuente de voltaje y medidor de corriente
Tipo de señal	Escalón
Modo de cambio de la señal	Inicio-Fin-Inicio
Valor de corriente máximo permitido (I_{max})	$1 \cdot 10^{-3} A$
Valor de inicio	0V
Valor final	120.0V
Valor de paso	2V
Tiempo de impulso (t_i)	$12 \cdot 10^{-3} s$

Tabla 5.4 Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor F3P2-1350. Escalón 100 ms

Parámetros de medición	Valores
Modo de medición	Fuente de voltaje y medidor de corriente
Tipo de señal	Escalón
Modo de cambio de la señal	Inicio-Fin-Inicio
Valor de corriente máximo permitido (I_{max})	$1 \cdot 10^{-3} A$
Valor de inicio	0V
Valor final	120.0V
Valor de paso	2V
Tiempo de impulso (t_i)	$100 \cdot 10^{-3} s$

Es posible ver que en los casos caracterizados con señales tipo escalón las curvas I(U) se encuentran un poco arriba comparadas con las características obtenidas con señales tipo impulso (Figura 5.2). En el caso del escalón 100 ms este desplazamiento es más notable (Figura 5.2, triángulos). Este desplazamiento de la característica I(U) se relaciona con el autocalentamiento causado por el efecto de Joule. A bajos voltajes la influencia de este efecto es pequeño debido

a que la potencia disipada es despreciable. A voltajes altos dicha influencia se hace notable porque la potencia (el producto del voltaje por corriente) es bastante grande. La característica I(U) no presenta variación de resultados como los obtenidos anteriormente con varistores en base de dióxido de zinc. Probablemente por una captura débil de portadores en los límites de grano. En la Tabla 5.5 se especifican los valores obtenidos de las mediciones realizadas.

Tabla 5.5 Parámetros obtenidos de la muestra F3P2-1350 al configurar la UFM Keithley 237 como se muestra en las tablas 5.2, 5.3, 5.4

Señal	Coefficiente de no linealidad, β a $\cong 1 \cdot 10^{-3} A$	Voltaje a $\cong 1 \cdot 10^{-3} A, V$
Impulso (12ms / 1000ms)	6.4	94
Escalón (12 ms)	3.8	82
Escalón (100 ms)	3.5	80

Se seleccionó el varistor SG-17A, elaborado en base de dióxido de estaño (SnO_2) en el laboratorio de electrocerámica de la UTM para su caracterización. Se configuró el equipo como se muestra en la Tabla 5.6 y se obtuvo la característica I(U) de la Figura 5.3. Se observa que existe una parte de la característica corriente donde la corriente aumenta bruscamente con el incremento de voltaje. En este caso el coeficiente de no linealidad (a corriente 10^{-3}) es de 30. Enseguida se configuró la UFM Keithley 237 con los valores negativos de la Tabla 5.6 y se obtuvo una característica similar a la característica I(U) con voltaje positivo (Figura 5.4). De la Figura 5.4 se observa que existe variación en los valores obtenidos con incremento y decremento de voltaje. Esto puede ser originado por el aumento de la conductancia por el calentamiento de Joule.

Tabla 5.6 Configuración de la UFM Keithley 237 para la medición del varistor SG-17A

Parámetros de medición	Valores
Modo de medición	Fuente de voltaje y medidor de corriente
Tipo de señal	Impulso
Modo de cambio de la señal	Inicio-Fin-Inicio
Valor de corriente máximo permitido (I_{max})	$1 \cdot 10^{-3} A$
Valor de inicio	$0V$
Valor final	$500.0 V$
Valor de paso	$5V$
Tiempo de impulso (t_i)	$100 \cdot 10^{-3} s$
Tiempo de pausa (t_p)	$100 \cdot 10^{-3} s$

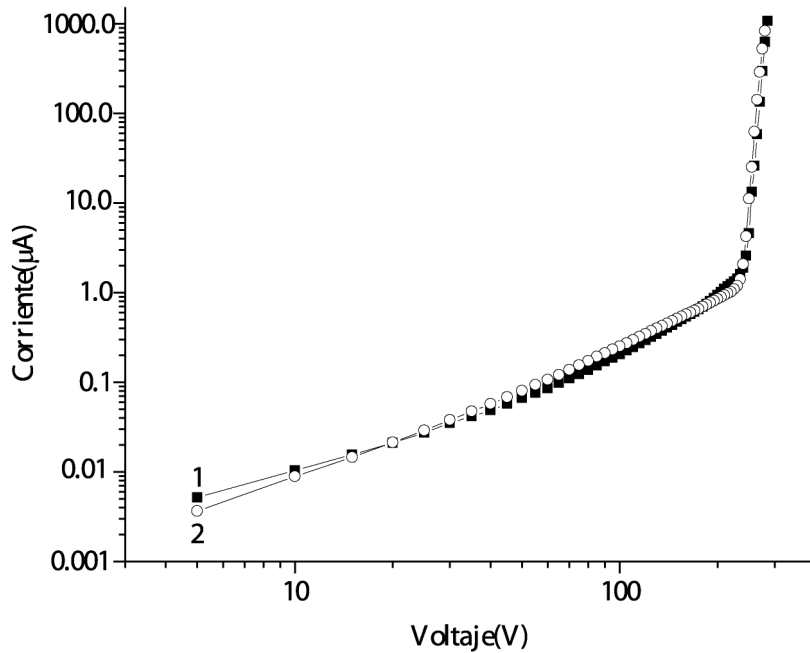


Figura 5.3 Característica corriente voltaje del varistor SG-17A. Datos obtenidos con incremento de voltaje (1) y con decremento de voltaje (2). Señal aplicada impulso de voltaje 100 ms/100 ms. Voltaje positivo

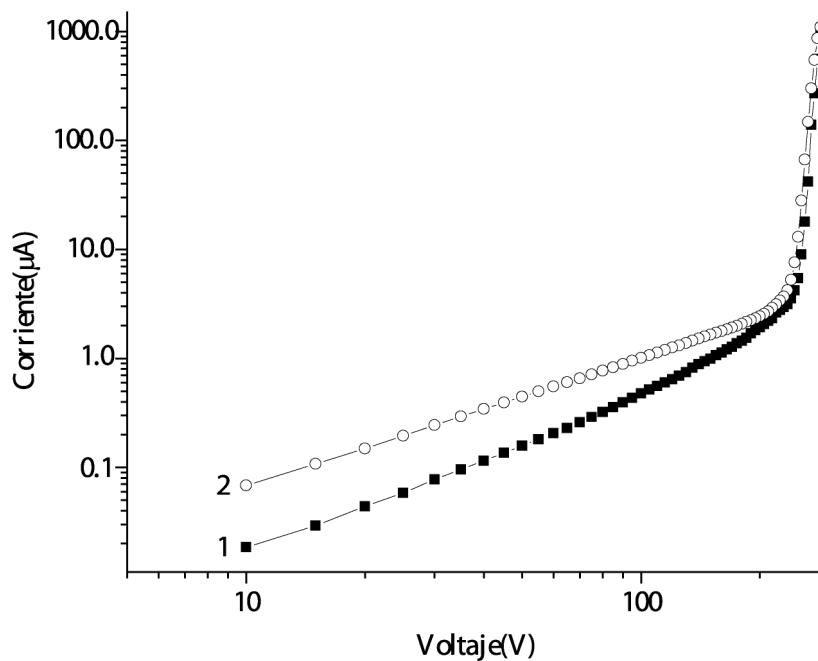


Figura 5.4 Característica corriente voltaje del varistor SG-17A. Datos obtenidos con incremento de voltaje (1) y con decremento de voltaje (2). Señal aplicada impulso de voltaje 100 ms/100 ms. Voltaje negativo

A continuación se obtuvieron las características corriente voltaje de varios varistores del sistema $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ sinterizados en el laboratorio de la UTM con coeficiente de no linealidad máximo de este grupo es de 41. La respuesta de la medición se observa en la Figura 5.5 (el programa desarrollado obtiene diferentes característica $I(U)$ en un amplio rango voltaje y con diferentes valores de β).

