

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**“DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA LCR-MEDIDOR QUADTECH
7600 E INVESTIGACIÓN DE MATERIALES CERÁMICOS”**

**TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN**

**PRESENTA
L.I. FRANCISCO DE JESÚS FERIA SILVA**

**DIRECTORES DE TESIS
DR. OLEXANDR GLOT
DR. OLEXANDR BONDARCHUK**

HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA, FEBRERO DE 2012

Tesis presentada el 29 de febrero de 2012.
ante los siguientes sinodales:
Dr. Agustín Santiago Alvarado
Dr. José Aníbal Arias Aguilar
Dr. Santiago Omar Caballero Morales

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

DEDICATORIA | Dedicatoria

A ti mamá, gracias por siempre estar a mi lado, porque gracias a ti yo estoy aquí, por todo el apoyo y paciencia que has tenido conmigo desde que supiste mi deseo por alcanzar otra de mis metas, esto es fruto de lo que siempre me has enseñado con hechos y no palabras.

A ti papa, que siempre me has enseñado que los mayores logros en la vida son obra de un gran esfuerzo, y que los sueños más difíciles de alcanzar son los que más valoras, gracias por darme ambiciones para no caer y siempre seguir adelante.

A mi hermanita, porque siempre ha estado conmigo, me ha apoyado incondicionalmente y me enseñó que el cariño y amor no es otra cosa que el deseo inevitable por ayudar a los demás.

A mi novia, por siempre motivarme en los momentos críticos, por su gran amor, porque desde que estamos juntos me hizo creer en él y me ayudó a descubrir que no es una fantasía si no una realidad estando a su lado,

A mi grande y bella FAMILIA que es una bendición porque siempre existe el aprecio, cariño y amor para ayudarnos. porque desde niño recuerdo con orgullo sus reuniones llenas de risas, porque siempre existe un pretexto para estar juntos para continuar el show y hacerme olvidar los malos momentos.

AGRADECIMIENTOS | Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a Dios, por permitirme llegar hasta este momento tan especial en mi vida por siempre estar a mi lado, por su infinito amor, por los triunfos y los momentos difíciles que me han enseñado a valorarte.

Agradezco a mis asesores de tesis, Dr. Olexandr Glot y Dr. Olexandr Bondarchuk por sus valiosas asesorías, por todos los conocimientos que compartieron conmigo, y por enseñarme que las metas y propósitos se deben cumplir con responsabilidad y arduo trabajo, por su paciencia y preciado tiempo, además de la dedicación y compromiso a este trabajo de tesis.

Quiero agradecer a la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM) por la oportunidad brindada para realizar mis estudios de maestría, así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

*Al Dr. Agustín Santiago Alvarado por su paciencia, su tiempo y porque siempre me brindo su apoyo,
Mi más sincero agradecimiento*

Al Dr. José Aníbal Arias Aguilar por las aportaciones hechas al presente trabajo, por sus excelentes consejos, y sobre todo por su valiosa amistad.

Al Dr. Santiago Omar Caballero Morales, por su comprensión Su ayuda y tiempo dedicado a la revisión de la presente tesis.

RESUMEN | Abstract

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo general el desarrollar un software para la administración de LCR-medidor QuadTech 7600 y la fuente de voltaje Keithley 6487 y realizar una investigación de las propiedades dieléctricas de nuevos materiales cerámicos.

El software se desarrolló bajo una codificación en lenguaje C++ utilizando el entorno de desarrollo integrado “Microsoft Visual Studio 2008”, y la librería “IEEE_32.H” proporcionada por el fabricante para la comunicación entre la PC y los equipos LCR-medidor QuadTech 7600 y la fuente de voltaje Keithley 6487.

El software favorece la configuración de la fuente y la unidad de medición, almacena el resultado de las mediciones, y grafica los siguientes valores:

1. Capacitancia (C) y conductancia (G) vs voltaje directo (U);
2. Capacitancia (C) y conductancia (G) vs frecuencia (f) para voltaje directo fijo;
3. Capacitancia (C) y conductancia (G) a un voltaje directo fijo (U) como la función de tiempo t.

Finalmente almacena los valores de la medición en un archivo de texto plano (.txt). Usando este sistema de medición se realizó una investigación, estudiando las características eléctricas de varistores cerámicos a base $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ después de tratamientos térmicos adicionales con diferentes modos de enfriamiento en muestras sinterizadas a 1300°C y 1400°C .

ABSTRACT

This Thesis has the general objective of developing software for manage the LCR-measurer QuadTech 7600 and the Keithley 6487 voltage source and perform a research about the dielectrical properties of new ceramic materials.

The software was developed under C++ language codification, using the “Microsoft Visual Studio 2008” integrated development environment, and the “IEEE_32.H” library given by the manufacturer for the communication between the PC and the LCR-measurer QuadTech 7600 and voltage source Keithley 6487.

The software improves the configuration of the source and measurement unit, stores the results of measurements, and it graphs the next values:

1. Capacitance (C) and conductance (G) vs. direct voltage (U);
2. Capacitance (C) and conductance (G) vs. frequency (f) for fix direct voltage.
3. Capacitance (C) and conductance (G) to a fix direct voltage (U) as function of time t .

Finally the software stores the values from de measurement into a plane text file (.txt). Using this measuring system, it was performed a research, by studying electric characteristics of ceramic varistors based on SnO₂-Co₃O₄-Nb₂O₅-Cr₂O₃ after additional termic treatments with different cooling modes in sintered samples at 1300°C and 1400°C.

INDICE GENERAL

DEDICATORIA Dedicatoria	IV
AGRADECIMIENTOS Agradecimientos.....	V
RESUMEN Abstract	VII
INDICE GENERAL	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	- 16 -
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	- 17 -
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	- 19 -
1.3 HIPÓTESIS.....	- 19 -
1.4 OBJETIVO DEL PROYECTO	- 20 -
1.4.1 <i>Objetivos específicos</i>	- 20 -
1.5 METAS.....	- 20 -
1.6 METODOLOGÍA	- 21 -
1.7 CONTENIDO DEL DOCUMENTO DE TESIS.....	- 23 -

CAPÍTULO 2

MARCO TEORICO.....	- 24 -
2.1 IMPEDANCIA Y ADMITANCIA.....	- 24 -
2.2 CAPACITORES.....	- 26 -
2.2.1 <i>Tipos de Capacitores</i>	- 26 -
2.2.2 Capacitores fijos	- 26 -
2.2.3 Capacitores variables	- 29 -
2.3 VARISTORES.....	- 29 -
2.3.1 <i>Varistores de ZnO</i>	- 29 -
2.3.2 <i>Varistores de SnO₂</i>	- 30 -
2.3 CARACTERÍSTICAS DE LCR-MEDIDOR QUADTECH 7600	- 31 -
2.4 CARACTERÍSTICAS DE LA FUENTE DE VOLTAJE KEITHLEY MODELO 6487	- 34 -
2.5 TARJETA KPCI-488	- 36 -
2.5.1 <i>Datos generales</i>	- 36 -
2.5.2 <i>Lenguajes de programación recomendados por el fabricante de la tarjeta</i>	- 37 -
2.5.2.1 Ensamblador	- 38 -
2.5.2.2 Turbo Pascal	- 38 -
2.5.2.3 C++.....	- 38 -
2.5.2.4 Visual Basic.....	- 39 -
2.5.2.5 Lenguaje de programación visual LabVIEW.....	- 39 -
2.6 INTERFAZ GPIB (IEEE 488).....	- 40 -

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL SISTEMA	- 43 -
3.1 COMPONENTES DEL SISTEMA	- 44 -
3.2 REQUISITOS DEL SOFTWARE.....	- 45 -
3.3 PLATAFORMA DE DESARROLLO DEL SOFTWARE	- 48 -

3.4 MODELO PRESCRIPTIVO DEL PROCESO	- 49 -
3.5 DISEÑO DEL SOFTWARE	- 50 -
3.5.1 <i>Diseño modular del software</i>	- 50 -
3.5.2 <i>Módulos para envío de comandos a LCR-medidor por medio del software</i>	- 55 -
CAPÍTULO 4	
PRUEBAS AL SISTEMA.....	- 58 -
4.1 PRUEBAS APLICADAS AL HARDWARE	- 59 -
4.2 PRUEBAS APLICADAS AL SOFTWARE	- 59 -
4.2.1 <i>Pruebas de ejecución de comandos</i>	- 59 -
4.2.2 <i>Pruebas de caja negra</i>	- 62 -
4.2.3 <i>Pruebas de Acceso</i>	- 63 -
4.3 PRUEBAS AL SISTEMA DE MEDICIONES CON DISPOSITIVOS COMERCIALES	- 63 -
4.3.1 <i>Primer prueba: Capacitancia (C) y conductancia (G) vs frecuencia (f)</i>	- 64 -
4.3.2 <i>Segunda prueba: Capacitancia (C) y conductancia (G) vs voltaje directo (U)</i> .	- 66 -
4.3.3 <i>Tercer prueba: Capacitancia (C) y conductancia (G) a un voltaje directo fijo</i>)-	- 67 -
4.3.4 <i>Prueba de medición con un varistor comercial</i>	- 68 -
CAPÍTULO 5	
RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	- 70 -
5.1 INTRODUCCIÓN AL EXPERIMENTO	- 70 -
5.2 HIPÓTESIS DEL EXPERIMENTO	- 71 -
5.3 OBJETIVOS DEL EXPERIMENTO	- 72 -
5.4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	- 72 -
5.4.1 <i>Pasó 1: Fabricación de varistor cerámico a base de SnO₂</i>	- 72 -
5.4.1.1 Compactación	- 72 -
5.4.1.2 Sinterización	- 73 -
5.4.1.3 Caracterización	- 75 -
5.4.2 <i>Pasó 2: Tratamientos térmicos adicionales al varistor a base de SnO₂</i>	- 76 -
5.5 RESULTADOS OBTENIDOS.....	- 80 -
CAPÍTULO 6	
CONCLUSIONES	- 84 -
BIBLIOGRAFÍA Bibliografía	- 86 -
ANEXOS	
ANEXO 1. PUBLICACIÓN.....	- 89 -
ANEXO 2. MANUAL DE USUARIO	- 90 -

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones de LCR-medidor QuadTech 7600 [32]	-31-
Tabla 2. Especificaciones de LCR-medidor QuadTech 7600 (continuación) [32]	-32-
Tabla 3. Especificaciones de la Fuente KEITHLEY modelo 6487 [33]	-35-
Tabla 4. Especificaciones de la Fuente KEITHLEY modelo 6487(continuación1) [33]	-35-
Tabla 5. Especificaciones de la Fuente KEITHLEY modelo 6487 (continuación2) [33]	-36-
Tabla 6. Especificaciones de la Tarjeta KPCI- 488LP	-37-
Tabla 7. Requisitos funcionales del software	-47-
Tabla 8. Requisitos no funcionales del software	-47-
Tabla 9. Comandos básicos para programar LCR-medidor QuadTech 7600 y Keithley6487	-55-
Tabla 10. Casos de prueba A	-62-
Tabla 11. Casos de prueba B	-62-
Tabla 12. Casos de prueba C	-63-
Tabla 13. Casos de prueba D	-80-

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Elementos funcionales del software	-17-
Fig. 2 Elementos funcionales del hardware	-18-
Fig. 3 Metodología para el desarrollo	-22-
Fig. 4 Circuitos en serie y en paralelo para impedancias capacitivas e inductivas	-24-
Fig. 5 Diagramas de Fase de la Impedancia	-25-
Fig. 6 Diagramas de Fase de Admisión	-25-
Fig. 7 Estructura básica de un capacitor de mica apilada	-26-
Fig. 8 Capacitor de cerámica de multicapas con terminal radial	-27-
Fig. 9 Estructura de un capacitor de tantalio	-28-
Fig. 10 Capacitor de película de poliéster	-28-
Fig. 11 Capacitor de aire variable (a), Manufacturing Co. (b)	-29-
Fig. 12 Estructura hexagonal tipo wurtzita del ZnO.	-30-
Fig. 13 Estructura cristalina del SnO ₂	-30-
Fig. 14 Panel frontal de LCR - Medidor QuadTech 7600	-31-
Fig. 15 Panel frontal de la Fuente KEITHLEY modelo 6487	-34-
Fig. 16 Tarjeta KPCI-488	-37-
Fig. 17 Conector de la interfaz GPIB	-41-
Fig. 18 Configuración del sistema de medición	-43-
Fig. 19 Diagrama de módulos de comunicación	-44-
Fig. 20 Diagrama de casos de uso del sistema	-45-
Fig.21 Diagrama de requisitos funcionales	-46-
Fig.22 Diagrama de requisitos no funcionales	-46-
Fig. 23 Etapas del modelo en cascada	-49-
Fig. 24 Fases del modelo en cascada	-50-

Fig. 25 Pantalla de bienvenida al software	-51-
Fig. 26 Pantalla del software con el modo de medición capacitancia y conductancia vs frecuencia	-51-
Fig. 27 Pantalla del software con el modo capacitancia y conductancia vs voltaje directo	-52-
Fig. 28 Pantalla capacitancia y conductancia a un voltaje directo en función del tiempo t	-52-
Fig. 29 Diagrama de flujo del software	-53-
Fig. 30 Pantalla del graficado del software	-54-
Fig. 31 Secuencia de comandos para inicializar LCR-medidor QuadTech 7600	-56-
Fig. 32 Secuencia de comandos para la fuente de voltaje Keithley 6487	-57-
Fig. 33 Ciclo de pruebas	-58-
Fig. 34 Aplicación “TRTEST” para control GPIB diseñado por CEC	-59-
Fig. 35 Dibujo del código con grafos de flujo	-61-
Fig. 36 Dibujo del código con grafos de flujo e identificación de regiones	-61-
Fig. 37 Sistema de mediciones	-64-
Fig. 38 Circuito sencillo de capacitor y resistor en paralelo	-64-
Fig. 39 Tipos de mediciones en la interfaz del software	-65-
Fig. 40 Parámetros de la medición capacitancia y conductancia vs frecuencia	-65-
Fig. 41 Resultados de medición de capacitancia y conductancia vs frecuencia	-66-
Fig. 42 Tipo de medición capacitancia y conductancia vs voltaje directo	-66-
Fig. 43 Parámetros de la medición capacitancia y conductancia vs voltaje directo	-67-
Fig. 44 Configuración de equipo para medir Capacitancia (C) y conductancia (G) a un voltaje directo fijo (U) como la función de tiempo (t)	-67-
Fig. 45 Grafica de Capacitancia (C) y conductancia (G) a un voltaje directo fijo (U) como la función de tiempo t	-68-
Fig. 46 Curvas de Corriente-voltaje de un varistor obtenidas de un trazador de curvas TEKTRONIX 576.	-68-
Fig. 47 Sistema de medición bajo prueba en LCR	-69-
Fig. 48 Resultados de la medición C (U) de un varistor comercial	-69-

Fig. 49 MEBs de a) un varistor típico basado en y b) un varistor típico basado en ZnO	-71-
Fig. 50 Pesaje de la mezcla.	-72-
Fig. 51 Compactación de la tableta	-73-
Fig. 52 Sinterización de mezcla SNO ₂ -CO ₃ O ₄ -NB ₂ O ₅ -CR ₂ O ₃	-73-
Fig. 43 Horno tabular a 50°C	-74-
Fig. 54 Horno tabular a 480°C	-74-
Fig. 55 Muestra después de la sinterización	-74-
Fig. 56 Muestra con electrodos	-75-
Fig. 57 Ciclo térmico para fijación de electrodos	-75-
Fig. 58 Tratamiento térmico con enfriamiento lento	-76-
Fig. 59 Tratamiento térmico con enfriamiento brusco a partir de los 700°C	-77-
Fig. 60 Tratamiento térmico con enfriamiento brusco a partir de los 550°C	-78-
Fig. 61 Tratamiento térmico con enfriamiento brusco a partir de los 480°C	-79-
Fig. 62 Corriente/Voltaje con cerámica sinterizada a 1300°C	-81-
Fig. 63 Corriente/Voltaje con cerámica sinterizada a 1400°C	-82-
Fig. 64 Capacitancia/Voltaje con cerámica sinterizada a 1300°C	-82-
Fig. 65 Capacitancia/Voltaje con cerámica sinterizada a 1400°C	-85-
Fig. 65 a) muestra de cerámica sinterizada a 1300°C y b) muestra sinterizada a 1400°C	-85-

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad en la división de estudios de postgrado de la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM) hay un laboratorio de electrocerámica el cual cuenta con equipos como LCR-medidor QuadTech 7600 y una fuente de voltaje Keithley 6487. El primero de ellos está diseñado para realizar mediciones precisas sobre impedancia en un amplio rango de frecuencia y voltaje directo. El segundo es usado como fuente de voltaje. Con estos equipos se hacen mediciones de parámetros de nuevos materiales electrónicos.

Anteriormente estos equipos se usaban en forma manual, cuya configuración y uso era mediante el panel frontal del instrumento. Las mediciones en forma manual de ambos equipos eran ineficientes, debido a que las características y propiedades no se utilizan por completo. Una de las principales características de las unidades LCR-medidor QuadTech 7600 y de la fuente Keithley 6487, es que pueden ser controladas mediante una computadora a través de una tarjeta GPIB; sin embargo, el fabricante no proporciona ningún software para hacerlo.

Con base a lo anterior, este trabajo de tesis fundamenta el desarrollo de un software para administrar las unidades LCR-medidor QuadTech 7600 y fuente Keithley 6487 mediante el uso de una computadora. Este software se encargará del flujo de datos y los diferentes comandos para el manejo de las unidades LCR-medidor QuadTech 7600 y fuente Keithley 6487 en forma remota. Con esto se pretende que el uso de estos equipos bajo el control de una computadora reduzca el tiempo empleado al realizar los experimentos y, por consiguiente, haga el trabajo del operador más simple y elimine posibles errores humanos.

Finalmente, se efectuará la investigación de las características dieléctricas de materiales a temperatura ambiente, antes y después de tratamiento térmico (en un rango de 100°C a 800° C) del tipo $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$, bajo los siguientes modos:

1. Capacitancia (C) y Conductancia (G) vs Voltaje (U);
2. Capacitancia (C) y Conductancia (G) vs frecuencia (f) para voltaje directo fijo;
3. Capacitancia (C) y Conductancia (G) a un voltaje directo fijo (U) en función del tiempo t .

Como resultado del trabajo de tesis, se obtendrá un sistema de mediciones y usando éste, se hará la investigación de influencia de tratamiento térmico en características eléctricas de un varistor cerámico $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$. El sistema tendrá elementos tanto de hardware como de software, los cuales se acoplarán/unirán de forma paralela. La implementación del sistema se describirá mediante la metodología de sistemas empotrados.

1.1 | Planteamiento del problema

El presente trabajo de tesis propone diseñar e implementar un software/sistema de automatización para que los usuarios interactúen de forma remota con los dispositivos LCR-medidor QuadTech 7600 y fuente Keithley 6487, haciendo uso del estándar de comunicaciones GPIB. El sistema/software será capaz de administrar y controlar los dispositivos, así como también enviar, recibir y almacenar datos de los instrumentos a través de una interfaz sencilla y amigable.

El trabajo a desarrollar propone dos módulos/etapas de desarrollo: La etapa/módulo software y la etapa/módulo hardware con la finalidad de que la solución sea realizable.

Los elementos funcionales del software tienen como entrada una señal de medición, como se muestra (Fig. 1).