Por último se presenta en la Figura 5.6 la característica $I(U)$ de dos varistores con diferente compuesto base, con aproximadamente el mismo coeficiente de no linealidad y voltaje a corriente fija. Tanto el varistor en base de dióxido de estaño (fabricado en la UTM) y en base de óxido de zinc (fabricado por la compañía Positron) presentan no linealidad con un $\beta \approx 30$. Por lo tanto las características eléctricas son altamente no lineales, semejante a las de los varistores comerciales en base de ZnO .

Basándose en los resultados de los experimentos y pruebas realizadas se encontró que en caso de medición de corriente en el rango de 10^{-10} a 10^{-8} A aplicando voltaje tipo pulso, es necesario utilizar un modo de medición donde el tiempo de pausa (con voltaje cero) es no menor a 10 ms. También se observó que no hay influencia notable en las características corriente voltaje de las muestras por el efecto de Joule (autocalentamiento) si los valores de corriente son menores a 10^{-3} A y la duración del pulso de voltaje es menor a 100 ms.

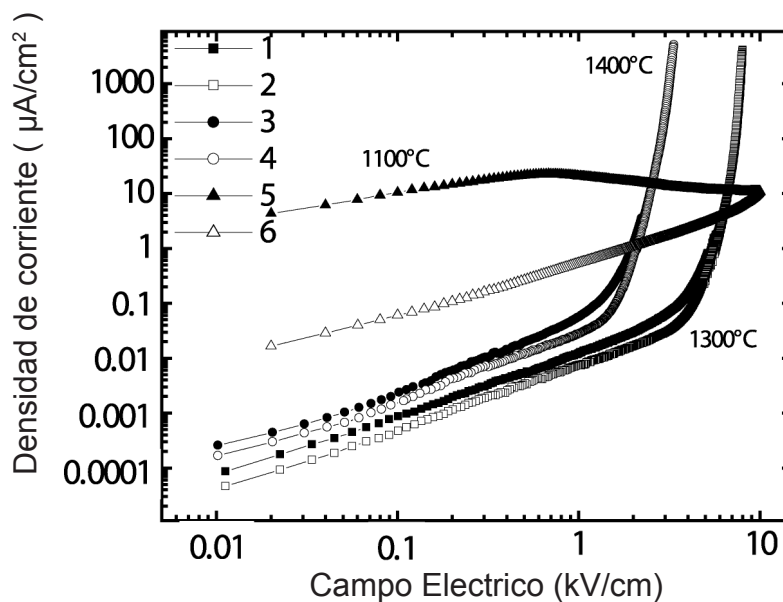


Figura 5.5 Característica corriente voltaje del varistor de una muestra cerámica en base de dióxido de estaño, $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ sinterizada a diferentes temperaturas. Datos obtenidos con incremento de voltaje (de color negro) y datos obtenidos con decremento de voltaje (sin color)

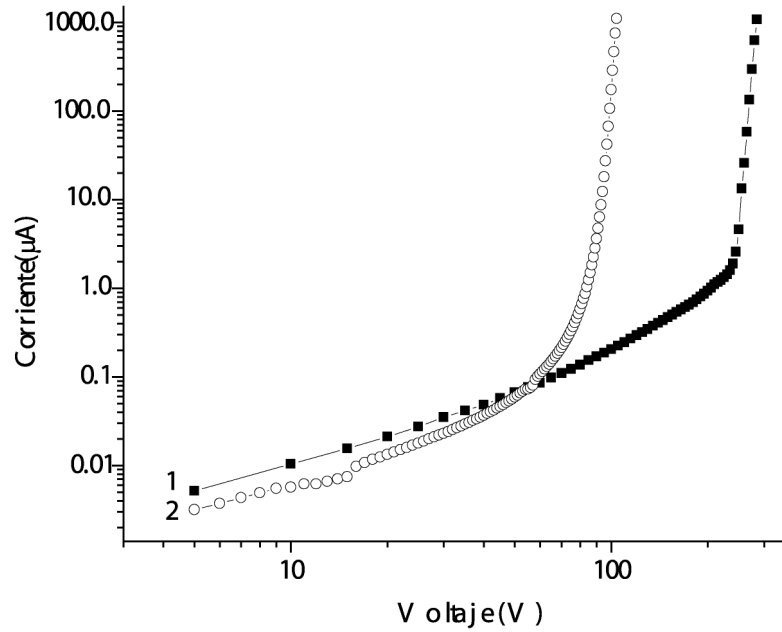


Figura 5.6 Característica corriente voltaje del varistor en base de dióxido de estaño, SG-17A (1) y del varistor en base de zinc, de la compañía Positron (2)

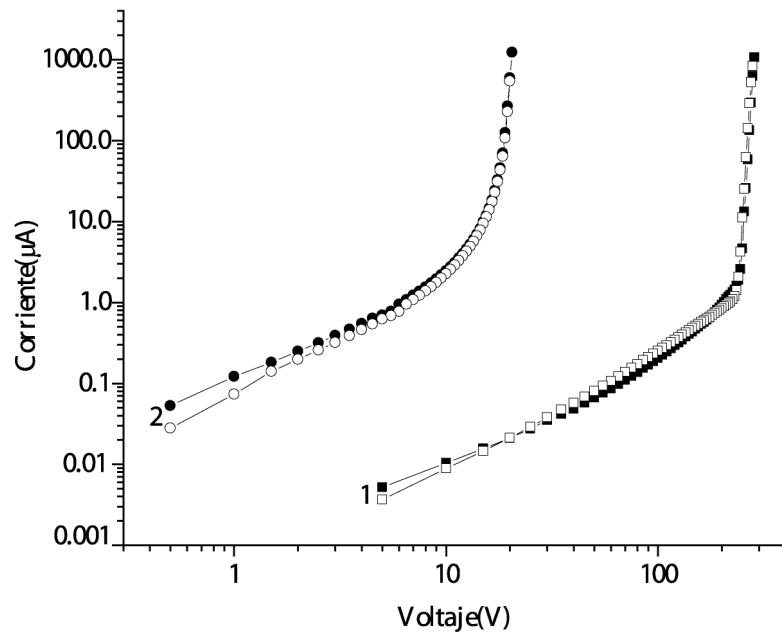


Figura 5.7 Característica corriente voltaje del varistor en base de dióxido de estaño, SG-17A (1) y del varistor en base de zinc, S20K14 (2). Datos obtenidos con incremento de voltaje (de color negro) y datos obtenidos con decremento de voltaje (sin color)

Capítulo 6 | CONCLUSIONES Y LINEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

1. Se elaboró el programa para la adquisición de datos de la UFM Keithley 237; este programa realiza un proceso automatizado de mediciones de las características de corriente voltaje de dispositivos semiconductores.
2. El sistema realiza mediciones en dos modos de medición: “fuente de voltaje, medidor de corriente” y “fuente de corriente, medidor de voltaje”. En cada modo de medición la forma de señal de la fuente puede ser de una de dos tipos: señal tipo escalón y señal tipo impulso con amplitud creciente. Además el usuario puede seleccionar entre dos tipos de variación de la señal, este puede ser que la señal inicie en un valor elegido y llegue a fin y después pare el proceso y la segunda opción es que la señal inicie en un valor seleccionado, llegue a fin y regrese al valor de inicio.
3. En el programa se desarrolló una protección contra el sobrepaso de corriente predeterminada por el usuario en la tarea de medición. El valor de corriente actual es comparado con el valor máximo seleccionado por el usuario y cuando la corriente predeterminada es sobrepasada la tarea de medición puede autocorregirse: la medición se termina o continúa disminuyendo el voltaje y midiendo la corriente (dependiendo del modo de cambio de la señal seleccionada por el usuario anteriormente).
4. El programa fue verificado mediante la obtención de las características corriente voltaje de dispositivos comerciales y varistores preparados en el laboratorio de la UTM. Se encontró que en caso de medición de corriente en el rango de 10^{-10} a 10^{-8} A aplicando voltaje tipo pulso, es necesario utilizar un modo de medición donde el tiempo de pausa (con voltaje cero) es no menor a 10 ms. Se encontró que no hay influencia notable en las características corriente voltaje de las muestras por el efecto de Joule (autocalentamiento) si los valores de corriente son menor a 10^{-3} A y la duración del pulso de voltaje es menor a 100 ms.
5. Usando el programa desarrollado se obtuvieron las características corriente voltaje de varios varistores en base de dióxido de estaño (SnO_2) sinterizados en el laboratorio de la UTM con coeficiente de no linealidad máximo de 41 y con campo eléctrico $8 \cdot 10^3 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ a densidad de corriente $4 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$).
6. Este sistema de medición puede ser utilizado para investigaciones de materiales con diferentes características de corriente voltaje, incluyendo las características con parte de resistencia diferencial negativa.

El trabajo de tesis desarrollado puede evolucionar dando paso a los siguientes trabajos:

- El programa puede ser modificado para configurar la fuente y unidad de medición Keithley 237 con señales tipo Pulso logarítmico y Escalón logarítmico. Además de contar con la posibilidad para registrar la dependencia de corriente contra tiempo.
- El programa puede ser modificado para realizar un mejor tratamiento y análisis de datos.

BIBLIOGRAFÍA | BIBLIOGRAFÍA

- [1]González, A. “*Estudio del protocolo IEEE 488 mediante el desarrollo de una herramienta de simulación*”, Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2003.
- [2]Fernández, R. “*Comunicación inalámbrica de sistemas IEEE 488 mediante una picored bluetooth*”, Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2005.
- [3]García, J. “*Administración de los recursos de un laboratorio de comunicaciones digitales mediante su instalación, configuración y puesta en funcionamiento*”, Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2004.
- [4]Tumanski, S. “*Principles of Electrical Measurement*”, Editorial Taylor & Francis, Grupo Taylor & Francis, 2006.
- [5]Keithley. “*KEITHLEY, Model 236-237-238 Source Measure Units. Operator’s Manual*”, Keithley Instruments, 2001.
- [6]Keithley. “*KEITHLEY, Model 236-237-238 Source Measure Units. Quick Reference Guide*”, Keithley Instruments, 2001.
- [7]Seco, F. “*Conexión de Instrumentos de medida con GPIB*”, Instituto de Automática Industrial, 2005.
- [8]Tooley, M. Winder, S. “*Newnes Data Communications Pocket Book*”, British Library, 2002.
- [9]Keithley. “*Data Acquisition and Control Handbook. A Guide to Hardware and Software for Computer-Based Measurement and Control*”, Keithley Instruments, 2001.
- [10]McGillivray, M. “*Instrument Systems*”, Editorial McGraw-Hill, 2000.
- [11]Riu, P. Rosell, F. Ramon, J. “*Sistemas de instrumentación*”, Ediciones UPC, 1995.
- [12]Louden, K. “*Lenguajes de programación*”, Thomson Paraninfo 2004.
- [13]Antoni, M. Sánchez, F. Domingo, B. “*Instrumentación virtual: adquisición, procesado y análisis de señales*”, Ediciones UPC, 2001.
- [14]Agilent, “*VEE Pro User’s Guide*”, Agilent Technologies, 2003.
- [15]Deitel, Deitel, “*C++ Cómo programar*”, Editorial Prentice Hall, 2003.
- [16]Glot, A. Skuratovsky, I. “*Non-Ohmic conduction in tin dioxide based varistor ceramics*”, Material Chemistry and Physics, 2006.
- [17]Fernández, H. Caballero, A. Frutos, J. Fernández, F. “*Espectroscopia de admitancias de banda ancha aplicada al control microestructural de propiedades eléctricas en varistores cerámicos*”, Cerámica y vidrio, 2004.
- [18]Bondarchuk, A. Glot, A. Mazurik, S. Jones, B. Bulpett, R. Verma, N. “*Effect of Sintering Temperature and Heat Treatment on Electrical Properties of Indium Oxide Based Ceramics*”, 2003.
- [19] C.Li, J. Wang, X. Wang, H. Chen, W. Su, “*Nonlinear electrical properties of Ta-doped capacitor-varistor ceramics*”, Materials Chemistry and Physics, 2002.
- [20]Zola, G. “*Correlación entre ondas de ensayo para dispositivos supresores de sobretensiones*”, Ingeniería y Ciencia, 2008.
- [21] Pianaro, S.A., Bueno, P.R., Longo, E and Varela, J.A., “*Microstructure and electrical properties of a SnO₂ based varistor*”, Ceramics International, 1999, 25, 1-6

URLS

[URL1] EPCOS, *General Technical Information*, disponible en <http://www.epcos.com>

[URL 2] KEITHLEY, *Productos para fuente y medición de corriente/voltaje*, disponible en <http://www.keithley.cl>

[URL 3] Agilent Technologies, *Página Electrónica* disponible en <http://www.agilent.com/>

APÉNDICE A: Especificaciones básicas de la norma IEEE 488

Tabla A.1 Especificaciones básicas de la norma IEEE 488 [22]

Versión de la normal	Tipo de Especificación	Concepto	Descripción
IEEE 488.1	Mecánicas	Configuración del bus	Estrella o Lineal
		Longitud del bus	2m entre instrumento y 20m de longitud máxima.
		Conector	Hembra (Instrumento) y macho y hembra (cable).
	Eléctricas	"1" lógico en la salida	0 - 0.5V
		"1" lógico en la entrada	-0.6 - 0.8V
		"0" lógico en la salida	2.4 – 5V
		"0" lógico en la entrada	2 – 5.5V
		Tipos de instrumentos	Controlador (Controller)
		Emisor (Talker)	
		Receptor (Listener)	
		Número de instrumentos conectados	
		Máximo 15	
		Número de instrumentos activos	Más de la mitad de instrumentos conectados deben estar encendidos
		Velocidad	Máxima 1MBps
		(Distancias largas 200-300 Kbps).	
		Longitud de datos y comandos	8 bits (1 Byte) en código ASCII o binario
		Tipos de comandos	34 principales y 32 secundarias
Mecanismo de sondeo o consulta	Serial (Serial polling) y Paralelo (Parallel polling)		
IEEE 488.2	Procedimiento	Estructura de datos y sintaxis	Código ASCII, Hexadecimal y Octal.