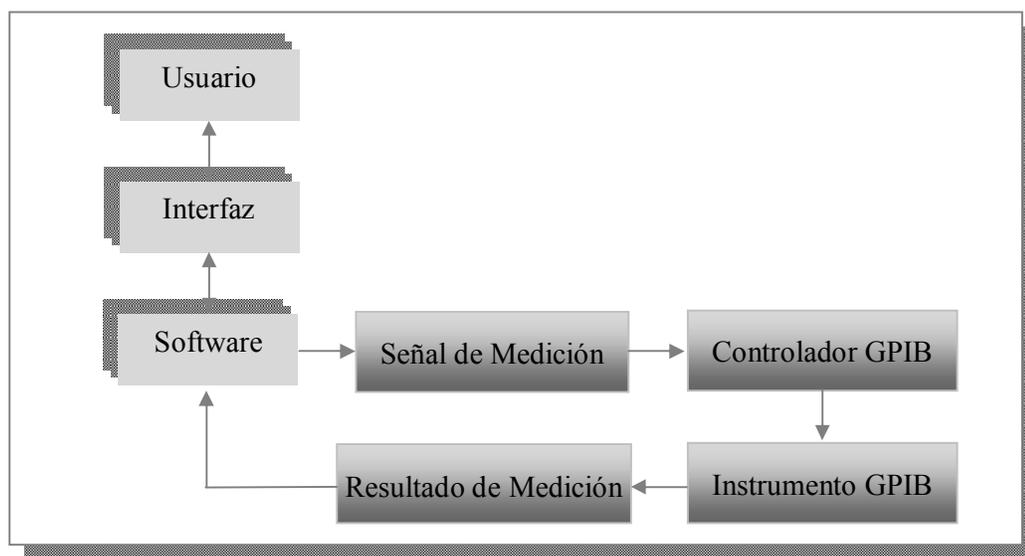


Fig. 1 Elementos funcionales del software

Los elementos funcionales del hardware tienen como datos los provenientes de la interfaz de datos de los elementos funcionales del software (Fig. 2).

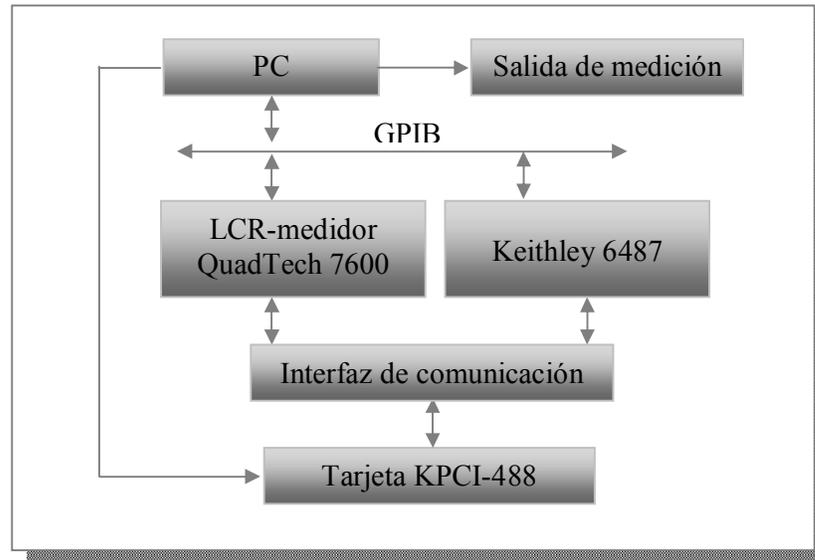


Fig. 2 Elementos funcionales del hardware

Después de unir las partes funcionales del software y del hardware quedará listo nuestro sistema de mediciones y el principal objetivo será el satisfacer las necesidades que a continuación se describen:

- 1) Optimizar tiempo en las mediciones: El operador hace las mediciones en forma manual perdiendo mucho tiempo al introducir los parámetros de medición.
- 2) Reducir errores humanos: El operador debe estar muy familiarizado con los equipos para no introducir datos que dañen el equipo o a la propia muestra.
- 3) Portabilidad en los datos: Los datos son almacenados en unidad 31/2 y cuando las mediciones son muy grandes no se pueden almacenar, además de que la estructura de los archivos guardados es muy compleja.
- 4) Análisis de datos: No existe una gráfica que favorezca el análisis de los resultados de las mediciones.

Los datos arrojados de las mediciones son para fines de investigación, por lo tanto es importante el diseño y desarrollo del software que administre y controle LCR-medidor QuadTech 7600 y fuente Keithley 6487, una vez terminado el software se aplicará su funcionalidad en trabajos de investigación de materiales cerámicos basados a base de dióxido de estaño (SnO₂) ya que existe la necesidad de estudiar los mecanismos de procesos electrónicos en nuevos materiales cerámicos.

1.2 | Justificación

En la actualidad en la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM) hay equipos como un LCR-medidor QuadTech 7600 y una fuente de voltaje Keithley 6487 equipos que permiten obtener las características eléctricas de materiales sólidos. Sin embargo las mediciones se realizan de forma manual. Esta forma de utilizar el equipo tiene desventajas, por lo que en este proyecto se desarrolla un software que permite mejorar el proceso de medición, y que se justifica mejorando los siguientes aspectos al momento de realizar las mediciones:

- Reducir el tiempo del operador al momento de hacer las mediciones.
- Reducir errores humanos y brindar protección a los equipos LCR-medidor QuadTech 7600 y la fuente de voltaje Keithley, en base a la validación de entrada de datos.
- Portabilidad de los datos, guardando las mediciones en un formato ligero y en una extensión que no necesite conversión, conjuntamente estructurar los datos de forma que sean fácil de entender, para un uso posterior.
- Mejorar apreciación y comprensión de los resultados de la medición, esto gracias a la gráfica que generará el software.

Además, usando este sistema de medición, se efectuará una investigación de propiedades dieléctricas de materiales basados en dióxido de estaño (SnO_2).

1.3 | Hipótesis

La creciente necesidad de disminuir los errores y el tiempo destinado para la investigación, lleva a que muchos de los equipos utilizados se automaticen para cumplir con esta tarea, el desarrollo de este tipo de sistemas plantea la siguiente hipótesis para este trabajo de tesis:

“Es posible diseñar, desarrollar e implementar un administrador de dispositivos bajo el estándar GPIB; que planifique, administre y controle instrumentos (QuadTech7600 y Keithley 6487) para disminuir el tiempo en las mediciones. El administrador de los dispositivos deberá realizar las mediciones de parámetros dieléctricos de materiales de estado sólido, protegiendo a la muestra sujeta a investigación, así como también mejorar las condiciones de trabajo del laboratorio”.

1.4 | Objetivo del proyecto

El objetivo general que se desea alcanzar al término del trabajo es el siguiente:

Diseñar, desarrollar e implementar un software para la administración del LCR-medidor QuadTech 7600 y la fuente de voltaje Keithley 6487 para usarlo en la investigación de propiedades dieléctricas de nuevos materiales cerámicos.

Para alcanzar este objetivo general será necesario cumplir los siguientes objetivos particulares:

1.4.1 | Objetivos específicos

1. Adquirir un dominio de las características del LCR-medidor QuadTech 7600 y fuente de voltaje Keithley 6487.
2. Definir requisitos que debe cubrir el software.
3. Diseñar la estructura en módulos del programa y determinar el lenguaje de programación para el desarrollo del software.
4. Desarrollar el software, y aplicar pruebas y correcciones al mismo, así como manual de usuario.
5. Hacer mediciones de los parámetros dieléctricos cerámicos a base de dióxido de estaño (SnO_2) usando el sistema obtenido.
6. Analizar resultados obtenidos en la investigación.

1.5 | Metas

1. Ilustrar todas las instrucciones manuales de las unidades LCR-medidor QuadTech 7600, de la fuente Keithley 6487 y de la tarjeta KPCI 488 para su sistematización.
2. Diseñar la estructura del programa para administrar QuadTech 7600 y Keithley 6487 con la tarjeta KPCI 488.
3. Elegir el lenguaje de programación.
5. Diseñar y desarrollar el software.
6. Retroalimentar el software con pruebas.
7. Obtener características dieléctricas de materiales cerámicos a base de dióxido de estaño (SnO_2) usando el sistema desarrollado.
8. Explicar datos obtenidos en las mediciones.

1.6 | Metodología

La metodología de desarrollo utilizada se divide en las siguientes etapas (Fig. 3).

1. Estudio del LCR-medidor QuadTech 7600, fuente de voltaje Keithley 6487 y la tarjeta KPCI 488.
 - 1.1. Propiedades, características y limitaciones de las unidades.
 - 1.2. Protocolo de comunicación.
 - 1.3. Estudio del estándar IEEE 488 y de la tarjeta KPCI 488.
2. Elaboración de los requisitos del programa.
3. Revisión de los lenguajes de programación y elección del lenguaje a usar para el desarrollo del software.
4. Segmentación del programa y diseño de algoritmos.
5. Diseño del programa.
6. Implementación: Se codificarán los algoritmos bajo el lenguaje seleccionado.
7. Pruebas y correcciones: Se realizará una corrección a las fallas del programa de acuerdo a los resultados de las pruebas.
8. Obtención y explicación de las características dieléctricas de materiales de estado sólido.

Para el desarrollo del software se seguirá parte de la metodología para sistemas empujados, propuesta por Tammy NOergaard que contempla 3 elementos:

- La capa de hardware
- La capa de software de sistema
- La capa de aplicación [25].

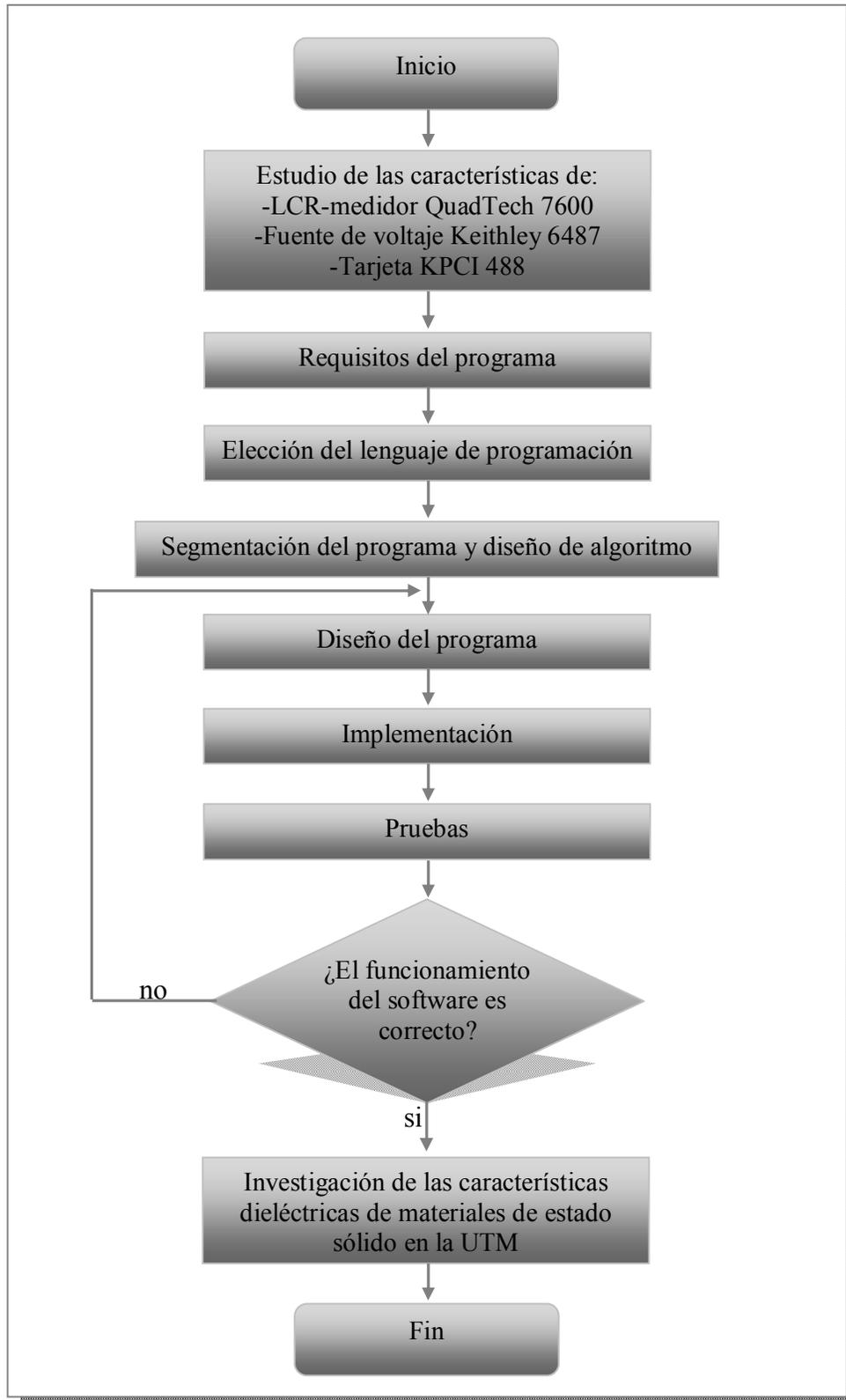


Fig. 3 Metodología para el desarrollo

1.7 | Contenido del documento de Tesis

El documento de tesis estará organizado en cinco capítulos, los cuales abordarán los siguientes puntos:

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN Y DEFICIÓN DEL PROBLEMA

Se dan las generalidades del trabajo y se presenta una breve introducción sobre el software a desarrollar, el planteamiento del problema, justificación, hipótesis objetivos, metas y metodología del trabajo de tesis.

Capítulo 2. MARCO TEÓRICO

Describe el marco teórico para la comprensión de las unidades LCR-medidor QuadTech 7600 y fuente Keithley 6487 utilizadas en el proyecto además de un panorama de los factores que interviene en la medición. De igual manera 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 terminar con el estudio de los varistores.

Capítulo 3. DISEÑO DEL SISTEMA

En este capítulo se mostrará el diseño de interfaz y diseño en módulos del software.

Capítulo 4. PRUEBAS AL SISTEMA

Se presentarán las pruebas de funcionalidad y validación aplicadas al software entre otras pruebas empleadas para el buen funcionamiento del mismo.

Capítulo 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para respaldar el proyecto, en el presente capítulo se mostrarán los resultados obtenidos en la investigación de características eléctricas de varistores cerámicos, después de tratamientos térmicos.

Capítulo 6. CONCLUSIONES

En este capítulo habrá un argumento resumido del proyecto, mencionando lo más relevante del proyecto, tanto del desarrollo del software como de los resultados obtenidos y la investigación.

Bibliografía

Por último se presentan las referencias bibliográficas utilizadas para respaldar el marco teórico del proyecto.

Anexo 1. PUBLICACIÓN

Anexo 2. MANUAL DE USUARIO

Capítulo 2

MARCO TEORICO

2.1 | Impedancia y admitancia

En caso general, un capacitor o inductor real se caracteriza por impedancia o admitancia. Cada una se describe por 2 parámetros. El primero caracteriza el valor de capacitancia o inductancia del elemento. El segundo caracteriza el valor de pérdidas de energía debido a una resistencia o conductancia activa [32].

Una impedancia no es una resistencia pura, ni una reactancia, una impedancia podría representarse en cualquier frecuencia específica, ya sea en serie o en combinación en paralelo de la resistencia y reactancia. Tal representación se llama circuito equivalente; al realizar una medición el valor de la primer medición de un dispositivo, depende de qué circuito equivalente sea, ya sea en serie o en paralelo (regularmente son en serie). Los circuitos equivalentes se representan en la (Fig. 4).

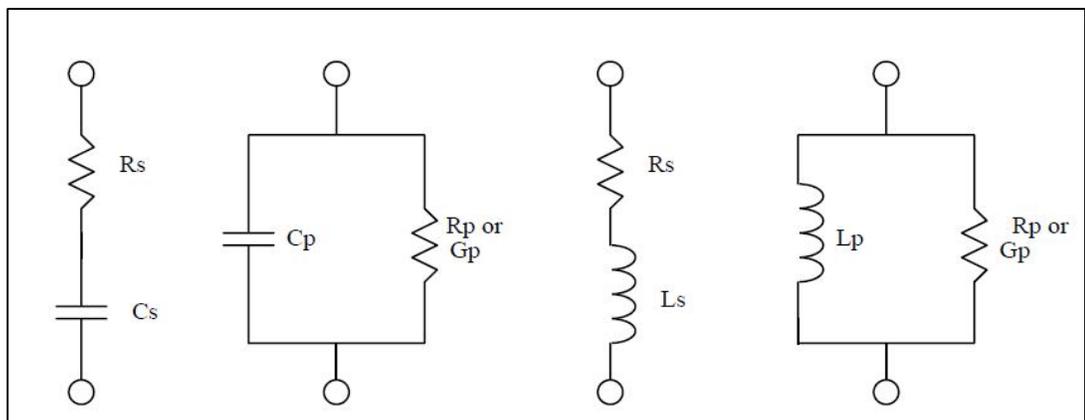


Fig. 4 Circuitos en serie y en paralelo para impedancias capacitivas e inductivas [32]

La impedancia es el parámetro utilizado para caracterizar los componentes electrónicos, materiales y circuitos. Impedancia $|Z|$ se define como la oposición de un dispositivo o circuito que ofrece al flujo de corriente alterna a una frecuencia particular y en general se representa como una cantidad compleja que consiste en una parte real

(resistencia, R) y parte imaginaria (reactancia, jX). La impedancia se puede expresar en coordenadas rectangulares ($R + jX$) o en forma polar como magnitud y el ángulo de fase ($|Z| \angle \theta$) [32].

La (Fig. 5). Muestra la relación matemática entre R, X, $|Z|$ y θ tanto en dispositivos inductivos como en capacitivos. En algunos casos es práctico representar matemáticamente la impedancia, que recurre en el recíproco $1 / |Z| = |Y| = G + jB$, donde $|Y|$ representa el ingreso, G la conductancia y B susceptancia. Esta relación matemática para dispositivos inductivos y capacitivos se muestra en la (Fig. 6).

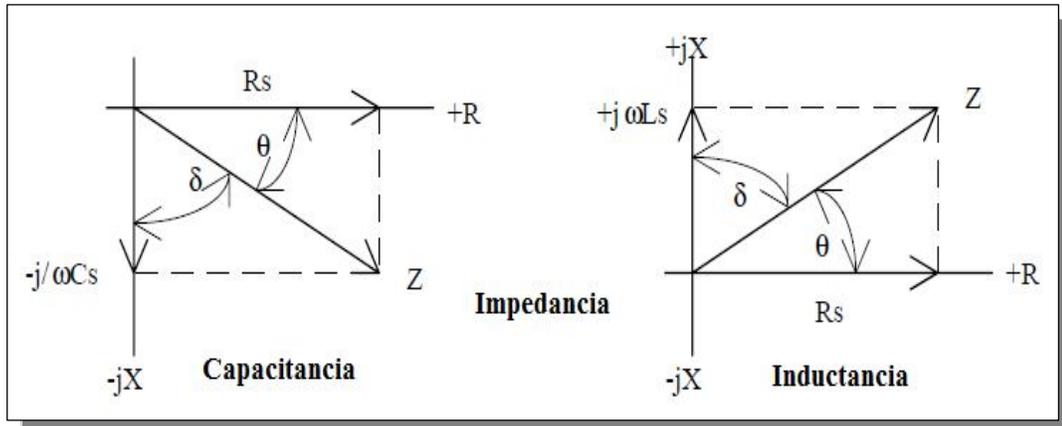


Fig. 5 Diagramas de Fase de la Impedancia [32]

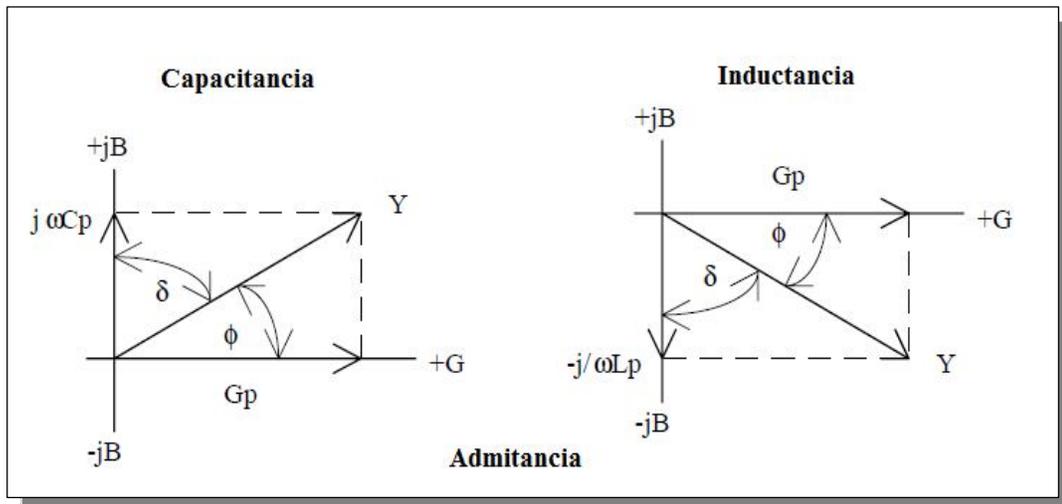


Fig. 6 Diagramas de Fase de Admisión [32]

El factor de calidad (Q) se utiliza como una medida de la pureza de una reactancia (¿Qué tan cerca está de ser una reactancia pura?, es decir, sin resistencia) y se define como el cociente entre la energía almacenada en un dispositivo y la energía disipada por el dispositivo. Q es adimensional y se expresa como $Q = X / R = B / G$. En la (Fig. 6) se puede ver que Q es la tangente del ángulo θ . Q es comúnmente aplicado a los inductores y condensadores, para uso general utilizamos Q para expresar la pureza en factor de disipación (D), que es el inverso de Q [32].

2.2 | Capacitores

Un capacitor es un dispositivo capaz de almacenar cargas eléctricas, y consiste en dos objetos conductores (generalmente placas u hojas) colocados uno cerca de otro, pero sin que estén en contacto. Los capacitores se usan ampliamente en los circuitos electrónicos. Almacenan carga que posteriormente se puede liberar, como en un flash de la cámara, y como respaldo de energía en las computadoras para cuando falla la potencia. Los capacitores bloquean los excesos de carga y energía para proteger los circuitos. Capacitores muy pequeños sirven como memoria para los “unos” y “ceros” del código binario en la memoria de acceso aleatorio (RAM) de las computadoras, además de muchas otras aplicaciones [31]. El capacitor despliega sus características totales sólo cuando se realiza un cambio en el voltaje ó la corriente dentro del circuito en el que está presente. Además, si se considera la situación ideal, estos dispositivos no disipan energía como lo hacen los resistores, sino que la almacenan en una forma que puede ser reingresada al circuito cuando lo requiera el diseño del circuito [30].

2.2.1 | Tipos de Capacitores

De la misma forma que los resistores, los capacitores pueden incluirse bajo una de las dos categorías: fijos o variables. El símbolo para un capacitor fijo es ⌘ y para el capacitor variable es ⌘ , la línea curva representa la placa que regularmente se conecta al punto con el potencial más bajo [30].

2.2.2 | Capacitores fijos

En la actualidad se encuentran disponibles muchos tipos de capacitores fijos, algunos de los más comunes son los **capacitores de mica**, de cerámica electrolítica, de tantalio y de poliéster. El capacitor de mica plano típico consta básicamente de hojas de mica separadas por láminas metálicas. Las placas están conectadas a dos electrodos, como se muestra en la (Fig. 7). El área total será el área de una hoja multiplicada por el número de hojas dieléctricas [30].

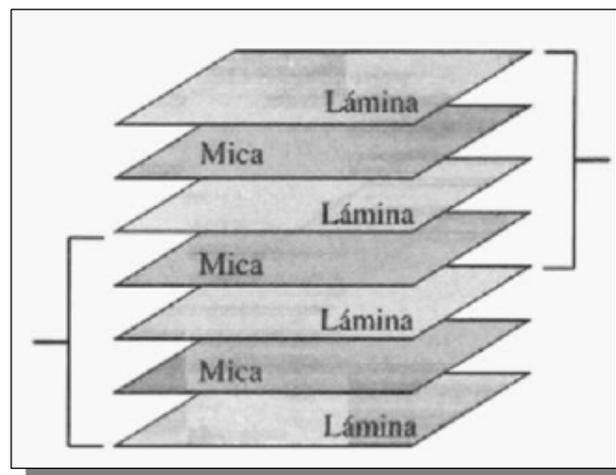


Fig. 7 Estructura básica de un capacitor de mica apilada [30].

También un capacitor fijo es el **capacitor de cerámica** que se fabrica en muchas formas y tamaños, sin embargo la estructura básica es prácticamente la misma para cada uno, como se muestra en la (Fig. 8). Una base de cerámica se recubre por ambos lados con un metal, como cobre o plata, para que actúe como las dos placas, Luego se adhieren las terminales a las placas a través de electrodos. Entonces se aplica un recubrimiento aislante de cerámica o plástico sobre las placas y el dieléctrico. Los capacitores de cerámica también tienen una corriente de fuga muy baja (R_{fuga} cercana a $1000\text{ m}\Omega$). Pueden encontrarse con valores que van de unos cuantos picofarads a quizá $2\mu\text{F}$, con voltajes de trabajo muy altos como 5000 V o más [30].

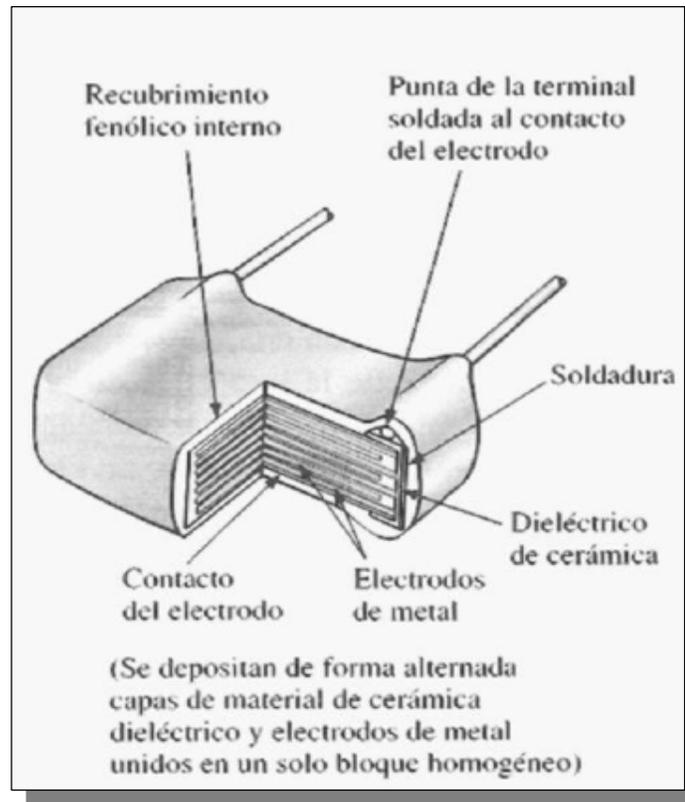


Fig. 8 Capacitor de cerámica de multicapas con terminal radial [30].

Otro capacitor fijo es el **capacitor electrolítico** se utiliza comúnmente en situaciones donde se requieren capacitancias del orden de uno a varios miles de microfarads, y se encuentra diseñado principalmente para utilizarse en redes donde sólo se aplicarán voltajes de cd en el capacitor debido a que tienen características de aislamiento (alta corriente de fuga) adecuada entre las placas en una dirección, pero asumen las características de un conductor en la otra dirección. Existen capacitores electrolíticos disponibles para utilizarse en circuitos (para motores de arranque) y en casos donde la polaridad del voltaje de cd en el capacitor se invertirá por breves periodos [30].

El **capacitor de tantalio** también forma parte de los capacitores fijos, básicamente existen 2 tipos de capacitores de tantalio: el sólido y el húmedo. En ambos casos, se comprime polvo de tantalio de alta pureza en una forma cilíndrica o rectangular, como se muestra en la (Fig. 9). Luego, la conexión del ánodo (+) simplemente se presiona dentro de las estructuras resultantes, como se muestra en la

misma figura. Entonces la unidad resultante se aglutina (hornea) el vacío a temperaturas muy altas para formar un material bastante poroso. El resultado es una estructura con una muy amplia área superficial dentro de un volumen limitado. Mediante la inmersión en una solución ácida, se establece un delgado recubrimiento de dióxido de manganeso (MnO_2) sobre la amplia porosa área superficial. Entonces se añade un electrolítico para establecer contacto entre el área superficial y el cátodo, produciendo un capacitor de tantalio sólido. Si se introduce un ácido “húmedo” adecuado, la unidad se denominara capacitor de tantalio húmedo [30].

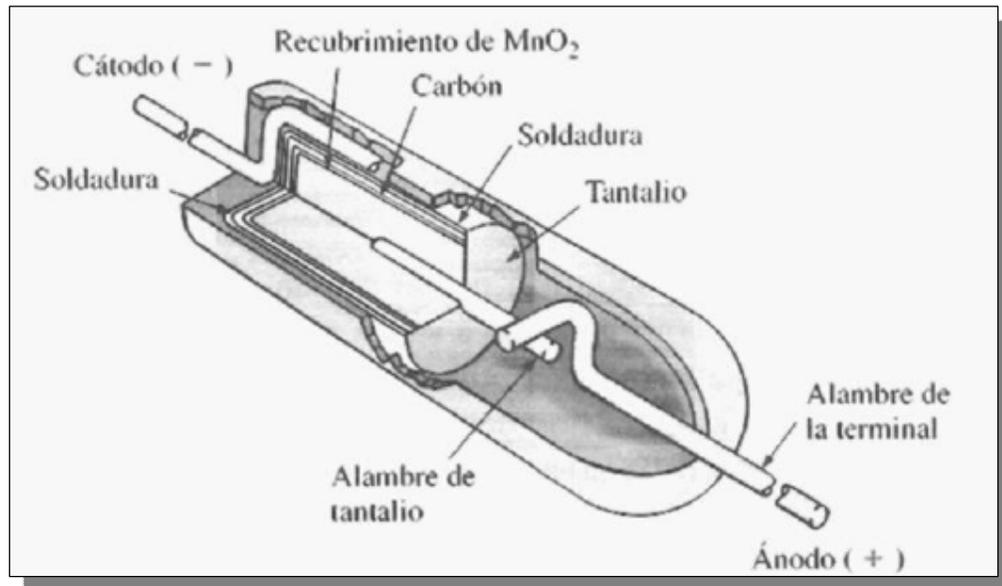


Fig. 9 Estructura de un capacitor de tantalio [30].

El último tipo de capacitor fijo que se presentará es el **capacitor de película de poliéster**, cuya estructura básica se muestra en la (Fig. 10). Consta básicamente de dos hojas metálicas separadas por una banda de materiales de poliéster como el Mylar®. La capa exterior de poliéster se aplica para actuar como funda aislante. Cada hoja metálica se conecta a una terminal que se extiende de forma axial o radial desde el capacitor. La construcción enrollada resulta en una amplia área superficial, y el uso del dieléctrico de plástico da lugar a una capa muy delgada entre las superficies conductoras [30].

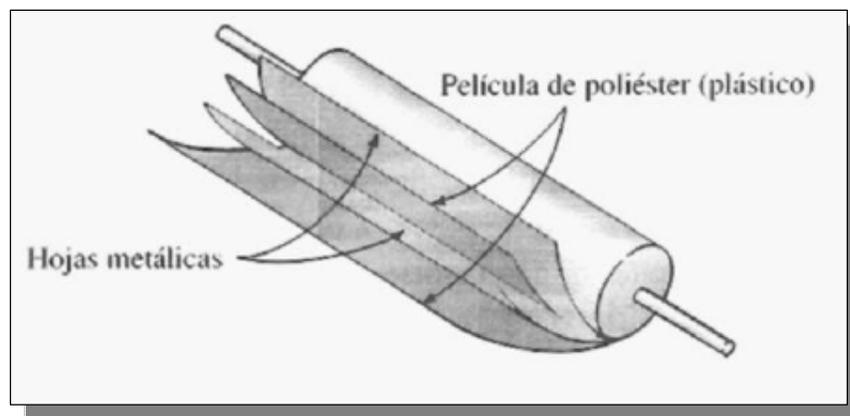


Fig. 10 Capacitor de película de poliéster [30].

2.2.3 | Capacitores variables

Los capacitores de tipo variable más comunes se muestran en la (Fig. 11). El dieléctrico en cada capacitor es el aire. La capacitancia en la (Fig. 11) (a) se modifica mediante el giro del eje en un extremo para variar el área común, de las placas móviles y fijas, mientras mayor sea el área común, mayor será la capacitancia. La capacitancia del capacitor ajustable de la (Fig. 11) (b) se modifica mediante el giro del tornillo, el cual variará la distancia entre las placas (el área común es fija) y, por tanto, la capacitancia [30].

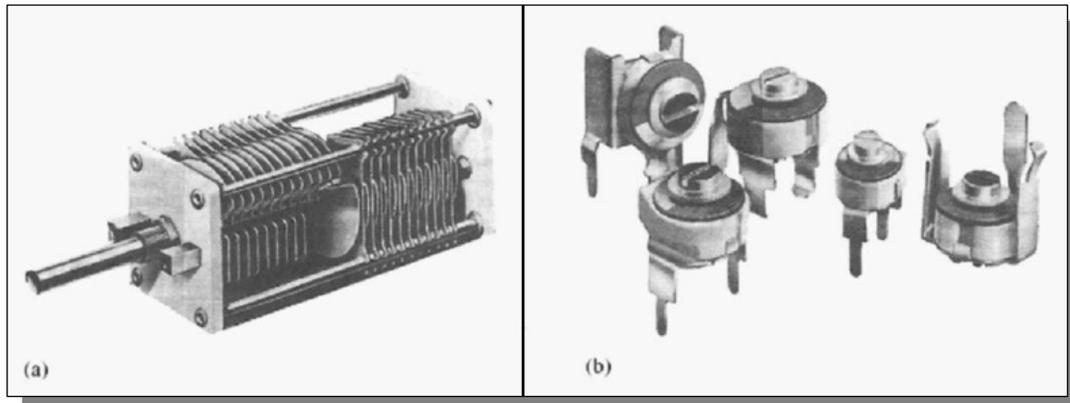


Fig. 11 Capacitor de aire variable (a), Manufacturing Co. (b) [30].

2.3 | Varistores

Los varistores son componentes eléctricos que presentan una resistencia que varía en forma marcadamente no lineal con relación a la tensión aplicada, de modo que superando un cierto valor de ésta (voltaje de ruptura), el material se vuelve conductor y descarga la sobretensión, protegiendo los circuitos e instalaciones, particularmente en estaciones transformadoras y en líneas de transmisión, los primeros varistores están hechos de SIC mezclado en distintas proporciones con grafito y arcilla, para una gama de voltajes de ruptura. En la actualidad se fabrican de ZnO, en granos de unos 10 μm de diámetro, recubiertos por óxidos de Sb, Bi ó Cr [28].

Para **aisladores de líneas de transmisión eléctrica** (baja, media y alta tensión), los materiales cerámicos presentan claras ventajas: tienen propiedades eléctricas superiores, no se deforman, tienen gran resistencia mecánica y asimismo a la acción del medio ambiente (incluyendo la radiación UV solar, los cambios de temperatura, humedad y la acción de insectos y roedores); son absolutamente impermeables al agua y a los gases, además de ser incombustibles. Se utilizan **aisladores de porcelana** revestidos de esmalte o vidriados especiales, y para alta tensión se utilizan **aisladores de vidrio templado** [28].

2.3.1 | Varistores de ZnO

El ZnO es un semiconductor tipo n con una estructura wurtzita (grupo P63mc) que obedece a un empaquetamiento hexagonal compacto de iones O^{2-} apilados a lo largo de la dirección (0001), con los cationes Zn^{2+} ocupando la mitad de las posiciones

tetraédricas (Fig. 12). Se trata de una estructura relativamente abierta, con todas las posiciones octaédricas y la mitad de las tetraédricas desocupadas, que va a facilitar tanto la incorporación de dopantes externos a la red como la difusión de sus propios defectos intrínsecos. Aunque existen diferentes opiniones sobre el tipo de defectos puntuales presentes en la estructura del ZnO, el carácter parcialmente iónico de los enlaces, en torno al 50-60 % (23), no da ninguna indicación sobre la presencia de unos u otros defectos [29].

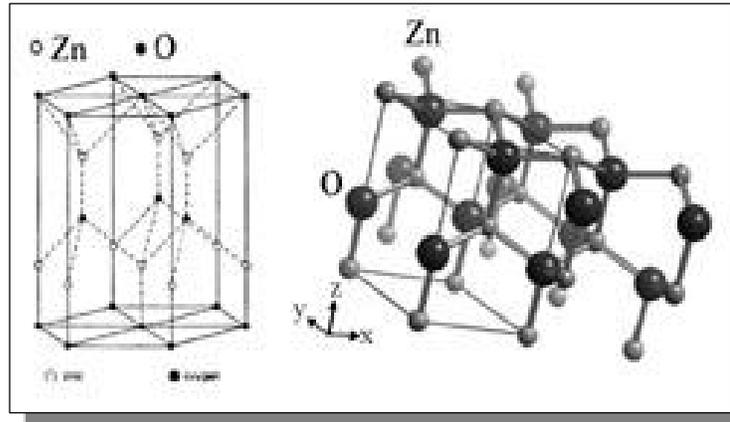


Fig. 12 Estructura hexagonal tipo wurtzita del ZnO. En el esquema de la derecha las líneas negras indican las dimensiones de la celda unidad ($Z = 2$) [29].

2.3.2 | Varistores de SnO_2

El dióxido de estaño es un material cristalino con una estructura cristalina tetragonal tipo rutilo, con celda unitaria formada por seis átomos: dos de estaño y cuatro de oxígeno como lo muestra la (Fig. 13), donde cada átomo de estaño está en el centro de seis átomos de oxígeno colocados aproximadamente en las esquinas de un octaedro regular y cada átomo de oxígeno está rodeado por tres átomos de estaño colocados aproximadamente en las esquinas de un triángulo equilátero y con parámetros de red $a = b = 4.737 \times 10^{-10} \text{ m}$ y $c = 3.185 \times 10^{-10} \text{ m}$, con radios iónicos para el O^{2-} y el Sn^{4+} de $1.40 \times 10^{-10} \text{ m}$ y $0.71 \times 10^{-10} \text{ m}$, respectivamente [19].

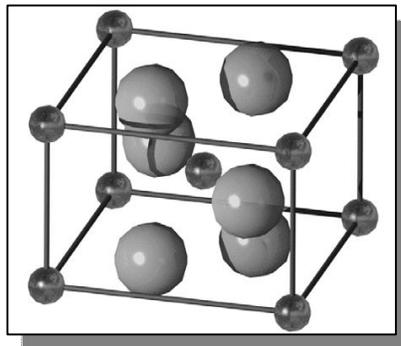


Fig. 13 Estructura cristalina del SnO_2 . Las esferas pequeñas representan los átomos de estaño y las esferas grandes los átomos de oxígeno [19].

Los varistores basados en óxido de estaño presentan características eléctricas altamente no lineales, similares a las de los varistores comerciales de óxido de zinc (10), con la ventaja de que la cerámica de SnO₂ presenta una sola fase cuando la concentración de dopantes es baja, facilitando el control microestructural del material, y posee elevada resistencia a la degradación (11). Además, las cerámicas de SnO₂ necesitan concentraciones bajas de dopantes para alcanzar buenas características varistoras y alta densificación (12).

2.3 | Características de LCR-medidor QuadTech 7600

El medidor LCR-medidor QuadTech 7600 (Fig. 14) está diseñado para realizar mediciones precisas de varios parámetros: capacitancia, inductancia, resistencia, factor de disipación, impedancia, admitancia, ángulo de fase, etc. (14 diferentes parámetros). Estos parámetros son posibles de medir con el QuadTech 7600 en un rango de frecuencia desde 10Hz hasta 2MHz.