APÉNDICE B: Manual de usuario

La interfaz es considerada un elemento esencial del sistema de medición cuyo objetivo consiste en obtener información del usuario para configurar la UFM Keithley 237. Se integra por cuatro menús emergentes (pantallas) que realizarán los trabajos de:

- 1) Presentar el programa.
- 2) Identificar al usuario (o experimentador) y a la muestra sujeta a investigación.
- 3) Obtener los datos para la configuración de la UFM Keithley 237.
- 4) Mostrar un resumen de los datos proporcionados por el usuario para su verificación.
- 5) Presentar gráficamente los datos de medición.

El primer menú que se muestra en pantalla al ejecutar el programa (Figura B.1), tiene por objetivo informar al usuario el equipo que va a configurar.



Figura B.1 Menú inicial

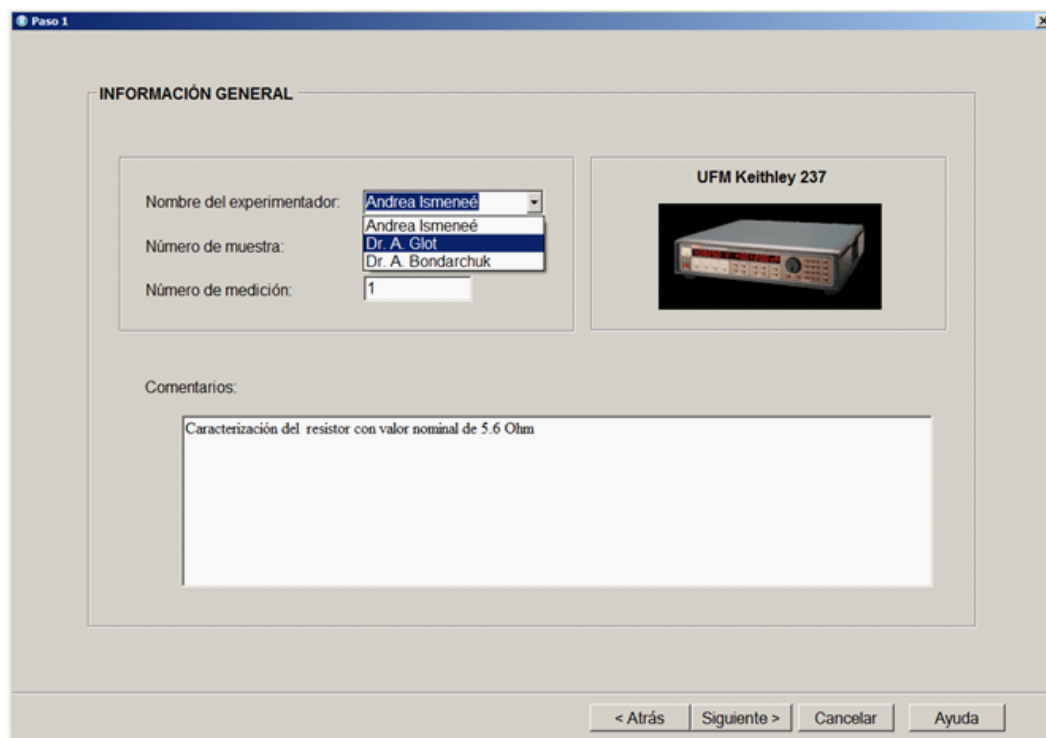
Al dar clic en el botón de “Siguiente” se abrirá el menú para solicitar la información general acerca de la medición a realizar (Figura B.2). En este caso la información solicitada es:

- 1) Nombre del experimentador.
- 2) Número de muestra.
- 3) Número de medición.
- 4) Comentarios.

Con esta información se genera el nombre del archivo de resultados y se escriben los datos acerca del experimentador y de la muestra en la cabecera del archivo.

En el siguiente menú (Figura B.3) se debe especificar el modo de trabajo en que se quiere usar la UFM Keithley 237. Como medida de seguridad se debe verificar que en el panel frontal de Keithley 237 esté configurado correctamente el modo de trabajo seleccionado (el panel frontal de Keithley 237 debe tener la luz tildada en el botón “SOURCE MEASURE”) y marcar el cuadro de verificación del equipo, enseguida se deben proporcionar los parámetros de la señal, el modo de cambio de señal, y el tipo de señal que se desea aplicar a la muestra cerámica sujeta a investigación para su caracterización.

El último menú (Figura B.4) que se muestra es un resumen de los pasos anteriores con el objetivo de que el usuario verifique sus datos. Si todo es correcto se selecciona la casilla (¿TODO ES CORRECTO?) y se inicia la medición. Pero si algún dato proporcionado para la configuración no es el adecuado, el usuario pueda dar clic en el botón de “Atrás” y regresar para configurar correctamente el equipo.



The screenshot shows a software window titled "Paso 1" with a close button in the top right corner. The main content area is titled "INFORMACIÓN GENERAL" and contains several input fields and a text area. On the left, there are three fields: "Nombre del experimentador:" with a dropdown menu showing "Andrea Ismeneé" (highlighted), "Número de muestra:" with a dropdown menu showing "Dr. A. Glot" (highlighted), and "Número de medición:" with a text input field containing "1". To the right of these fields is a box titled "UFM Keithley 237" containing a photograph of the device. Below these fields is a "Comentarios:" label followed by a large text area containing the text "Caracterización del resistor con valor nominal de 5.6 Ohm". At the bottom of the window, there are four buttons: "< Atrás", "Siguiente >", "Cancelar", and "Ayuda".

Figura B.2 Menú para solicitar la información general acerca de la medición a realizar

Paso 2 CONFIGURACIÓN DE LA FUENTE Y UNIDAD DE MEDICIÓN KEITHLEY 237

1. MODO DE TRABAJO DE K237

U-Fuente I-Medidor
 I-Fuente U-Medidor

2. VERIFICACIÓN DEL EQUIPO

Keithley 237, esta en el modo correcto?

3. PARÁMETROS DE LA SEÑAL

Uinicio [V] / Iinicio [A]
 Ufin [V] / Ifin [A]
 Upaso [V] / Ipasso [A]
 Imax [A]

4. MODO DE CAMBIO DE LA SEÑAL

5. TIPO DE SEÑAL

Impulso
 ti[ms]
 tp[ms]

Escalón
 ti[ms]

< Atrás Siguiente > Cancelar Ayuda

Figura B.3 Menú para solicitar los datos para la configuración de la fuente y unidad de medición Keithley 237

Paso 3 DATOS FINALES PARA LA MEDICIÓN

1. Modo de trabajo de K237:

2. Modo de cambio de señal:

3. Tipo de señal:

4. Parámetros de la señal

Uinicio [V] / Iinicio [A]
 Ufin [V] / Ifin [A]
 Upaso [V] / Ipasso [A]
 Imax [A]

5. INVESTIGADOR

El RESULTADO de su medición se guardará en un archivo, (ruta)

Comentarios:

¿TODO ES CORRECTO? LISTO PARA INICIAR LA MEDICIÓN

< Atrás Siguiente > Cancelar Ayuda

Figura B.4 Menú para mostrar y verificar los datos para la configuración de la fuente y unidad de medición Keithley 237

APÉNDICE C: Empleo de la herramienta TRTest

TRTest es una aplicación para control GPIB diseñada por compañía CEC (Capital Equipment Corporation). Esta aplicación es bajo MS-DOS. Los datos son enviados y recibidos respectivamente a través de funciones (Figura C.1).