También es posible medir todos parámetros mencionados bajo un voltaje directo de hasta 2 V usando la fuente interna del equipo QuadTech y hasta 500 V usando fuente externa. En caso de fuente externa se utilizará fuente Keithley 6487 [32].

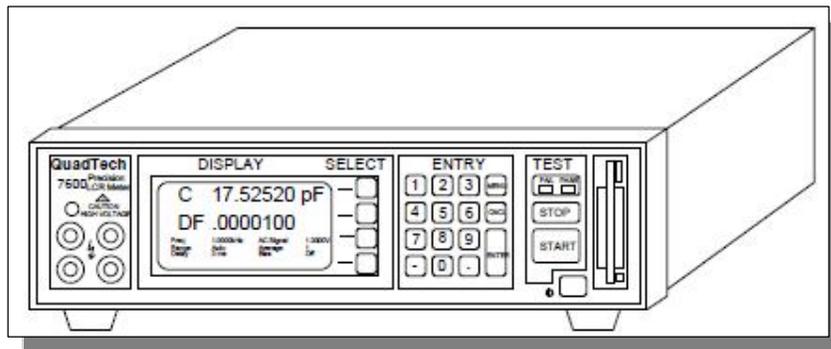


Fig. 14 Panel frontal de LCR - Medidor QuadTech 7600 [32].

Tabla 1. Especificaciones de LCR-medidor QuadTech 7600 [32].

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN
Parámetros de medición	Capacitancia (Cs/Cp), Inductancia (Ls/Lp), Resistencia (Rs/Rp), Disipación (DF) y factores de calidad(Q), Impedancia (Z), Admitancia Y , Ángulo de fase (θ), Resistencia equivalente de la serie (ESR), Conductancia (Gp), Reactancia (Xs), Susceptancia (Bp) cualquiera de los dos parámetros medidos se muestran simultáneamente. Nota: s = series, p = paralelo, ESR equivalente a Rs
Rangos de medición	Z , R, X: 000.0001 mohm a 99.99999 Mohm Y , G, B: 00000.01 S a 9.999999 MS C: 00000.01 fF a 9.999999 F L: 0000.001 nH a 99.99999 H

	<p>D: .0000001 a 99.99999 Q: .0000000 a 999999.9 Ángulo de fase: -180.0000 a +179.9999 grados Delta %: -99.9999 % a +99.9999 %</p>
Exactitud de la medición	<p><u>Rápido</u> <u>Medio</u> <u>Lento</u> LCR: +/- 0.5%* +/- 0.25%* +/- 0.05%* DF: +/- 0.005 +/- 0.0025 +/- 0.0005</p> <p>* En los niveles óptimos de prueba de señal, el valor DUT es óptimo y sin errores de calibración e incertidumbre. La autenticidad del instrumento se puede reducir de características nominales utilizando unos 7000 aparatos de accesorios y cables. Mejor precisión geométrica requiere coherencia entre las que utilizó durante la apertura y que se aplique sobre los partidos y los cables durante el proceso de medición real. Esta consistencia puede ser especialmente difícil de lograr cuando se utiliza sin blindaje clip de Kelvin y las conexiones de tipo pinza.</p> <p>0.25 x (exactitud normal) con corrección de carga en práctica en comparación con el estándar suministrado por el usuario. En una serie de $3\Omega \leq Z \leq 80k\Omega$, $100mV \leq \text{programado } V \leq 1V$ o $100mV \leq (\text{programado } I) \times (Z) \leq 1V$</p>
Frecuencia de prueba	<p>10 Hz a 2 MHz Resolución: 0.1 Hz de 10 Hz a 10 kHz 5 dígitos > 10 kHz, 4 dígitos > 100 kHz Precisión: +/- (0.25% + 0.02 Hz)</p>
Velocidad de medición	<p>Precisión rápida: 40 msec*/medición Precisión media: 125 msec*/medición Precisión lenta: 1 sec*/medición *puede ser mayor, dependiendo de las condiciones de prueba y frecuencia.</p>

Tabla 2. Especificaciones de LCR-medidor QuadTech 7600 (continuación) [32].

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN
Fuente de la impedancia	250Ω, 400 Ω, 6.4 k Ω o 100 kΩ rango de medición dependiente.
Disparador:	Interno (automático) y externo (a través de controlador, RS-232 o IEEE-488.2 interfaces)
AC Señal de prueba Voltaje:	20 mV a 5.0 V (circuito abierto) en 5 mV pasos, ≤ 500kHz 20 mV a 1.0 V (circuito abierto) en 5 mV pasos, > 500kHz a ≤1MHz 20 mV a 0.5 V (circuito abierto) en 5 mV pasos, > 1MHz precisión +/- (5% + 1 mV) <100kHz +/- (10% + 1 mV) 100kHz a 500kHz +/- (20% + 1 mV) 500kHz a 1MHz +/- (35% + 1 mV) >1MHz
AC Señal de prueba Actual:	250 μA a 100 mA (corto circuito) en 50 μA pasos cumplimiento máximo 3V < 500kHz, 1V de 500kHz - 1MHz 0.5V > 1MHz precisión: +/- (5% +50 μA) <100kHz

	<p>+/- (10% +50 μA) 100kHz a 500kHz +/- (20% +50 μA) 500kHz a 1MHz +/- (35% +50 μA) >1MHz</p>
Voltaje de polarización:	Interno: 2.0 V Externo: 0 a +/-200 V
Pantalla:	<ul style="list-style-type: none"> - LCD gráfica con contraste ajustable y luz de fondo - Resultados de doble parámetros de medición en la ingeniería (7 dígitos) o en notación científica (5 dígitos). - Diferencia respecto a los parámetros nominales y primarios. - Desviación en % del parámetro nominal y primario. - Instrumento de ajuste y Condiciones de los ensayos. - Límites en paso / falla Resultados. - Cuadro de parámetro de medida primaria vs condiciones de prueba. - Tabla de parámetros de medida frente a condiciones de prueba. - Resumen de resultados de la Prueba secuencial.
Límite de detección	15 cuadros totales (10 aprobados, 4 fallas, 1 sin contacto).
Interfaces:	IEEE-488.2, RS-232, controlador, Puerto de impresora y disco de 3.5"
Panel Frontal Terminales de prueba	4 terminales (BNC) con protección.
Medio ambiente	<p>MIL-T-28800E, Tipo 3, Clase 5, Estilo E & F. Funcionamiento: 0 a + 50° C. almacenamiento - 40 a + 71° C. Humedad: < 75% para < 40° C funcionando. Altitud <2000m, Instalación categoría 1, grado de contaminación 1.</p>
Mecánica	<p>Plataforma de montaje con inclinación. Dimensiones: (w x h x d): 16 x 6 x 14 en (410 x 150 x 360mm) Peso: 17 lbs (8kg) netos, 23 lbs (10.5kg) montaje.</p>
Requisitos de energía	90 a 250Vac 47 - 63 Hz 40W máximo.
Otras características	<p>Capacitor de carga de protección: $\sqrt{3/C}$ para $V_{max} \leq 250$ V $\sqrt{2/C}$ para $V_{max} \leq 1000$ V C = Capacitancia en faradios del dispositivo bajo prueba. Retraso programable de 0 a 1000 ms de medición en pasos de 1 ms. Medición promedio programable desde 1 hasta 1000. Mediana de valor de Moda. Abierto y Cortocircuito con reducción a cero en múltiples frecuencias. Carga de la energía de Protección (ajuste, los resultados, y los datos de calibración almacenados). Almacenamiento y recuperación de 25 configuraciones, 125/disco w / Opciones de disquetes. Pruebas en rutinas de encendido. Resultados almacenados hasta 40.000 mediciones / disco, c / Opción disquete. Auto calibración de precisión y pantalla.</p>

LCR-medidor QuadTech 7600 se puede utilizar en tres formas distintas:

- (1) Forma manual: es cuando el operador elige en forma manual lo que va a medir el equipo,
- (2) Forma automática: es cuando el dispositivo hace un barrido de frecuencia conforme a una configuración que ya esta empotrada en el equipo.
- (3) Forma remota: es cuando el control del equipo se lleva con una computadora mediante la ayuda de un software.

En la forma (2) los datos recolectados de la medición puede ser almacenados en la memoria interna del equipo y extraídos desde la unidad de discos magnéticos de 3 ½ de QuadTech 7600 (las mediciones regularme son “resumidas” de su tamaño original debido a que la unidad de almacenamiento es muy pequeña y son pocas las mediciones que se pueden respaldar). El panel frontal puede ser habilitado con una clave de acceso, para asegurarse que los procedimientos son realizados de forma correcta [32].

Para realizar el modo (1) y (2) es necesario dedicar mucho tiempo, asistencia y control del equipo por personal humano, esto es una enorme desventaja al momento de hacer mediciones. En la forma (3) no existen estos problemas, por lo tanto, es más eficiente para poder configurar el equipo LCR-medidor QuadTech 7600; sin embargo es necesario un software que el fabricante no proporciona al adquirir el equipo, por lo que es trabajo del operador desarrollarlo.

2.4 | Características de la fuente de voltaje KEITHLEY Modelo 6487

El equipo KEITHLEY modelo 6487 (Fig. 15). Es un instrumento de 5-1/2 dígitos que puede aplicar tensiones de hasta 500 V a un elemento en test y medir corrientes tan bajas como 20nA. Mide resistencia hasta 5×10^{16} ohms utilizando la fuente de tensión, mide la corriente, y la velocidad de adquisición de datos es de 1000 lecturas/s a la memoria buffer.

Los rangos de tensión son ± 10 , ± 50 , y ± 500 V, con una precisión básica de $\pm 0.1\%$ del valor programado. Un método de tensión alterna para medidas de alta resistencia reduce los errores debidos a corrientes generadas externamente. Una memoria buffer de 3000 medidas con tiempo, proporciona estadísticas de máximo, mínimo y desviación estándar [33].

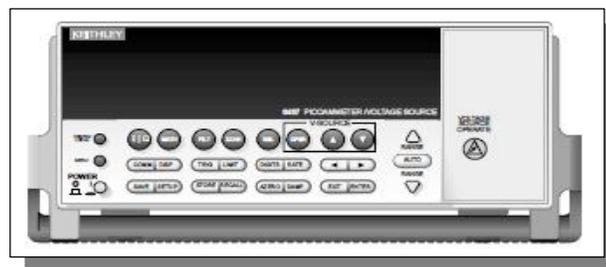


Fig. 15 Panel frontal de la fuente KEITHLEY modelo 6487 [33].

Tabla 3. Especificaciones de la Fuente KEITHLEY modelo 6487 [33]

Rango	Resolución por defecto 5 ½ dígitos	Precisión (1y r) \pm (% rdg.+offset) 18°- 28°C,0 – 70% rh	Sonido típico RMS	Tiempo de subida (10% a 90%)	
2 nA	10 fA	0.3 % + 400 Fa	20 fA	4 ms	80 ms
20 nA	100 fA	0.2 % + 1 pA	20 fA	4 ms	80 ms
200 nA	1 pA	0.15 % + 10 pA	1 pA	300 s	1 ms
2 A	10 pA	0.15% + 100 pA	1 pA	300 s	1 ms
20 A	100 pA	0.1 % + 1 nA	100 pA	110 s	110 s
200 A	1 nA	0.1 % + 10 nA	100 pA	110 s	110 s
2mA	10 nA	0.1 % + 100 nA	10 nA	110 s	110 s
20mA	100 nA	0.1 % + 1 A	10 nA	110 s	110 s

Tabla 4. Especificaciones de la Fuente KEITHLEY modelo 6487 (continuación1) [33]

CONCEPTOS	DESCRIPCION
Coefficiente de temperatura	0°–18°C & 28°–50°C. Para cada °C, sumar 0.1 × (% rdg + compensación) a especificaciones con precisión.
Carga de voltaje de entrada	Estable a 10nF en todos los campos y la variedad nA 2 A; 1 F en 20 A y 200 A intervalos de tiempo, y en rangos de A.
Máxima tensión continua de entrada	505 VDC
Nmrr¹	(50 o 60Hz) :60Db
Aislamiento (amperímetro común o fuente de tensión al chasis):	Típicamente >1×1011Ω en paralelo con<1nF.
Máximo voltaje de modo común	(Entre el chasis y fuente de tensión o amperímetro): 505 VDC.
Voltaje máximo entre la fuente de tensión y un amperímetro:	505 VDC.
Salida analógica:	Tensión de salida a escala (escala 2V invirtiéndose en todos los rangos) 2.5% ±2mV.
Salida analógica de impedancia	<100Ω, DC-2kHz.
Limite de corriente seleccionable:	2.5mA, 250 A, 25 A para 50V y 500V rangos, 25mA límite adicional para rango de 10V. Todos los límites actuales son -20%/+35% nominales.
Ruido de banda ancha:	<30mVp-p 0.1Hz - 20MHz.
Tiempo de estabilidad:	± (0.003% + 1mV) más de 24 horas a temperatura constante (de 1 ° C, entre 18 ° C - 28 ° C, después de 5 minutos la solución).
Resistencia de salida:	<2.5Ω
Tensión barrido:	Apoya tensión de barrido lineal de voltaje de la fuente de alcance fijo, una medición de corriente o resistencia por paso. Máxima velocidad de barrido:

	200 pasos por segundo. Máximo número de pasos 3000. Opcional retraso entre el paso y medida.
Medida de resistencia (v/i):	Se utiliza con fuente de tensión, resistencia calculada a partir de ajuste de tensión y corriente medida. La precisión se basa en la precisión de voltaje de la fuente más exactitud amperímetro. La precisión típica mejor que 0,6% para lecturas entre 1kΩ and 1TΩ.
Medición de voltaje alterno y resistencia	Mediciones de resistencia de 109Ω a 1015Ω mV y voltaje seleccionable de ±505V.

Tabla 5. Especificaciones de la Fuente KEITHLEY modelo 6487 (continuación2) [33]

Rango (Máximo)	Paso (Típico)	Presición ⁵ ± (% PROG. + OFFSET) 18°C - 28°C, 0 - 70% R.H.	Ruido (p-p) 0.1 - 10 Hz	Coefficiente de temperatura	Tiempo típico de subida ^{6,8} (10%-90%)	Tiempo típico de fallo ^{7,8} (90%-10%)
±10.100	200 V	0.1% + 1mV	<50 V	(0.005% + 20 V) / °C	250 s	150 s
±50.500	1mV	0.1% + 4mV	<150 V	(0.005% + 200 V) / °C	250 s	300 s
±505.00	10mV	0.15% + 40mV	<1.5mV	(0.008% + 2mV) / °C	4.5 ms	1 ms

2.5 | Tarjeta KPCI-488

2.5.1 | Datos generales

El bus de interfaz de propósito general (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 módulo 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 [6].

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. Son tarjetas 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 [6].

De manera particular, la tarjeta KPCI -488 (Fig. 16). 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 6 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, HPVVEE, LabVIEW.

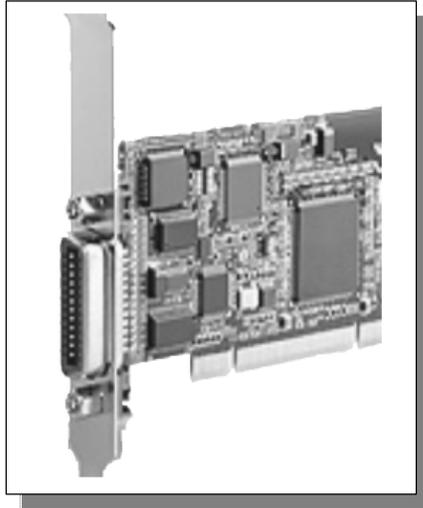


Fig. 16 Tarjeta KPCI-488

Tabla 6. Especificaciones de la Tarjeta KPCI- 488LP

Bus	PCI
Dimensiones	120 × 64.5mm
Corriente (5VDC)	400mA typ., 750mA Max.
Velocidad de Transferencia	1.5 Mbyte/s
Seguridad	EN61010-1/IEC 1010

A continuación se describirá y analizará la interfaz GPIB bajo la cual funciona la fuente Keithley 6487 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 fuente Keithley 6487.

2.5.2 | Lenguajes de programación recomendados por el fabricante de la tarjeta KPCI-488

Para crear un software que sirva para administrar el LCR-medidor QuadTech 7600 y la fuente de voltaje directo Keithley 6487 es necesario utilizar una tarjeta KPCI 488 para comunicar los equipos con un ordenador. Keithley es el fabricante de la tarjeta de comunicación y recomienda usar los siguientes lenguajes para el desarrollo del software: Ensamblador, Turbo Pascal, C++, Visual Basic, LabVIEW.

2.5.2.1 | Ensamblador

El lenguaje ensamblador es una colección de símbolos nemónicos que representan operaciones (neumónicos o directivas de una instrucción de máquina para el ensamblador), nombres simbólicos, operadores y símbolos especiales. El lenguaje ensamblador es un lenguaje usado para codificar programas fuentes que son procesados por un programa ensamblador, y traducidos finalmente al lenguaje máquina. Un programa en este lenguaje está compuesto por líneas, cada una de las cuales contiene neumónicos y símbolos que representan:

- Operaciones de dos posibles tipos:
 - Códigos de operaciones de instrucciones máquina.
 - Directivas (pseudo-operaciones), incluyendo macros.
- Nombres simbólicos (etiquetas)
- Operadores.
- Símbolos especiales.

El lenguaje ensamblador proporciona código de operación para el repertorio completo de instrucciones del lenguaje máquina [10].

2.5.2.2 | Turbo Pascal

Es un completo sistema de desarrollo de software que incluye un compilador y un entorno de desarrollo integrado (IDE) para el lenguaje de programación Pascal, desarrollado por Borland y liderado por Philippe Kahn. Fue lanzado en 1983 para MS-DOS, CP/M, CP/M-86 y, posteriormente, para Microsoft Windows, también hubo una versión de corta vida [5].

El nombre de Borland Pascal fue generalmente reservado para los paquetes de gama alta para Microsoft Windows (con más bibliotecas y la biblioteca estándar de código fuente), mientras que la versión original y ampliamente conocida versión fue vendida como Turbo Pascal. Borland lanzó siete versiones de Turbo Pascal: 1.0, 3.02, 4, 5, 5.5, para Apple Macintosh. 6 y 7 para MS-DOS. Finalmente Turbo Pascal fue sustituida por Borland Delphi [5].

2.5.2.3 | C++

A principios de los ochenta Bjarne Stroustrup desarrollo una extensión de C en los laboratorios Bell, inicialmente se llamó C con clases, para posteriormente tomar su nombre definitivo C++ cuando fue publicado en 1983 [9]. 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 ordenados 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 gráfica de usuario [9]. Entre las ventajas que se consiguen al utilizar C++ se encuentran: La reutilización del código en forma de librerías de usuario y la 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.

2.5.2.4 | Visual Basic

Es un lenguaje de programación desarrollado por el alemán Alan Cooper para Microsoft. El lenguaje de programación es un dialecto de BASIC, con importantes agregados. Su primera versión fue presentada en 1991, con la intención de simplificar la programación utilizando un ambiente de desarrollo completamente gráfico que facilitara la creación de interfaces gráficas y, en cierta medida, también la programación misma. Desde el 2001 Microsoft ha propuesto abandonar el desarrollo basado en la API Win32 y pasar a trabajar sobre un framework o marco común de librerías (independiente de la versión del sistema operativo) llamado “.NET Framework”, a través de Visual Basic .NET.

Visual Basic (en Visual Studio) constituye un IDE (Integrated Development Environment) que ha sido empaquetado como un programa de aplicación, es decir, consiste en un editor de código, un depurador, un compilador, y un constructor de interfaz gráfica o GUI (es una forma de programar en la que no es necesario escribir el código para la parte gráfica del programa, sino que se puede hacer de forma visual) [11].