Con TRTest se puede verificar la comunicación y el funcionamiento del equipo de una forma sencilla y clara. Para esto es importante considerar dos cosas. Primero se debe verificar que el instrumento esté correctamente configurado y conectado para la comunicación GPIB, después se debe tener claramente identificada la dirección GPIB del instrumento (la mayoría de los instrumentos muestran la dirección GPIB cuando inician). Enseguida se debe ejecutar TEST488 en una línea de comandos (C:\CEC488> test488) para probar y conocer el estado de la tarjeta. Después se debe ejecutar TRTest.

```
CEC488 Interactive Utility, v2.0. Copyright(C) 1997 CEC.

Main functions      Configuration      Inquiry
I> Initialize      P> SetPort        BP> BoardPresent?
S> Send            ST> SetTimeout    LP> ListenerPresent?
E> Enter          SI> SetInputEOS   F> Feature?
SP> Spoll         SO> SetOutputEOS SRQ> SRQ?
PP> Ppoll         B> BoardSelect
T> Transmit       D> DmaChannel

R> Receive
IA> Iarray
RA> Rarray

Q> Quit

Choose a function: I
Myaddr: _
```

Figura C.1 Aplicación “TRTEST” para control GPIB diseñada por CEC. Comandos

Para comprobar el correcto funcionamiento de la fuente y unidad de medición Keithley 237 se enviaron una serie de comandos a través de la herramienta TRTest (en las Tablas 2.11 y 2.12 se detallan estas funciones).

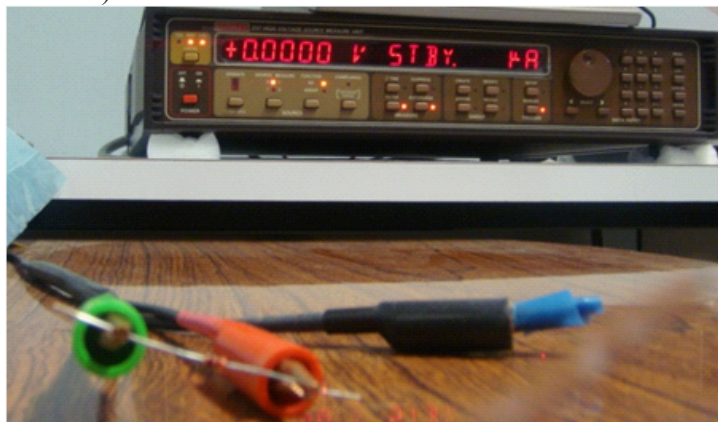


Figura C.2 Respuesta de Keithley 237 a la aplicación “TRTEST” para control GPIB diseñada por CEC

APÉNDICE D: Pruebas estructurales

Se realizaron este tipo de pruebas al programa con el propósito de verificar que la estructura interna de los módulos sea la correcta; por lo que se trato de cubrir todas las posibles combinaciones de parámetros, valores de variables y caminos de ejecución.

Para realizar las pruebas estructurales a cada función de los módulos que integran el programa que siguieron una secuencia de pasos. A continuación se describe el proceso para efectuar la prueba estructural a la función de inicialización y configuración de la fuente y unidad de medición Keithley 237 (las demás pruebas siguieron el mismo orden por lo cual no se presentan).

1. Enumeración del código: agrupar el código.

void UFM237 (void){ 1. char temp_1[50], temp_2[50]; 2. int status;	1
3. initialize (21,0); 4. send (K237,"BREAK", &status); 5. printf("status=%d\n",status); 6. send (K237, "RESET", &status); 7. printf("status=%d\n",status); 8. send (K237,"REMOTE 716",&status); 9. printf("status=%d\n",status); 10.Sleep(t); 11.send (K237,"CLEAR", &status); 12.printf("status=%d\n",status); 13. Sleep(t);	2
14. if ((bandera0==1) (bandera0==3)) {	3
15. send (K237,"F0,0X",&status); 16. Sleep(t); 17. temp_1[0]='\0'; 18. gcvt((Imax+0.1*Imax),10,temp_1); 19. temp_2[0]='L';temp_2[1]='\0'; 20. strcat(temp_2,temp_1); 21. strcat(temp_2,"0X"); 22. printf(" : %s\n",temp_2);	4
23. if ((Imax+0.1*Imax)>9.8e-3){	5
24. send (K237,"L9.5E-3,0X",&status);}	6

25. else {send (K237,temp_2,&status); p rintf(“\nOk!”);}	7
26. printf(“status=%d\n”,status); }	8
27. if (bandera0==2) {	9
28. send (K237,”F1,0X”,&status); 29. Sleep(t); 30. send (K237,”L1001,0X”,&status); 31. printf(“status=%d\n”,status);}	10
32. printf(“status=%d\n”,status); 33. Sleep(t); 34. send (K237,”O0X”,&status); 35. Sleep(t); 36. send (K237,”S1X”,&status); 37. Sleep(t); 38. send (K237,”B0,0,0X”,&status); 39. printf(“status=%d\n”,status); 40. Sleep(t); 41. send (K237,”G4,2,0X”,&status); 42. Sleep(t); 43. send (K237,”H0X”,&status);	11
}	12

2. Diseño del grafo de flujo: En base a la enumeración del código (realizada en el paso 1) dibujamos el código con grafos de flujo.

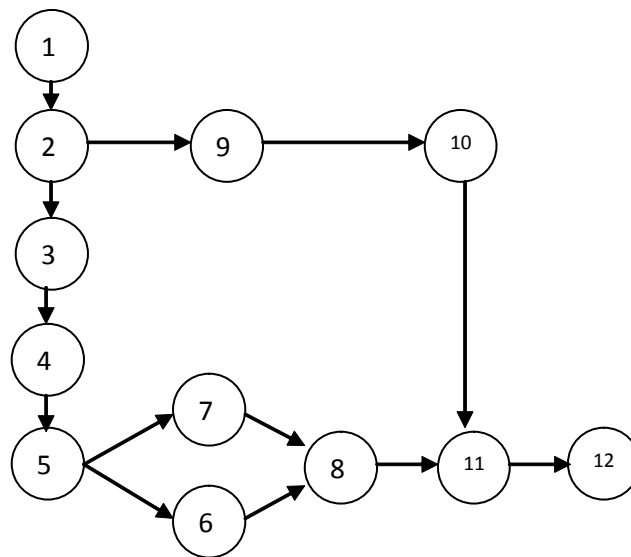


Figura D.1 Dibujo del código con grafos de flujo

3. Dibujamos el código con grafos de flujo y asignamos regiones.

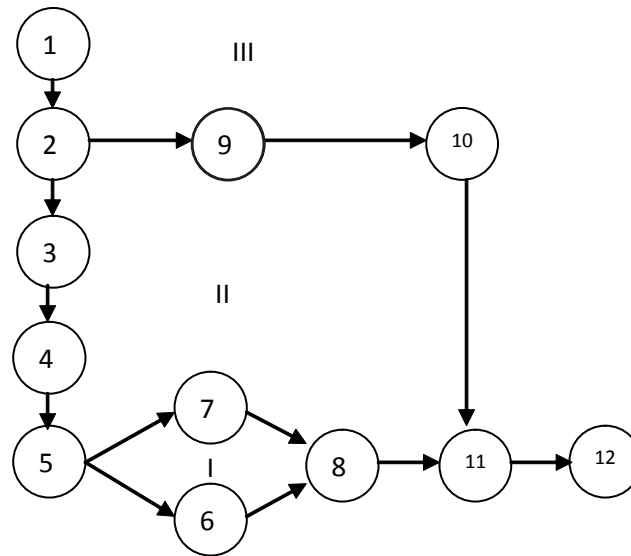


Figura D.2 Dibujo del código con grafos de flujo e identificación de regiones

4. Establecemos los caminos recorriendo las regiones.

Tabla D.1 Casos de prueba		
Camino	Región	Nodos
C_1	I	1,2,3,4,5,7,8,11,12
C_2	II	1,2,3,4,5,6,8,11,12
C_3	III	1,2,9,10,11,12