2.5.2.5 | Lenguaje de programación visual LabVIEW

LabVIEW es un entorno de programación gráfica usado por miles de ingenieros e investigadores para desarrollar sistemas sofisticados de medida, pruebas y control usando íconos gráficos e intuitivos y cables que parecen un diagrama de flujo. LabVIEW ofrece una integración incomparable con miles de dispositivos de hardware y brinda cientos de bibliotecas integradas para análisis avanzado y visualización de datos.

La plataforma LabVIEW es escalable a través de múltiples objetivos y sistemas operativos, desde su introducción en 1986 se ha vuelto un líder en la industria [12].

Los programas desarrollados con LabVIEW se llaman Instrumentos Virtuales, o VIs, y su origen provenía del control de instrumentos, aunque hoy en día se ha expandido ampliamente no sólo al control de todo tipo de electrónica (Instrumentación electrónica) sino también a su programación embebida. Un lema tradicional de LabVIEW es: "La potencia está en el software", que con la aparición de los sistemas multinúcleo se ha hecho aún más patente.

Entre sus objetivos están el reducir el tiempo de desarrollo de aplicaciones de todo tipo (no sólo en ámbitos de Pruebas, Control y Diseño) y el permitir la entrada a la informática a profesionales de cualquier otro campo. LabVIEW consigue combinarse con todo tipo de software y hardware, tanto del propio fabricante -tarjetas de adquisición de datos, PAC, Visión, instrumentos y otro hardware- como de otros fabricantes [12].

2.6 | Interfaz GPIB (IEEE 488)

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 serial o paralela. Esta última realiza la transmisión simultánea 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 se usan ampliamente y 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, por mucho, el más usado [7]. 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 Automáticos (*Automatic Test Equipment, ATE*) [7].

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 el 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 irrepetible, que se logra mediante la asignación de una dirección codificada con 7 bits para cada instrumento [4].

El estándar IEEE 488 actualmente se integra por el estándar IEEE 488.1 (que define el hardware: 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. La interfaz GPIB utiliza un conector especial de 24 terminales, ordenados en 2 filas paralelas. La (Fig. 17) muestra el aspecto físico del conector y el estándar de la distribución de las líneas.

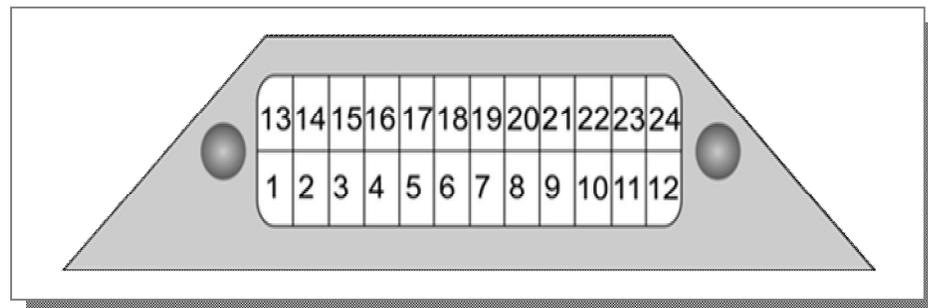


Fig. 17 Conector de la interfaz GPIB

Las normas del estándar IEEE 488.1 definen que todo sistema GPIB debe trabajar con lógica negativa. El estándar IEEE 488.2, surge con la finalidad de resolver ambigüedades y problemas (siendo un complemento de IEEE 488.1); 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.

Capítulo 3

DISEÑO DEL SISTEMA

El software forma parte de un sistema de mediciones y está conformado por software y hardware como se muestra en la (Fig. 18). Por lo que interactúa con diversos dispositivos: LCR-medidor QuadTech 7600 y una fuente de voltaje Keithley 6487, además de la tarjeta KPCI-488. Para el diseño del software se ordenó 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:

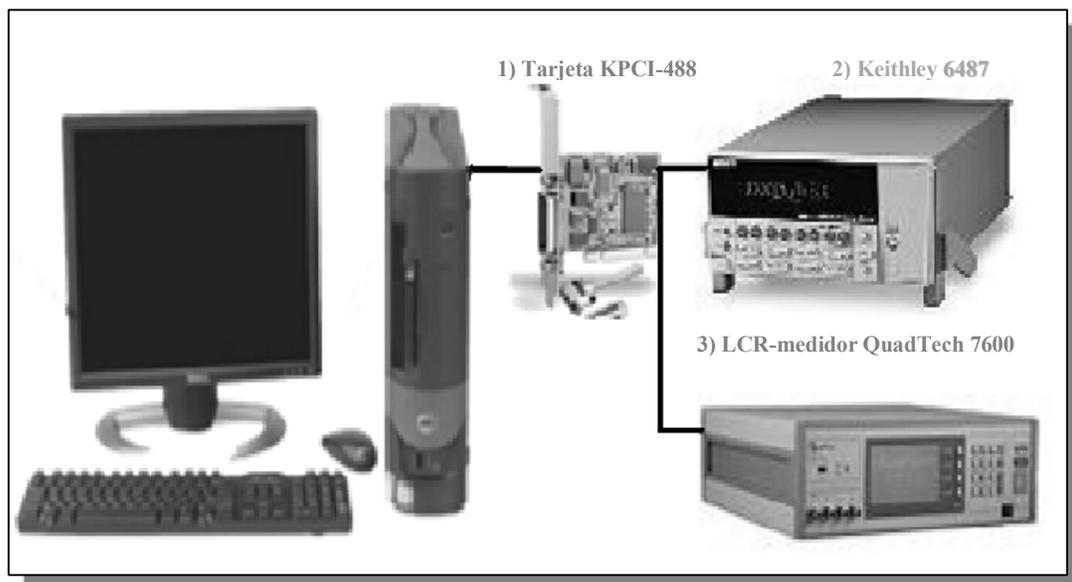


Fig. 18 Configuración del sistema de medición

3.1 | Componentes del sistema

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 tarjeta es recomendada por el fabricante del equipo Keithley 6487 para el control de equipo automatizado de prueba en los laboratorios y en la industria.

2) Fuente de voltaje Keithley 6487. Es un instrumento de 5-1/2 dígitos que puede aplicar tensiones de hasta 500 V a un elemento en test y medir corrientes tan bajas como 20nA. Mide resistencia hasta 5×10^{16} ohms utilizando la fuente de tensión, mide la corriente, la velocidad de adquisición de datos es de 1000 lecturas/s a la memoria buffer. En este sistema de mediciones, la Keithley 6487 será usada como fuente externa.

3) LCR-medidor QuadTech 7600. Está diseñado para realizar mediciones precisas de varios parámetros: capacitancia, inductancia, resistencia, factor de disipación, impedancia, admitancia, ángulo de fase, etc. (14 diferentes parámetros). También es posible medir todos parámetros mencionados bajo un voltaje directo hasta de 2 V usando la fuente interna del equipo QuadTech y hasta de 500 V usando fuente externa.

4) software. Éste tiene por objetivo adquirir los datos de LCR-medidor QuadTech 7600 y una fuente de voltaje Keithley 6487 para automatizar el sistema de mediciones de capacitancia, inductancia, resistencia, factor de disipación, impedancia, admitancia. Para realizar esta tarea se cuenta con un subsistema de comunicación y control.

El flujo de comunicación que se establece entre los dos equipos y la computadora se representa en la (Fig. 19).

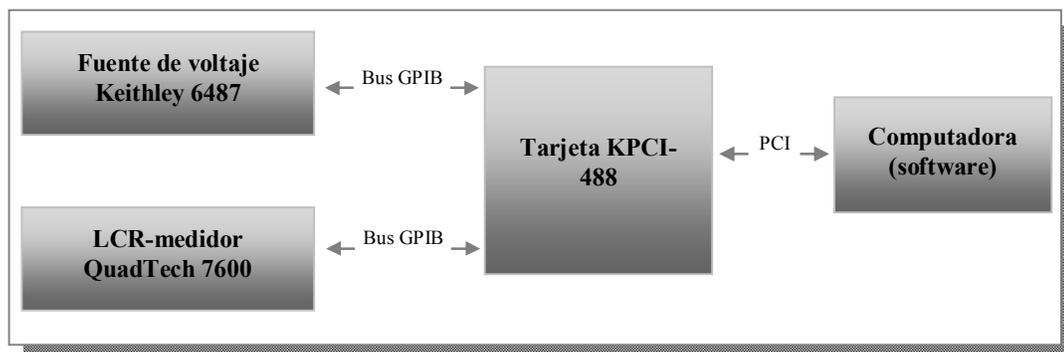


Fig. 19 Diagrama de módulos de comunicación

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 software se encarga del envío de comandos al LCR-medidor QuadTech 7600 y a la fuente de voltaje Keithley 6487 para que trabajen simultáneamente.

3.2 | Requisitos del software

Para obtener los requisitos del software se hizo un análisis de los procesos del software y se represento con diagramas UML, primero se obtuvieron los casos de uso (Fig. 20).

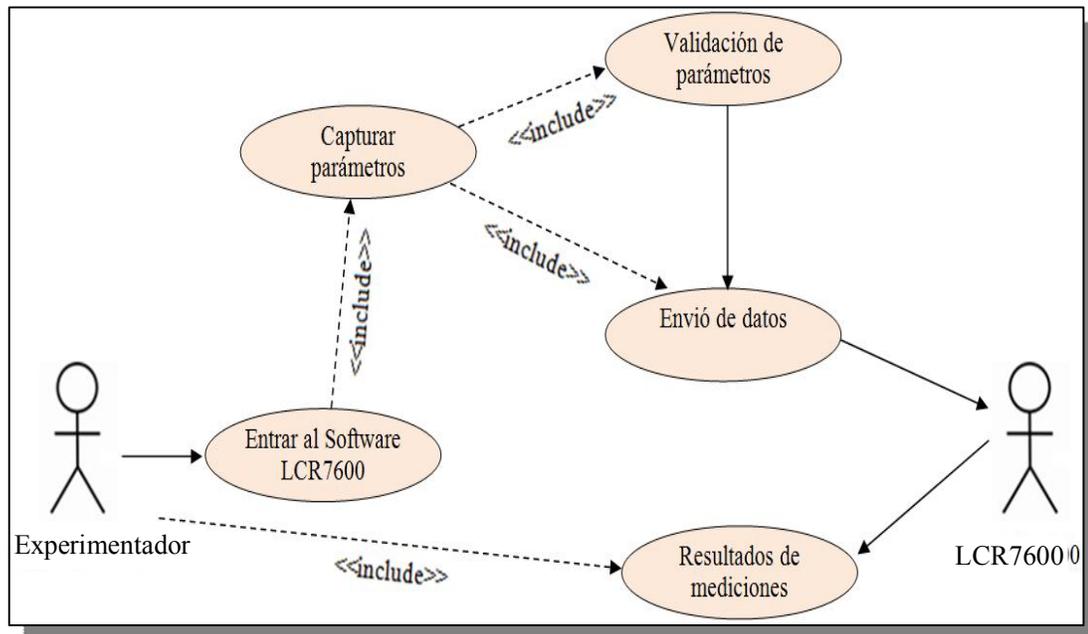


Fig. 20 Diagrama de casos de uso del sistema

Después de obtener los casos de uso, se formularon los requisitos y se clasificaron en requisitos funcionales (Fig. 21) y no funcionales (Fig. 22). Los requisitos funcionales son todos aquellos requisitos dados por el usuario para obtenerse como resultado del software. Mientras que los requisitos no funcionales son las restricciones que el usuario pidió que el software tuviera para la seguridad, precisión y manejo de errores.

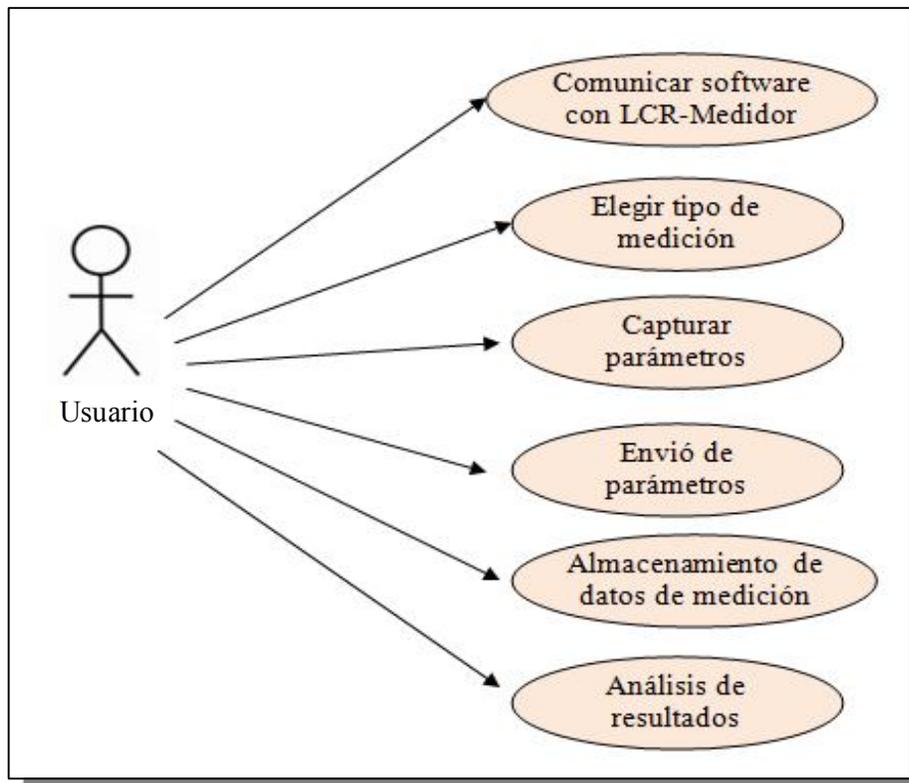


Fig. 21 Diagrama de requisitos funcionales

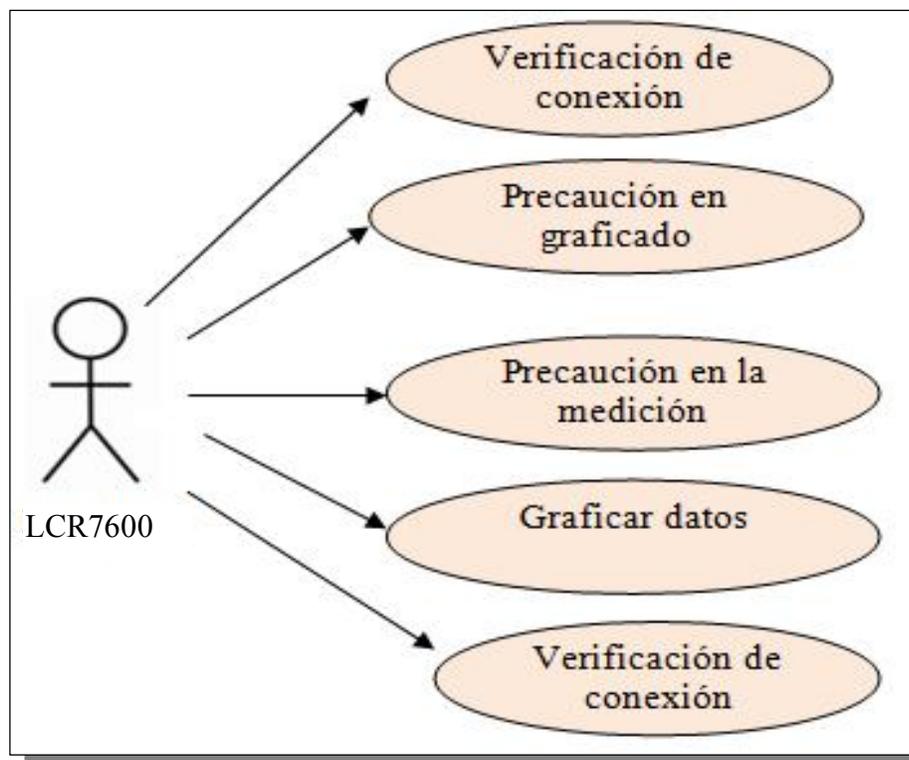


Fig. 22 Diagrama de requisitos no funcionales

En la Tabla 7 se presenta la lista de requisitos funcionales, y en la Tabla 8 los requisitos no funcionales.

Tabla 7. Requisitos funcionales del software

Tipo de requisito		Descripción.
Requisitos funcionales	Comunicar el equipo LCR-medidor QuadTech 7600 con la computadora.	El software debe establecer una comunicación entre la computadora y LCR-medidor QuadTech 7600 a través de la tarjeta KPCI-488.
	Establecer el modo de trabajo del LCR-medidor QuadTech 7600.	Mediante la interfaz gráfica el usuario podrá elegir la opción ó modo de trabajo de LCR-medidor QuadTech 7600; los tipos son: -Capacitancia y conductancia vs voltaje directo; -Capacitancia y conductancia vs frecuencia para voltaje directo fijo; -Capacitancia y conductancia a un voltaje directo fijo como la función de tiempo t .
	Requerir los parámetros de la señal.	El usuario debe capturar los parámetros que serán enviados al equipo, según el tipo de medición.
	Envío de parámetros	El usuario tiene la responsabilidad de enviar los datos al equipo.
	Almacenamiento de datos.	El software debe almacenar los datos de la medición en un archivo de texto plano, al igual que respaldar la gráfica de resultados que se muestra en pantalla.
	Amigable e intuitivo.	La interfaz del software debe ser intuitiva y adecuada al usuario, siendo muy fácil de entender.

Tabla 8. Requisitos no funcionales del software

Tipo de requisito		Descripción.
Requisitos no funcionales	Verificación de conexión	Una vez que el usuario conecto el equipo de forma física, el software debe reconocer la conexión y verificar si es correcta.
	Precaución en el graficado	El software debe identificar si los valores capturados por el usuario son validos para graficar ó están fuera de rango, si es así automáticamente debe de modificar los rangos y reajustar las coordenadas al graficar.
	Validar datos de entrada.	El software debe proteger la muestra sujeta a investigación y los equipos QuadTech 7600

	y la fuente de voltaje Keithley 6487, por lo tanto debe enviar avisos al usuario si los parámetros no son correctos, para evitar daños.
Graficado de datos.	El software debe graficar las características de cada uno de los modos de trabajo: -Capacitancia y conductancia vs voltaje directo; -Capacitancia y conductancia vs frecuencia para voltaje directo fijo; -Capacitancia y conductancia a un voltaje directo fijo como la función de tiempo t .
Verificar el equipo.	El usuario debe estar pendiente de la medición y del equipo; por lo tanto debe verificar el equipo antes de iniciar la medición.

3.3 | Plataforma de desarrollo del software

Para desarrollar el software de adquisición de datos de LCR-medidor QuadTech 7600 y la fuente de voltaje Keithley 6487, se seleccionó como lenguaje de programación C++ utilizando el entorno de desarrollo integrado Microsoft Visual Studio C++ y la librería “IEEE_32.H” (proporcionada por el fabricante del LCR-medidor QuadTech 7600. Se optó trabajar con este lenguaje y entorno de desarrollo de programación por las siguientes ventajas:

- 1) Se utiliza C++ por los siguientes factores:
 - La compañía fabricante de los equipos LCR-Medidor QuadTech 7600 y Keithley proporcionan ejemplos para realizar la conexión con el equipo y configurar el envío y recepción de datos y sugiere el uso de lenguaje C++.
 - La programación se realiza en alto nivel pero con la posibilidad de tener un mayor control de la aplicación y un mejor rendimiento.
 - Los equipos LCR-medidor QuadTech7600 y Keithley 6487 pueden ser configurados en varios lenguajes de programación, pero la mayoría son de de bajo nivel y en la actualidad ya se les brinda muy poco soporte por parte de sus creadores, mientras que C++ es uno de los lenguajes de programación más usados actualmente y su desarrollo es orientado a objetos.
- 2) Se utiliza Microsoft Visual Studio C++ como entorno de desarrollo por lo siguiente:
 - La KPCI-488 es una tarjeta con interface GPIB para bus PCI y es la que permite conectar el medidor QuadTech y la fuente de voltaje Keithley al equipo de cómputo; esta tarjeta funciona bajo DOS y WINDOWS a 16 ó 32 bits. Por lo tanto se planeó que el desarrollo del software fuese bajo la misma plataforma que la del equipo de cómputo en donde se conecta LCR-medidor

QuadTech 7600 y Keithley 6487 (plataforma Windows), para evitar problemas de compatibilidad, por tanto, se optó por utilizar Microsoft Visual como entorno de desarrollo.

- Además de que Microsoft Visual Studio inicia su trabajo sobre un framework o marco común de librerías (independiente de la versión del sistema operativo) llamado “.NET Framework”, por lo tanto si en un futuro se quiere migrar nuestro sistema de mediciones a .NET no habría grandes complicaciones, lo cual es una gran ventaja.

3.4 | Modelo prescriptivo del 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 software fue el modelo en 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 (Fig. 23).

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.

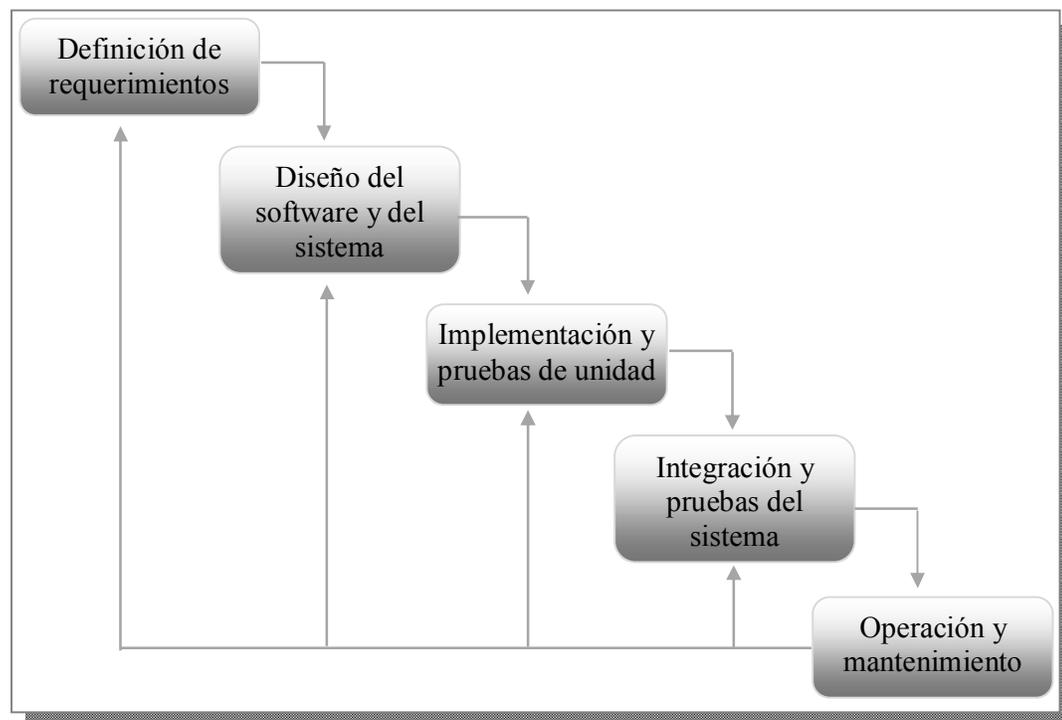


Fig. 23 Etapas del modelo en cascada

3.5 | Diseño del software

En el presente subcapítulo se muestran las fases del diseño del software, partiendo desde el diseño esquemático utilizado por el programador, hasta el diseño visto por el usuario y no olvidando el flujo en los procesos, atendiendo los siguientes puntos:

- Diagrama del flujo del software (Fig. 24).
- Diseño de interfaz de usuario.
- Representación con los módulos que componen el programa y funciones que realizan.

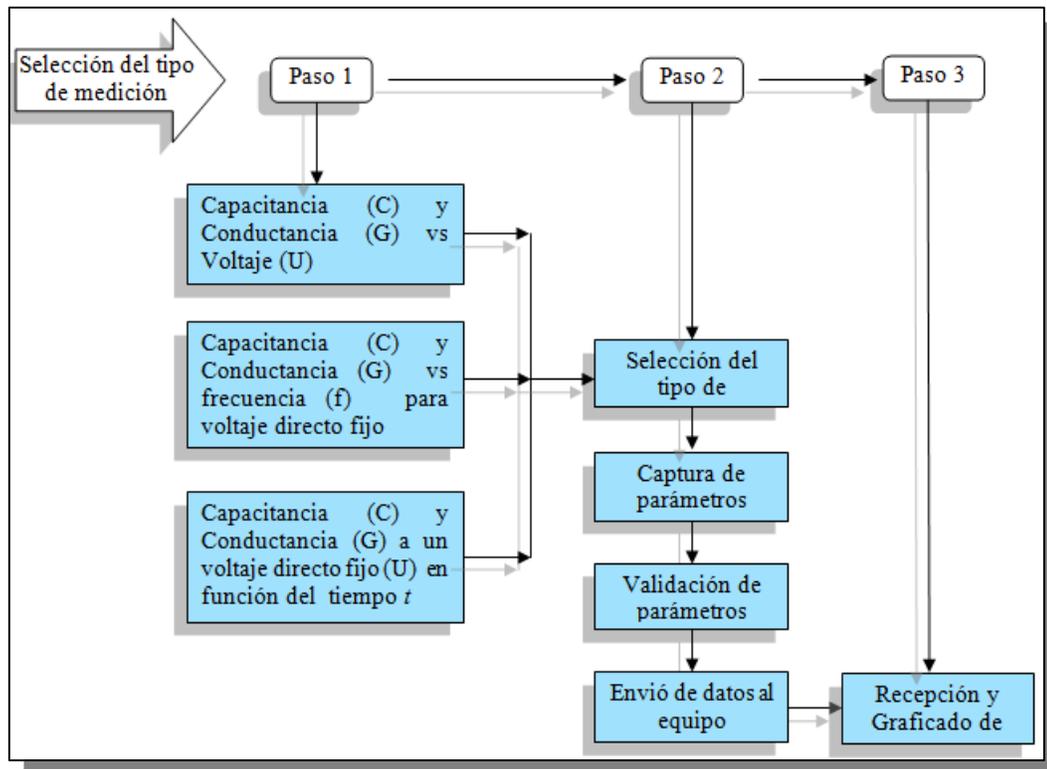


Fig. 24 Fases del modelo en cascada

3.5.1 | Diseño modular del software

El programa para la configuración de LCR-medidor QuadTech 7600 se integra por módulos diseñados para ejecutar una tarea en particular. Los módulos se dividen en internos y externos.

- Los módulos externos son aquellos que forman parte de la interfaz gráfica.
- Los módulos internos realizan tareas transparentes para el usuario relacionadas con la configuración de LCR-medidor QuadTech 7600. A continuación se especificará la función que desempeñan los módulos del programa y la relación que existe entre ellos.

Módulos externos: Para realizar una medición en LCR-medidor QuadTech 7600 el operador establece los parámetros de medición, el software cuenta con 3 opciones o menús y estos están estructurados de acuerdo a cada uno de los modos de medición que se realizan en LCR-medidor QuadTech 7600.

1. Capacitancia y conductancia vs frecuencia para voltaje directo fijo;
2. Capacitancia y conductancia vs voltaje directo;
3. Capacitancia y conductancia a un voltaje directo fijo como la función de tiempo t .

Así como se muestra en la (Fig. 25):

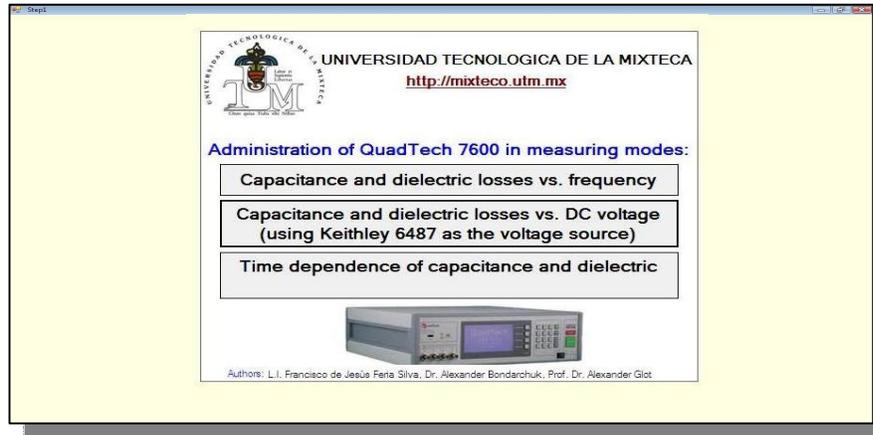


Fig. 25 Pantalla de bienvenida al software

En caso de elegir el modo de medición “Capacitancia y conductancia vs frecuencia para voltaje directo fijo”, se ingresan datos como frecuencia de inicio (f_{start}) y frecuencia final (f_{end}), también se ingresan datos para controlar el equipo LCR-medidor QuadTech 7600, además del nombre del experimentador, número y tipo de medición, la interfaz se muestra en la (Fig. 26).

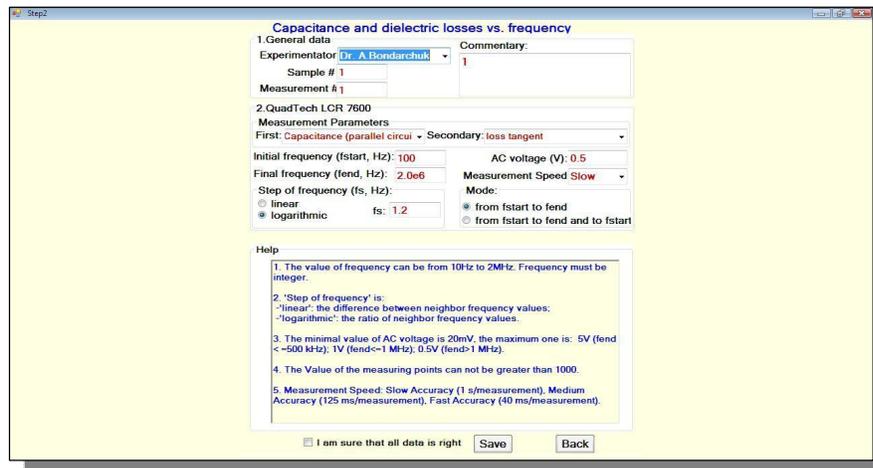


Fig. 26 Pantalla del software con el modo de medición capacitancia y conductancia vs frecuencia

Para el segundo menú la opción “Capacitancia y conductancia vs voltaje directo”, en este caso es importante definir el voltaje de inicio (U_{start}) y el voltaje final (U_{end}) su diseño se puede apreciar en la (Fig. 27).

The screenshot shows a software window titled "Step2" with the following configuration:

- 1. General data:** Experimentator: Dr. A Bondarchuk, Sample #: 1, Measurement #: 1, Commentary: 1.
- 2. Keithley 6487:** Initial voltage (Ustart, V): 1, Final voltage (Uend, V): 300, Step of voltage (Us, V): 3 (linear mode selected), DC current limit (A): 5e-3, Pause (s): 3.
- 3. QuadTech LCR 7600:** First: Capacitance (parallel circuit), Secondary: loss tangent, Frequency (Hz): 100, AC voltage (V): 0.5, Measurement Speed: Slow.

A help section at the bottom provides technical details and constraints for the measurements.

Fig. 27 Pantalla del software con el modo capacitancia y conductancia vs voltaje directo

La tercera opción es “Capacitancia y conductancia a un voltaje directo fijo en función de tiempo t ”, en este tipo de medición se ingresan los parámetros de voltaje y frecuencia, y la medición se hace en función al tiempo, por lo tanto se ingresa el punto de inicio (Initial point) y el punto de tiempo final (Final point), así mismo la gráfica que genera el software se construirá en función a estos puntos, el diseño del software para esta función se muestra en la (Fig. 28).

The screenshot shows a software window titled "Step2_2" with the following configuration:

- 1. General data:** Experimentator: Dr. A Bondarchuk, Sample #: 1, Measurement #: 1, Commentary: 1.
- 2. QuadTech LCR 7600:** First: Capacitance (parallel circuit), Secondary: loss tangent, AC voltage (V): 0.5, Frequency (Hz): 100, Measurement Speed: Slow.
- 3. Keithley 6487:** Fixed DC voltage (V): 100, DC current limit (A): 5e-3.
- 4. Time:** Initial point (s): 0, Final point (s): 60, Step (s): 1.

A help section at the bottom provides technical details and constraints for the measurements.

Fig. 28 Pantalla capacitancia y conductancia a un voltaje directo en función del tiempo t

Los valores introducidos por el usuario para la configuración de LCR-medidor QuadTech 7600 deben de ser correctos para que el programa continúe, por lo tanto en cualquiera de los tres tipos de medición, Si los datos introducidos son correctos y el usuario pulsa el botón de “Siguiente” se muestra un menú de verificación de datos.

Módulos internos: Este módulo de verificación básicamente es un resumen de los datos proporcionados por el usuario para realizar la medición. El resumen muestra 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 LCR-medidor QuadTech 7600 mediante el módulo interno.

Construcción y envío de los comandos para LCR-medidor QuadTech 7600:

Este módulo se encarga de modificar los comandos básicos de lenguaje de alto nivel para LCR-medidor QuadTech 7600 y poder enviar datos al equipo de acuerdo a la configuración del usuario, para hacer este proceso se utilizó el manual de LCR-medidor QuadTech 7600 ahí detalla cuáles son los comandos de envío y recepción de datos después de la medición, a continuación se muestra un algoritmo que describe el flujo del software (Fig. 29).

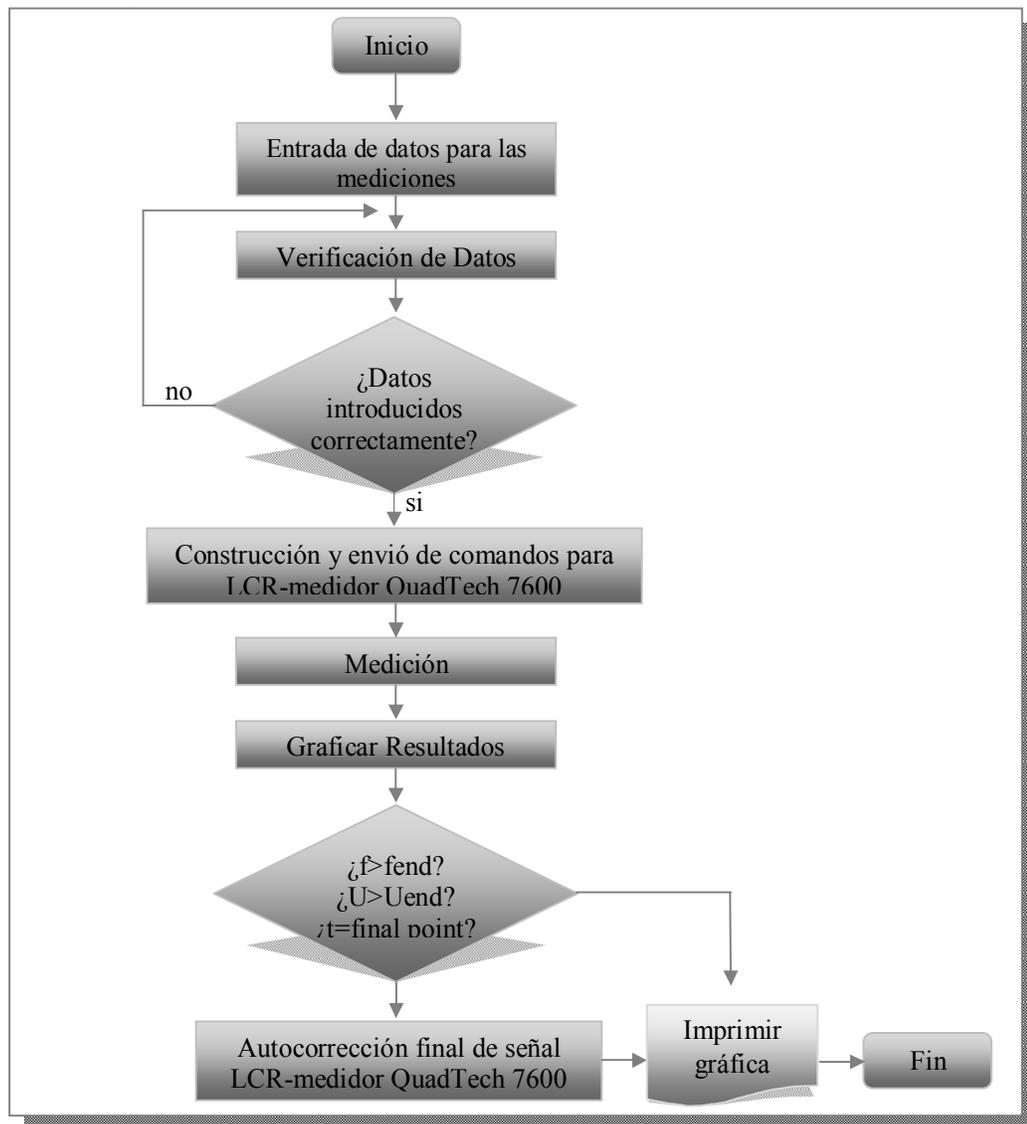


Fig. 29 Diagrama de flujo del software

Para el presente diagrama de flujo f es la frecuencia actual y f_{end} es la frecuencia máxima seleccionada por el usuario. Para el otro modo de medición U es el voltaje actual y U_{end} es el voltaje máxima permitido y finalmente el tercer modo en donde t es el tiempo de inicio y (final point) es el punto final donde se medirá la capacitancia, con voltaje directo en función del tiempo t .

Modulo de resultados: Este módulo es para graficar el resultado de la medición en tiempo de ejecución. Después se verifica la condición $f > f_{end}$, $U > U_{end}$ ó $t = \text{final point}$. 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 módulo de “Construcción y envío de los comandos para LCR-medidor QuadTech 7600”. Cuando se cumple con el número total de mediciones el software guarda los resultados en un archivo e imprime en pantalla la grafica de la medición, como se muestra en la (Fig. 30).

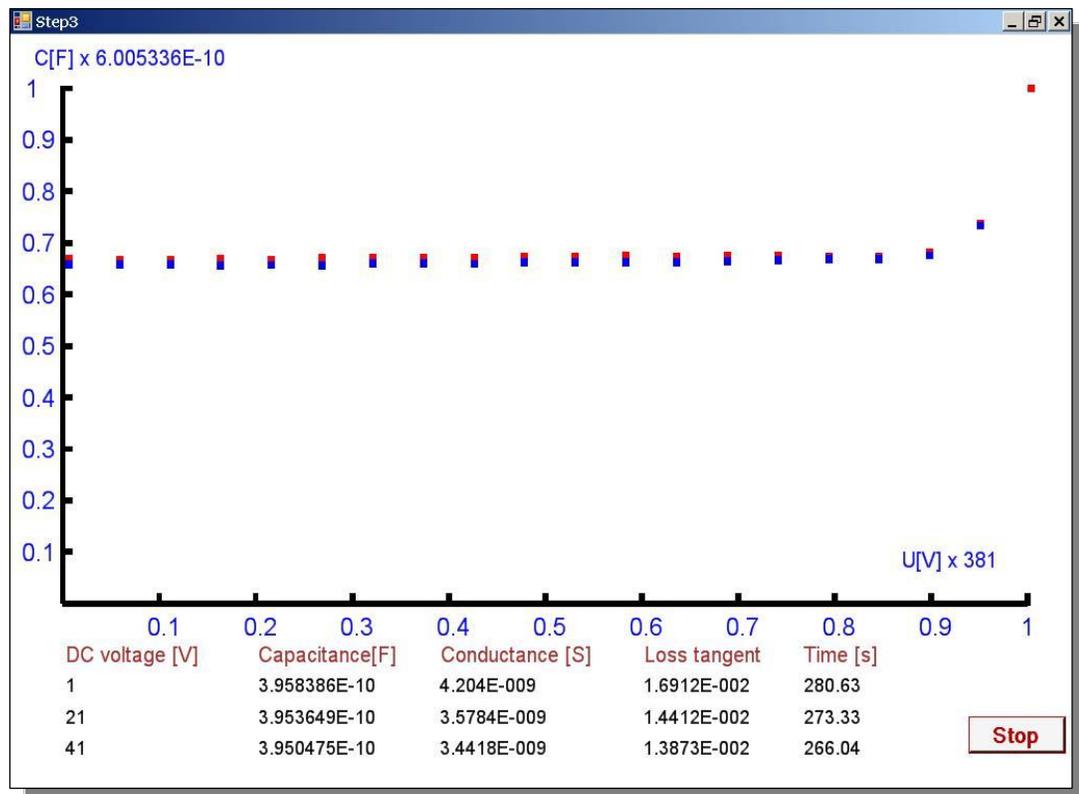


Fig. 30 Pantalla del graficado del software

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

Generación de archivo: Este módulo guarda los valores obtenidos de la medición (resultados del módulo medición) en un archivo de texto plano ó simple (.txt) bajo una estructura definida para facilitar al experimentador la portabilidad de los datos, además que pueda utilizar los datos en otro tipo de herramientas por ejemplo OriginLab (herramienta de análisis de datos).