5. Aplicamos la cobertura de decisión.

Tabla D.2 Tabla de cobertura de decisión			
Camino	L 14	L23	L27
C_1	Verdadero	Falso	Falso
C_2	Verdadero	Verdadero	Falso
C_3	Falso	----	----

L14 : if ((bandera0==1)|| (bandera0==3))

L23: if ((Imax+0.1*Imax)>9.8e-3)

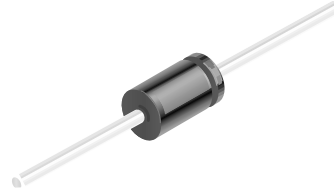
L27: if (bandera0==2)



1N4001 - 1N4007

Features

- Low forward voltage drop.
- High surge current capability.



DO-41
COLOR BAND DENOTES CATHODE

General Purpose Rectifiers

Absolute Maximum Ratings* T_A = 25°C unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value							Units
		4001	4002	4003	4004	4005	4006	4007	
V _{RRM}	Peak Repetitive Reverse Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V
I _{F(AV)}	Average Rectified Forward Current, .375" lead length @ T _A = 75°C	1.0							A
I _{FSM}	Non-repetitive Peak Forward Surge Current 8.3 ms Single Half-Sine-Wave	30							A
T _{stg}	Storage Temperature Range	-55 to +175							°C
T _J	Operating Junction Temperature	-55 to +175							°C

*These ratings are limiting values above which the serviceability of any semiconductor device may be impaired.

Thermal Characteristics

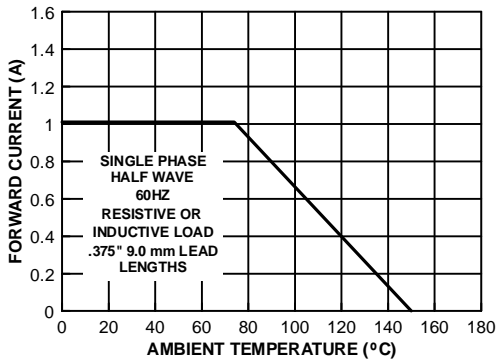
Symbol	Parameter	Value	Units
P _D	Power Dissipation	3.0	W
R _{θJA}	Thermal Resistance, Junction to Ambient	50	°C/W

Electrical Characteristics T_A = 25°C unless otherwise noted

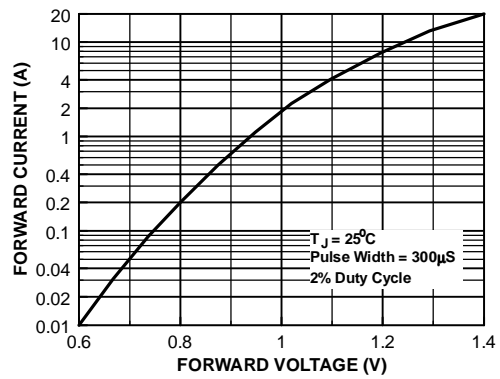
Symbol	Parameter	Device							Units
		4001	4002	4003	4004	4005	4006	4007	
V _F	Forward Voltage @ 1.0 A	1.1							V
I _{rr}	Maximum Full Load Reverse Current, Full Cycle T _A = 75°C	30							μA
I _R	Reverse Current @ rated V _R T _A = 25°C T _A = 100°C	5.0 500							μA μA
C _T	Total Capacitance V _R = 4.0 V, f = 1.0 MHz	15							pF

Typical Characteristics

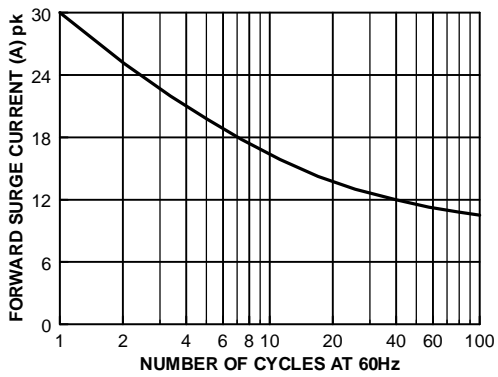
Forward Current Derating Curve



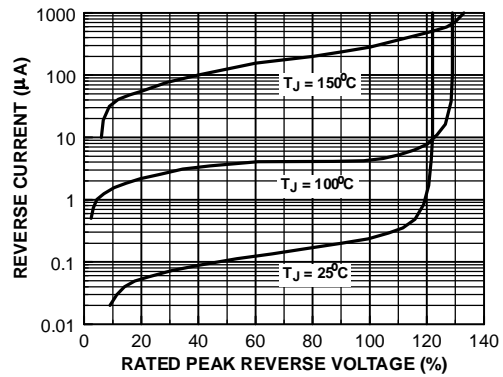
Forward Characteristics



Non-Repetitive Surge Current



Reverse Characteristics



Zeners

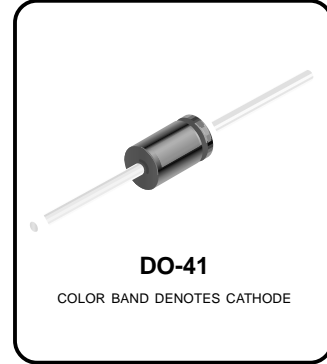
1N4728A - 1N4752A

Absolute Maximum Ratings*

T_A = 25°C unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
P _D	Power Dissipation Derate above 50°C	1.0	W
		6.67	mW/°C
T _{STG}	Storage Temperature Range	-65 to +200	°C
T _J	Operating Junction Temperature	+ 200	°C
R _{θJL}	Thermal resistance Junction to Lead	53.5	°C/W
R _{θJA}	Thermal resistance Junction to Ambient	100	°C/W
	Lead Temperature (1/16" from case for 10 seconds)	+ 230	°C
	Surge Power**	10	W

Tolerance: A = 5%



*These ratings are limiting values above which the serviceability of the diode may be impaired.

**Non-recurrent square wave PW = 8.3 ms, TA = 55 degrees C.

NOTES:

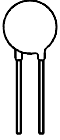
- 1) These ratings are based on a maximum junction temperature of 200 degrees C.
- 2) These are steady state limits. The factory should be consulted on applications involving pulsed or low duty cycle operations.

Electrical Characteristics

T_A = 25°C unless otherwise noted

Device	V _Z (V)	Z _Z (Ω)	@ I _{ZT} (mA)	Z _{ZK} (Ω)	@ I _{ZK} (mA)	V _R (V)	@ I _R (μA)	I _{SURGE} (mA)	I _{ZM} (mA)
1N4728A	3.3	10	76	400	1.0	1.0	100	1380	276
1N4729A	3.6	10	69	400	1.0	1.0	100	1260	252
1N4730A	3.9	9.0	64	400	1.0	1.0	50	1190	234
1N4731A	4.3	9.0	58	400	1.0	1.0	10	1070	217
1N4732A	4.7	8.0	53	500	1.0	1.0	10	970	193
1N4733A	5.1	7.0	49	550	1.0	1.0	10	890	178
1N4734A	5.6	5.0	45	600	1.0	2.0	10	810	162
1N4735A	6.2	2.0	41	700	1.0	3.0	10	730	146
1N4736A	6.8	3.5	37	700	1.0	4.0	10	660	133
1N4737A	7.5	4.0	34	700	0.5	5.0	10	605	121
1N4738A	8.2	4.5	31	700	0.5	6.0	10	550	110
1N4739A	9.1	5.0	28	700	0.5	7.0	10	500	100
1N4740A	10	7.0	25	700	0.25	7.6	10	454	91
1N4741A	11	8.0	23	700	0.25	8.4	5.0	414	83
1N4742A	12	9.0	21	700	0.25	9.1	5.0	380	76
1N4743A	13	10	19	700	0.25	9.9	5.0	344	69
1N4744A	15	14	17	700	0.25	11.4	5.0	304	61
1N4745A	16	16	15.5	700	0.25	12.2	5.0	285	57
1N4746A	18	20	14	750	0.25	13.7	5.0	250	50
1N4747A	20	22	12.5	750	0.25	15.2	5.0	225	45
1N4748A	22	23	11.5	750	0.25	16.7	5.0	205	41
1N4749A	24	25	10.5	750	0.25	18.2	5.0	190	38
1N4750A	27	35	9.5	750	0.25	20.6	5.0	170	34
1N4751A	30	40	8.5	1000	0.25	22.8	5.0	150	30
1N4752A	33	45	7.5	1000	0.25	25.1	5.0	135	27

V_F Forward Voltage = 1.2 V Maximum @ I_F = 200 mA for all 1N4700 series


Leaded Varistors
Standard Series
Maximum ratings ($T_A = 85\text{ °C}$)

Type (untaped)	Ordering code	V_{RMS}	V_{DC}	i_{max} 8/20 μ s	W_{max} (2 ms)	P_{max}
SIOV-		V	V	A	J	W
S05K11	B72205S0110K101	11	14	100	0,3	0,01
S07K11	B72207S0110K101	11	14	250	0,8	0,02
S10K11	B72210S0110K101	11	14	500	1,7	0,05
S14K11	B72214S0110K101	11	14	1000	3,2	0,10
S20K11	B72220S0110K101	11	14	2000	10,0	0,20
S05K14	B72205S0140K101	14	18	100	0,4	0,01
S07K14	B72207S0140K101	14	18 ¹⁾	250	0,9	0,02
S10K14	B72210S0140K101	14	18 ¹⁾	500	2,0	0,05
S14K14	B72214S0140K101	14	18 ¹⁾	1000	4,0	0,10
S20K14	B72220S0140K101	14	18 ¹⁾	2000	12,0	0,20
S05K17	B72205S0170K101	17	22	100	0,5	0,01
S07K17	B72207S0170K101	17	22	250	1,1	0,02
S10K17	B72210S0170K101	17	22	500	2,5	0,05
S14K17	B72214S0170K101	17	22	1000	5,0	0,10
S20K17	B72220S0170K101	17	22	2000	14,0	0,20
S05K20	B72205S0200K101	20	26	100	0,6	0,01
S07K20	B72207S0200K101	20	26	250	1,3	0,02
S10K20	B72210S0200K101	20	26	500	3,1	0,05
S14K20	B72214S0200K101	20	26	1000	6,0	0,10
S20K20	B72220S0200K101	20	26	2000	18,0	0,20
S05K25	B72205S0250K101	25	31	100	0,7	0,01
S07K25	B72207S0250K101	25	31	250	1,6	0,02
S10K25	B72210S0250K101	25	31	500	3,7	0,05
S14K25	B72214S0250K101	25	31	1000	7,0	0,10
S20K25	B72220S0250K101	25	31	2000	22,0	0,20
S05K30	B72205S0300K101	30	38	100	0,9	0,01
S07K30	B72207S0300K101	30	38	250	2,0	0,02
S10K30	B72210S0300K101	30	38	500	4,4	0,05
S14K30	B72214S0300K101	30	38	1000	9,0	0,10
S20K30	B72220S0300K101	30	38	2000	26,0	0,20

1) Jump-start strength (max. 24 V, 5 minutes)

APÉNDICE F: Estimación del coeficiente de no linealidad (β)

El coeficiente de no linealidad (β) es determinado por los valores de la resistencia estática ($R_e=U/I$) y de la resistencia dinámica ($R_d=dU/dI$). Esto es:

$$\beta = \frac{R_e}{R_d} = \frac{U dI}{I dU} \approx \frac{U \Delta I}{I \Delta U} \quad (1)$$

Fundamentado en lo anterior, el programa realiza una estimación del valor de β utilizando la siguiente técnica.

Se considera que $\Delta U = U_{n+1} - U_{n-1}$ y $\Delta I = I_{n+1} - I_{n-1}$ se puede aproximar la característica $I(U)$ por medio de una serie de segmentos en línea recta. Si consideramos la Figura 1 y el uso de tres puntos, se puede calcular el valor de β con la siguiente expresión

$$\beta = \frac{U_n}{I_n} \cdot \frac{I_{n+1} - I_{n-1}}{U_{n+1} - U_{n-1}} \quad (3)$$

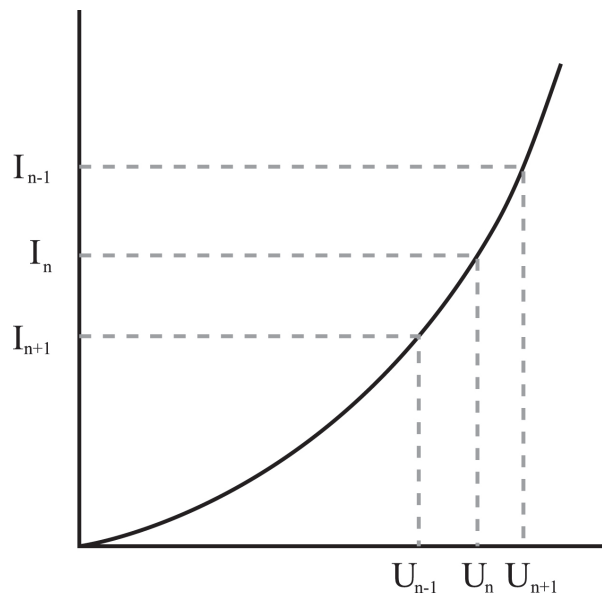


Figura F.1. Aproximación del coeficiente de no linealidad (β)