3.5.2 | Módulos para envío de comandos a LCR-medidor por medio del software.

Para el diseño y programación de los módulos que configuran a LCR-medidor QuadTech 7600 se usaron tres comandos básicos Tabla 9. Estos tres comandos son suficientes para crear la conexión entre el equipo y el software. A continuación se presentan los algoritmos base usados para la construcción de los módulos que usan los comandos GPIB propias del instrumento LCR-medidor QuadTech 7600 y la fuente de voltaje Keithley 6487.

Tabla 9. Comandos básicos para programar LCR-medidor QuadTech 7600 y Keithley6487

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)
ENTER	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. ENTER (recv,maxlength,length,address,status)

Para inicializar y configurar LCR-medidor QuadTech 7600 los pasos se muestran en la (Fig. 31) y para configurar la fuente de voltaje Keithley 6487 los pasos se muestran en la (Fig. 32). Antes se inicializa la tarjeta de adquisición de datos. Después se acondicionan los equipos para iniciar las mediciones y por último se configura LCR-medidor QuadTech 7600 y la fuente de voltaje Keithley 6487.

Los parámetros usados en la conexión de los equipos de medición en el sistema pueden seguir la misma secuencia de comandos y así mismo seguir una misma ideología en la configuración.

Para LCR-medidor QuadTech 7600 se hace uso de varios comandos de configuración, la secuencia de comandos tienen un orden como se muestra en la (Fig. 31).

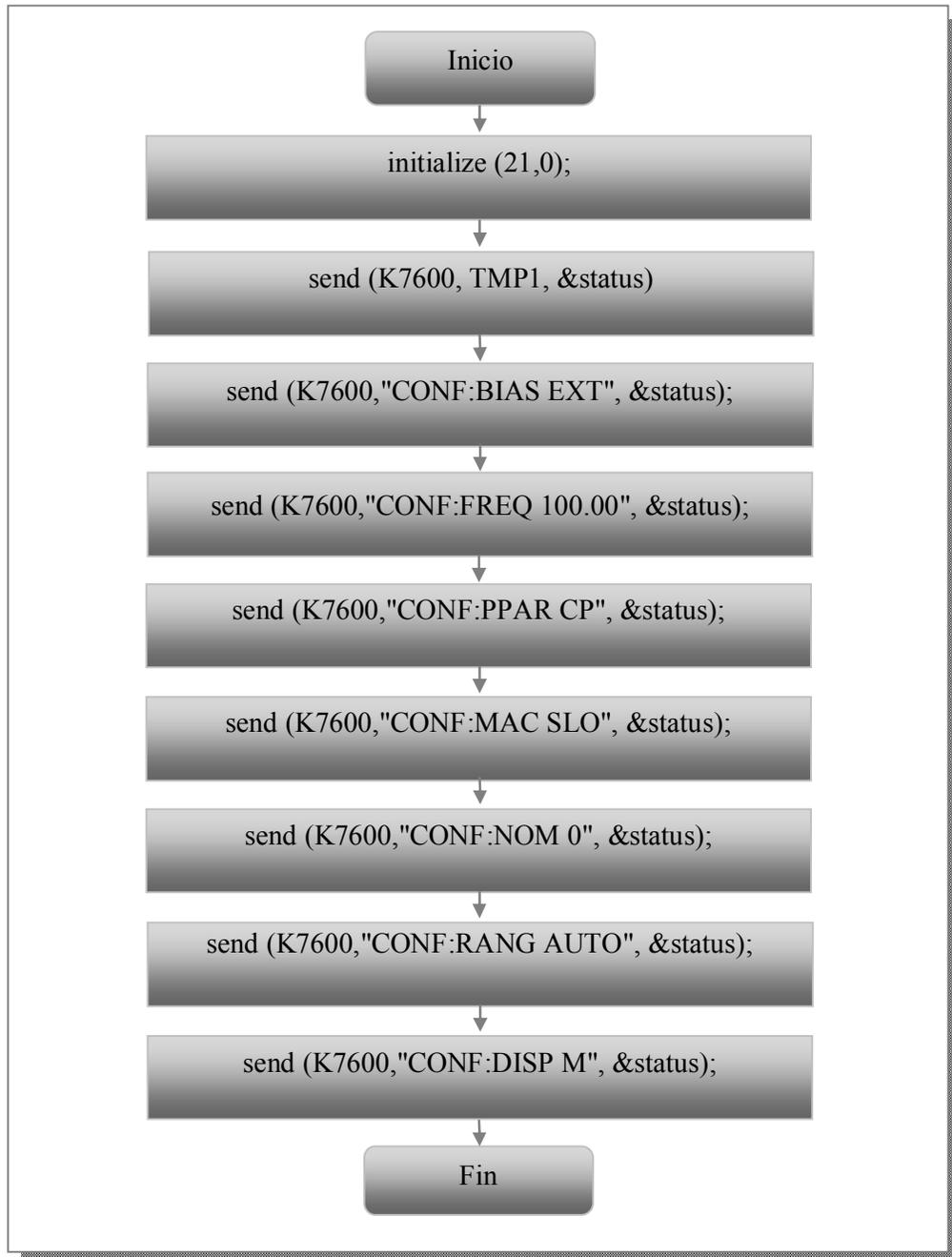


Fig. 31 Secuencia de comandos para inicializar LCR-medidor QuadTech 7600

Para la fuente de voltaje Keithley 6487 la distribución para envío y recepción de datos, se hace bajo una configuración de comandos y esta tiene una secuencia definida como se muestra en la (Fig. 32).

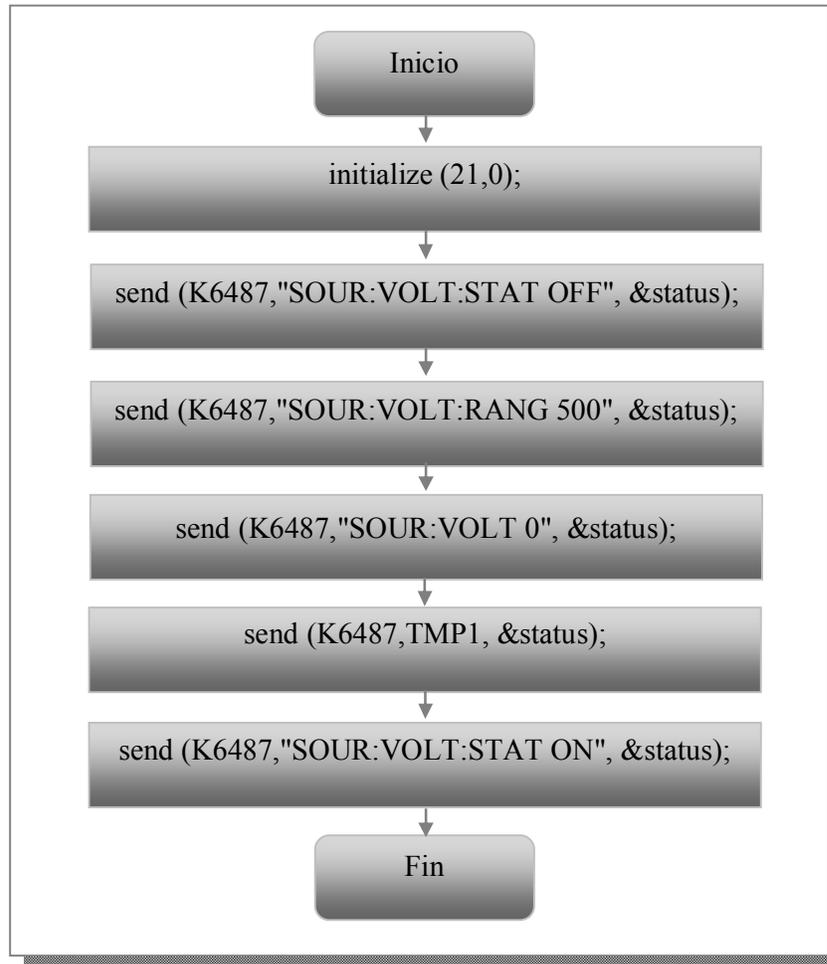


Fig. 32 Secuencia de comandos para la fuente de voltaje Keithley 6487

Capítulo 4

PRUEBAS AL SISTEMA

El objetivo de esta etapa consistió en probar el funcionamiento del programa de acuerdo con las especificaciones y los requisitos del usuario. El capítulo considera las pruebas que se realizaron para comprobar el correcto funcionamiento del equipo y del software. 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 (Fig. 33) Durante el capítulo se enfatiza en las pruebas funcionales debido a que a partir de ellas se realizó una investigación.

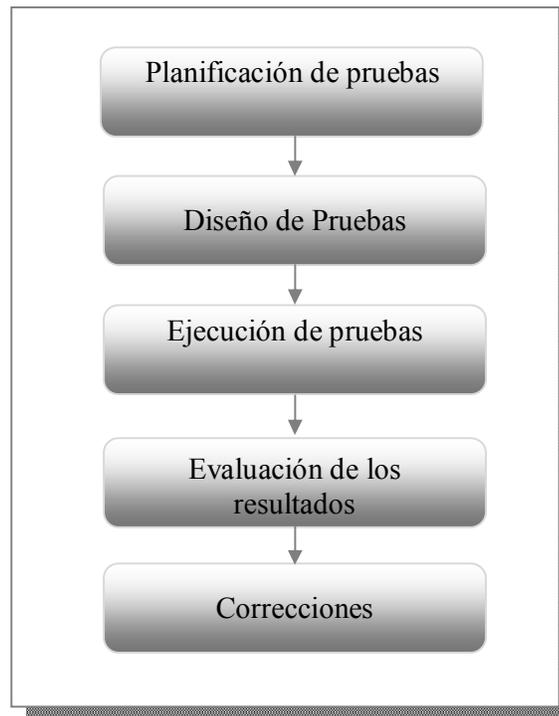


Fig. 33 Ciclo de pruebas

4.1 | Pruebas aplicadas al hardware

Para comprobar el correcto funcionamiento de LCR-medidor QuadTech 7600 y la fuente de voltaje Keithley 6487 en forma remota se realizaron una serie de pruebas usando la herramienta 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. Esta aplicación es bajo MS-DOS. Los datos son enviados y recibidos respectivamente a través de funciones (Fig. 34).

Con TRTest se puede verificar la comunicación y el funcionamiento del equipo LCR-Medidor QuadTech 7600 de una forma sencilla y clara. Para esto es importante lo siguiente:

- Primero se debe verificar que el instrumento esté conectado correctamente y configurado 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: _
```

Fig. 34 Aplicación “TRTEST” para control GPIB diseñado por CEC

4.2 | Pruebas aplicadas al software

4.2.1 | Pruebas de ejecución de comandos

En este apartado se realizaron pruebas sobre las funciones internas de los módulos que componen el programa. 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 se siguió una secuencia de pasos. A continuación se describe el proceso para efectuar la prueba estructural a la función de inicialización y configuración de LCR-medidor QuadTech 7600 y la fuente de voltaje Keithley 648 (las demás pruebas siguieron el mismo orden por lo cual no se presentan).

1. Enumeración del código: Se hace una segmentación del código.

```
void UFM237 (void){
1. char temp_1[50], temp_2[50];
2. int status;
```

1

```
3. initialize (21,0);
4. send (K7600,"BREAK", &status);
5. printf("status=%d\n",status);
6. send (K7600, "RESET", &status);
7. printf("status=%d\n",status);
8. send (K7600,"REMOTE 716",&status);
9. printf("status=%d\n",status);
10.Sleep(t);
11.send (K7600,"CLEAR", &status);
12.printf("status=%d\n",status);
13. Sleep(t);
```

2

```
14. if ((bandera0==1)|| (bandera0==3)) {
```

3

```
15. send (K7600,"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 (K7600,"L9.5E-3,0X",&status);}
```

6

```
25. else {send (K7600,temp_2,&status); printf("\nOk!");}
```

7

```
26. printf("status=%d\n",status); }
```

8

```
27. if (bandera0==2) {
```

9

```

28. send (K7600,"F1,0X",&status);
29. Sleep(t);
30. send (K7600,"L1001,0X",&status);
31. printf("status=%d\n",status);
    