APÉNDICE G: Mediciones realizadas a varistores

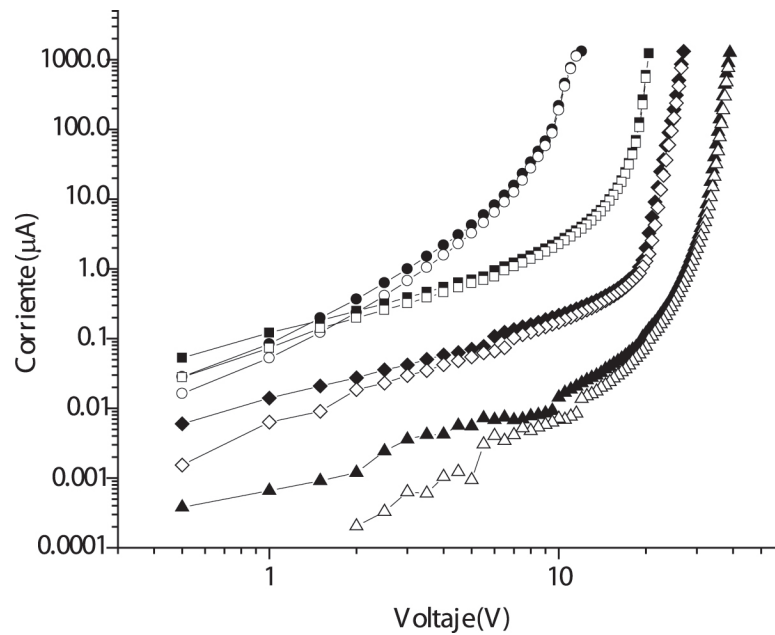


Figura G.1. Característica corriente voltaje de los varistores S07K25 ($\beta=26.57$), S10K17 ($\beta=24.9$), S20K14 ($\beta=32.0$) y S05K11 ($\beta=9.71$). Señal aplicada impulso de voltaje 10ms/100ms

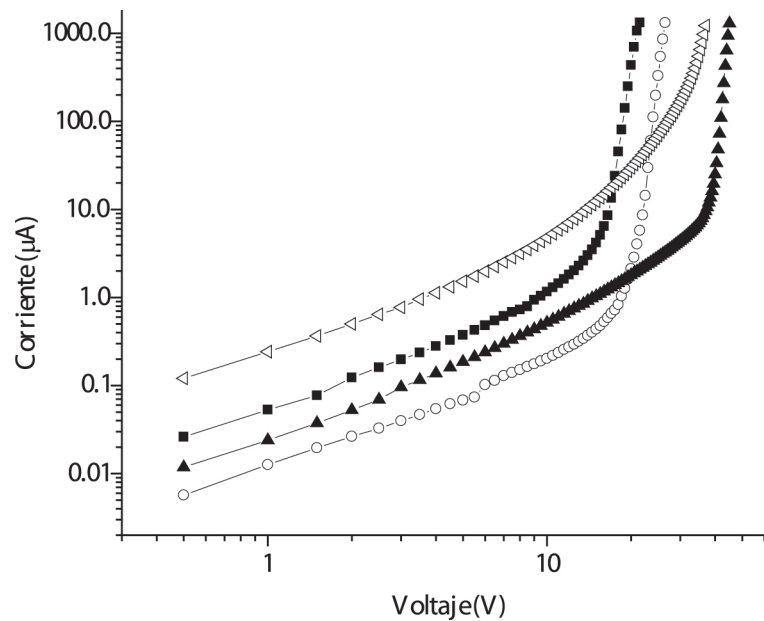


Figura G.2. Característica corriente voltaje de los varistores S10K17($\beta=23.5$), S014K14 ($\beta=18.6$), Positron (33V, $\beta=16.4$) y Positron (47V, $\beta=31.6$). Señal aplicada impulso de voltaje 10ms/100ms

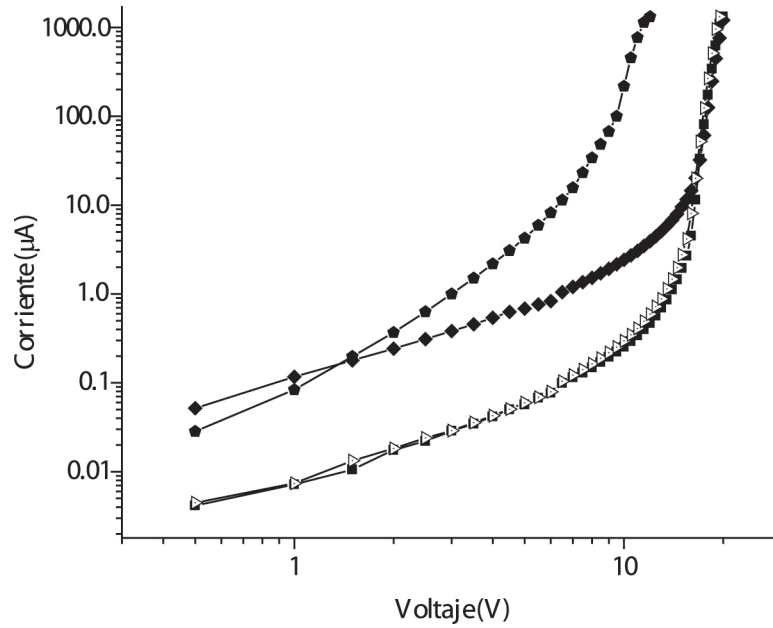


Figura G.3. Característica corriente voltaje de los varistores S20K14 ($\beta=19.5$), S05K11 ($\beta=22.9$), S05K11 ($\beta=9.7$) y S05K11 ($\beta=15.9$). Señal aplicada impulso de voltaje 10ms/100ms

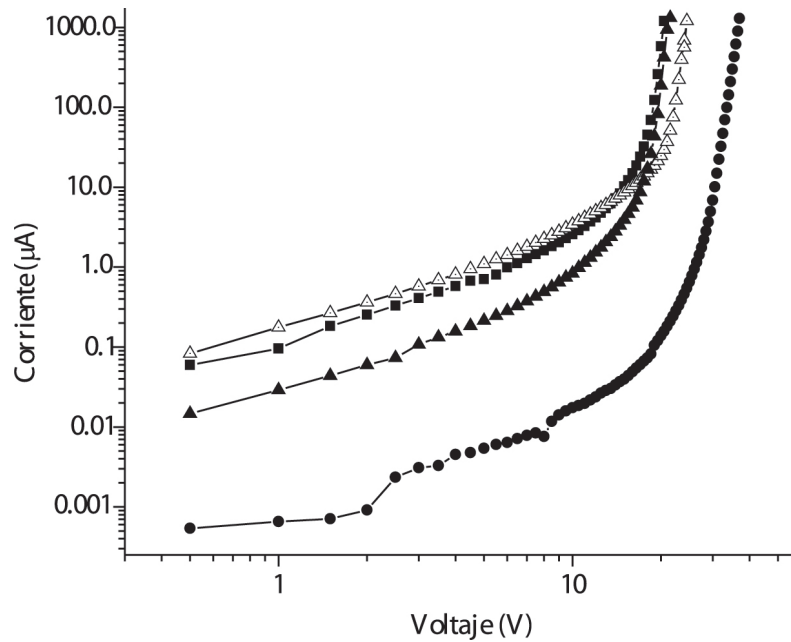


Figura G.4. Característica corriente voltaje de los varistores S20K14 ($\beta=32.5$), S07K25 ($\beta=27.7$), Positron (22V, $\beta=20.11$) y Positron (22V, $\beta=28.4$). Señal aplicada impulso de voltaje 10ms/100ms