```

10

2. Diseño de grafos de flujo: En base a la enumeración del código (realizada en el paso 1) dibujamos el código con grafos de flujo (Fig. 35).

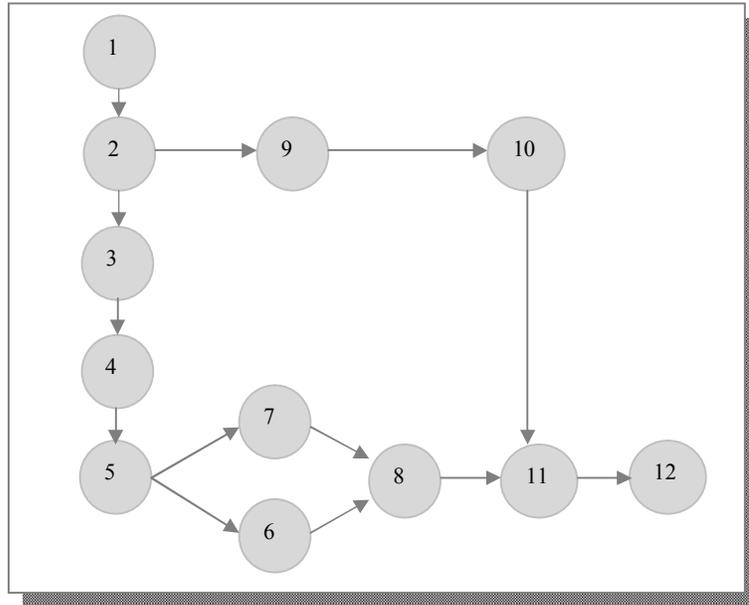


Fig. 35 Dibujo del código con grafos de flujo

3. Dibujamos el código con grafos de flujo y asignamos regiones (Fig. 36).

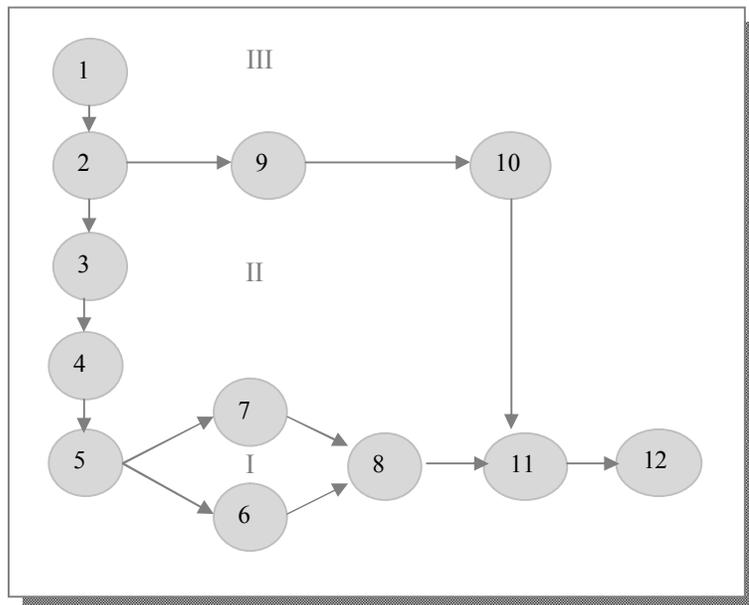


Fig. 36 Dibujo del código con grafos de flujo e identificación de regiones

4. Establecemos los caminos recorriendo las regiones.

Tabla 10. Casos de prueba A

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 11. Casos de prueba B

Camino	L_{14}	L_{23}	L_{27}
c_1	Verdadero	Falso	Falso
c_2	Verdadero	Verdadero	Falso
c_3	Falso	----	----

L_{14} : if ((bandera0==1)|| (bandera0==3))

L_{23} : if ((Imax+0.1*Imax)>9.8e-3)

L_{27} : if (bandera0==2)

4.2.2 | Pruebas de caja negra

En esta prueba se verificó la relación en dos módulos de entrada y salida 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 del modulo de entrada y se compararon con las salidas esperadas.

Durante este tipo de pruebas se verificó el funcionamiento de los siguientes aspectos:

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 LCR-medidor QuadTech 7600 y la fuente de voltaje Keithley 6487. Se ejecutó el programa y se verificó que los equipos respondieran de acuerdo a la instrucción.
3. Se verificó el módulo de salida para crear la gráfica del resultado de la medición en tiempo de ejecución y el módulo de aproximación del coeficiente de no linealidad.
4. Se realizó la verificación de la creación de archivo.
5. también el módulo de salida de esta prueba consistió en obtener las características de corriente voltaje de diferentes componentes electrónicos Tabla 12, con el objetivo de evaluar lo que es capaz de hacer el programa y su funcionalidad.

Tabla 12. Casos de prueba C

Tipo de dispositivo	Nomenclatura	Descripción
Resistor	5.6 Ω	Resistor de 5.6 Ω , 1W
Resistor	1.0 K Ω	Resistor de 1.0 $\cdot 1.0^3 \Omega$, 0.5 W
Resistor	68.0 K Ω	Resistor de 6.8 $\cdot 10^4 \Omega$, 0.5W
Diodo	1N4002	Diodo de silicio estándar. 1A,100V
Diodo zener	1N4728A	Diode zener. 1W, 3.3V
Varistor	S14K14	Varistor a base de ZnO
Varistor	S20K14	Varistor a base de ZnO
Varistor	Positron	Varistor a base de ZnO
Varistor	F3P2-1350	Varistor a base de SnO ₂
Varistor	SG-17A	Varistor a base de SnO ₂

4.2.3 | Pruebas de Acceso

La búsqueda de errores se realizó a través de:

1. Las pruebas de unidad. Sirvieron para comprobar el correcto funcionamiento de un componente concreto de la aplicación. Resultó bien que, conforme se le añadían nuevas funcionalidades a la aplicación, se le fueran realizando pruebas para medir el progreso y también para comprobar que lo que antes funcionaba siguiera funcionando, o en caso contrario dando paso a las pruebas de regresión.
2. Las pruebas de integración. Estas pruebas se realizaron después de haber concluido el total de la aplicación comprobando el buen funcionamiento de manera integral.
3. Pruebas de navegación. Éstas se realizaron para asegurarse que no hubiera enlaces rotos.

4.3 | Pruebas al sistema de mediciones con dispositivos comerciales

El siguiente paso consistió en realizar pruebas al sistema con dispositivos comerciales, para verificar que el sistema funcionará correctamente, primero se conectaron los equipos, como se menciona en el capítulo 3, el diseño consta de lo siguiente:

- PC para el control del software
- Software para administrar las mediciones
- tarjeta KPCI-488
- Equipo LCR-medidor QuadTech 7600
- Fuente de voltaje Keithley 6487
- Muestra sujeta a experimentación
-

Una vez que se conectaron los equipos, y se instaló el software quedó conformado el sistema de mediciones, la comunicación se aprecia físicamente en la siguiente figura (Fig.37).



Fig. 37 Sistema de mediciones

4.3.1 | Primer prueba: Capacitancia (C) y conductancia (G) vs frecuencia (f)

Se hizo una prueba con capacitores al sistema de mediciones con un circuito tipo RC paralelo ($R=4.7\text{Mohm}$, $C=1100\text{pF}$) como se muestra en la (Fig.38)

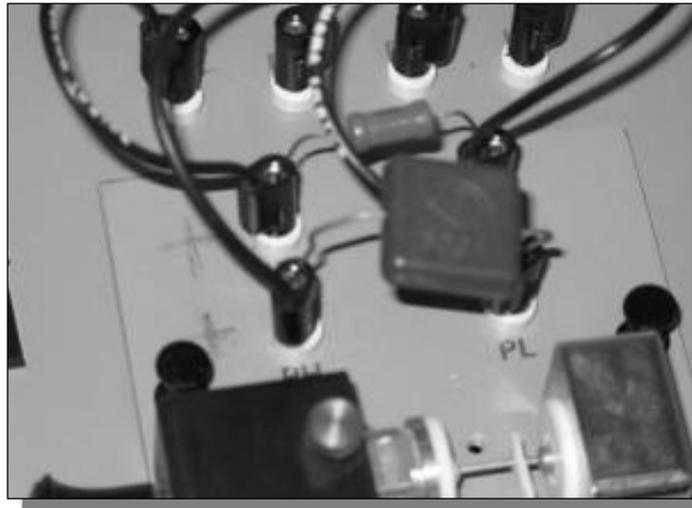


Fig. 38 Circuito sencillo de capacitor y resistor en paralelo

Después se configuro el software para trabajar bajo el modo capacitancia y conductancia vs frecuencia, en seguida elegimos los rangos de los parámetros de medición desde la interfaz del software (Fig. 39) y (Fig.40)

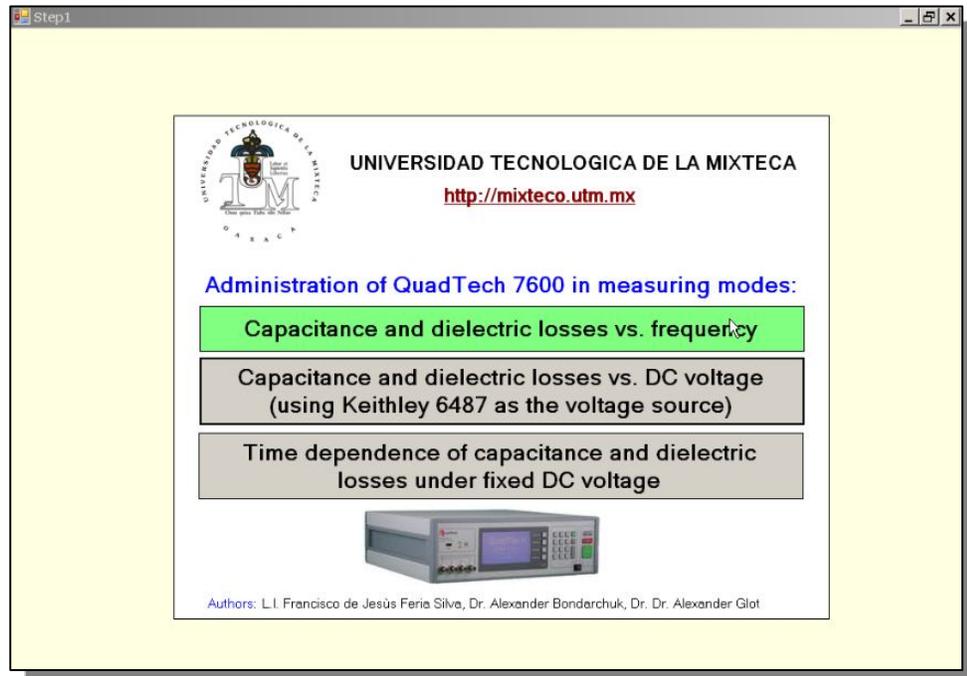


Fig. 39 Tipos de mediciones en la interfaz del software

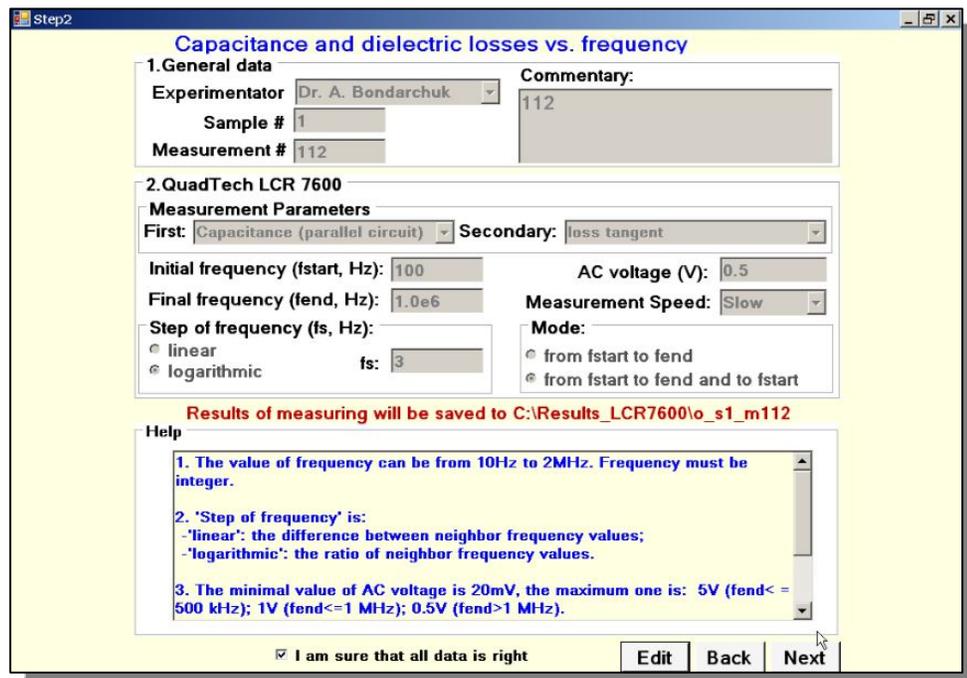


Fig. 40 Parámetros de la medición capacitancia y conductancia vs frecuencia

Finalmente se enviaron los parámetros a los equipos y se graficaron los resultados (Fig.41)

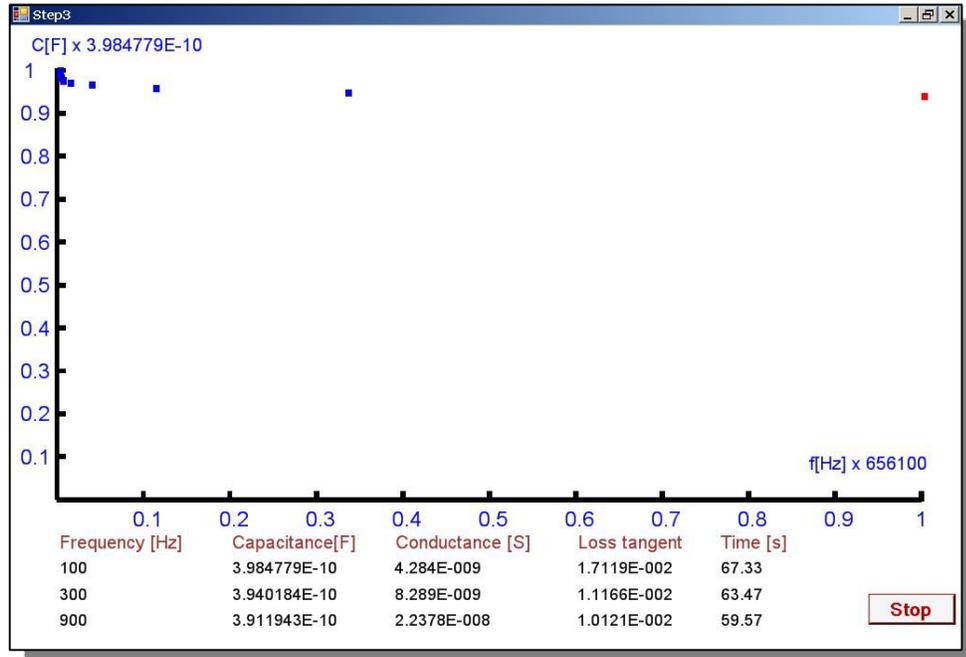


Fig. 41 Resultados de medición de capacitancia y conductancia vs frecuencia

4.3.2 | Segunda prueba: Capacitancia (C) y conductancia (G) vs voltaje directo (U)

Se utilizo el mismo circuito sencillo de la medición anterior (Fig.38) solo que ahora se hizo en el modo de medición capacitancia y conductancia vs voltaje directo fijo (Fig.42) y (Fig.43)

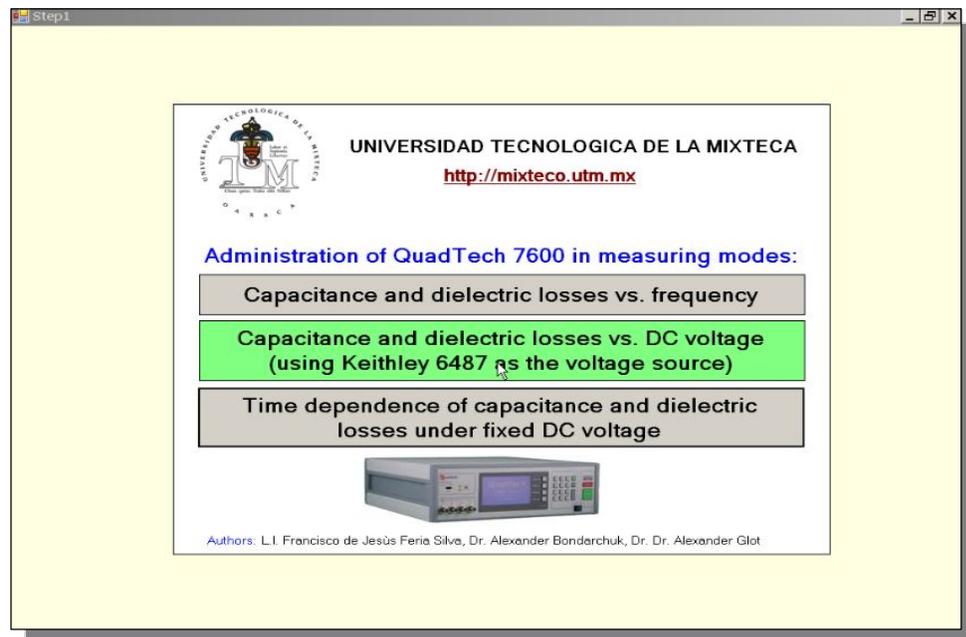


Fig. 42 Tipo de medición capacitancia y conductancia vs voltaje directo

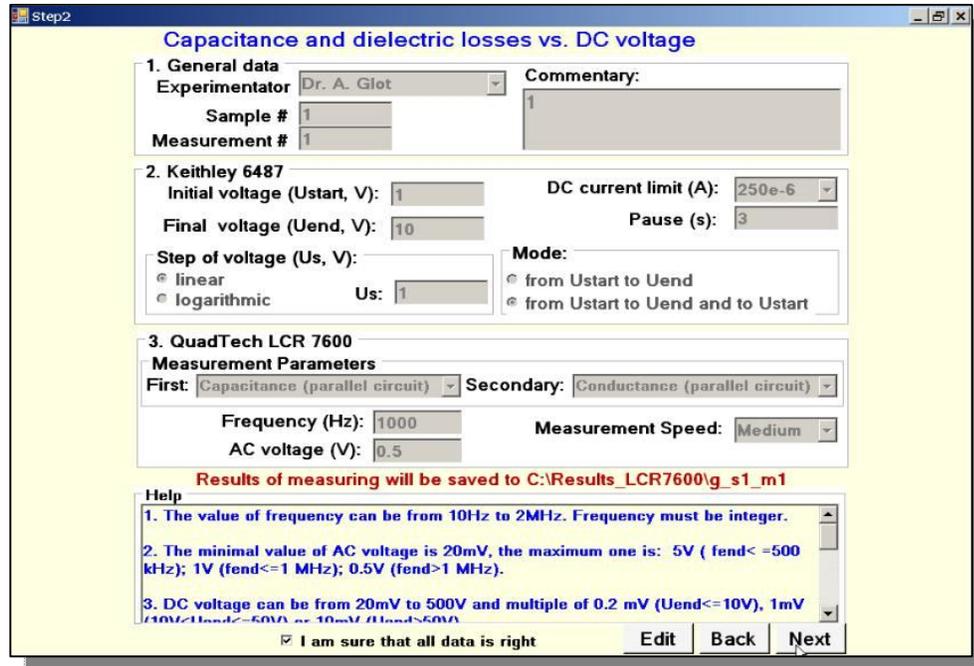


Fig. 43 Parámetros de la medición capacitancia y conductancia vs voltaje directo

4.3.3 | Tercer prueba: Capacitancia (C) y conductancia (G) a un voltaje directo fijo (U) como la función de tiempo (t)

Para esta prueba nuevamente se utilizo el circuito RC en paralelo, solo se cambio el modo de medición y se modifican los parámetros a medir, así como se muestran en la (Fig. 44), la grafica de resultados se aprecian en la (Fig.45)

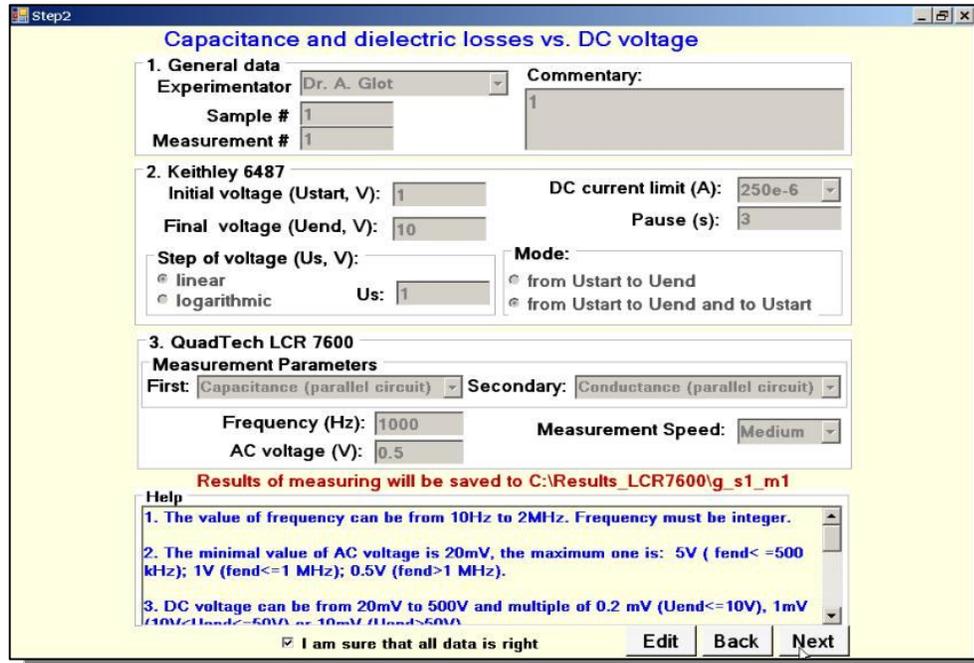


Fig. 44 Configuración de equipo para medir capacitancia (C) y conductancia (G) a un voltaje directo fijo (U) como la función de tiempo (t)

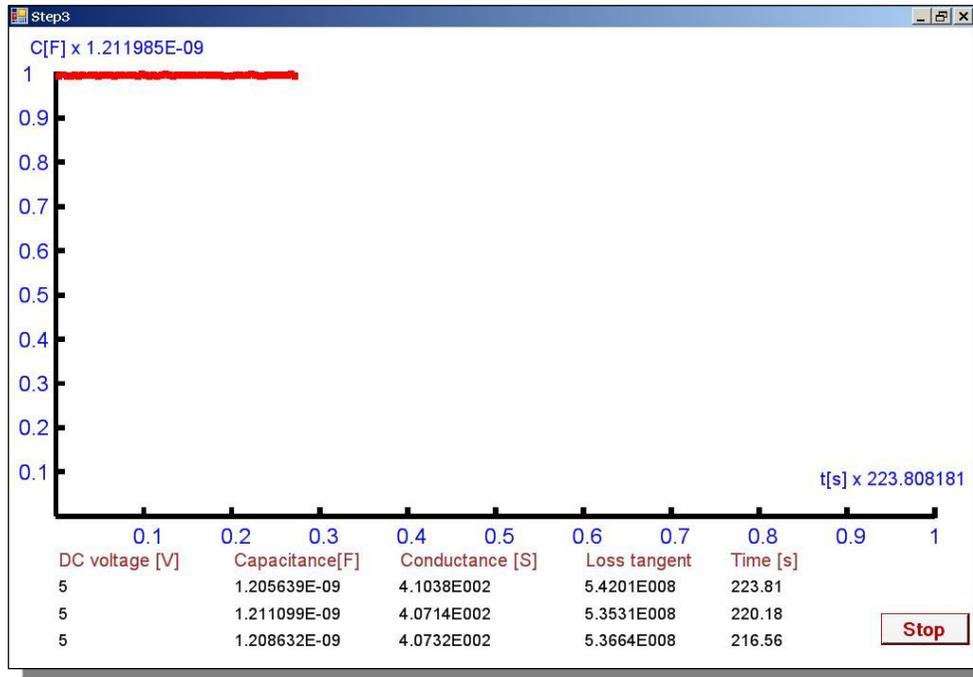


Fig. 45 Grafica de capacitancia (C) y conductancia (G) a un voltaje directo fijo (U) como la función de tiempo t

4.3.4 | Prueba de medición con un varistor comercial

También se hizo una prueba de varistores comerciales, en primer lugar se midió corriente-voltaje características de dicho varistor comercial, y esto se obtuvo de un trazador de curvas TEKTRONIX 576. Horizontal: 100v/div. Como se muestra en (Fig.46).

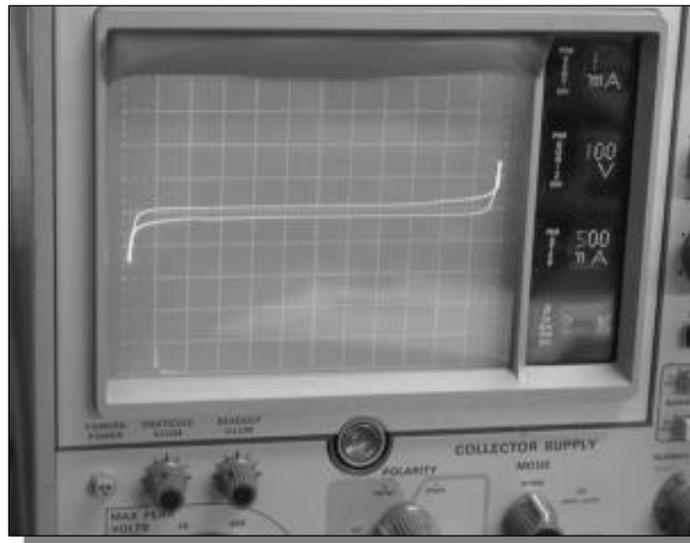


Fig. 46 Curvas de Corriente-voltaje de un varistor obtenidas de un trazador de curvas TEKTRONIX 576.

Después de pasar el varistor comercial por el trazador de curvas, se puso a prueba el varistor en nuestro sistema de medición LCR (Fig. 47) y (Fig. 48).



Fig. 47 Sistema de medición bajo prueba en LCR

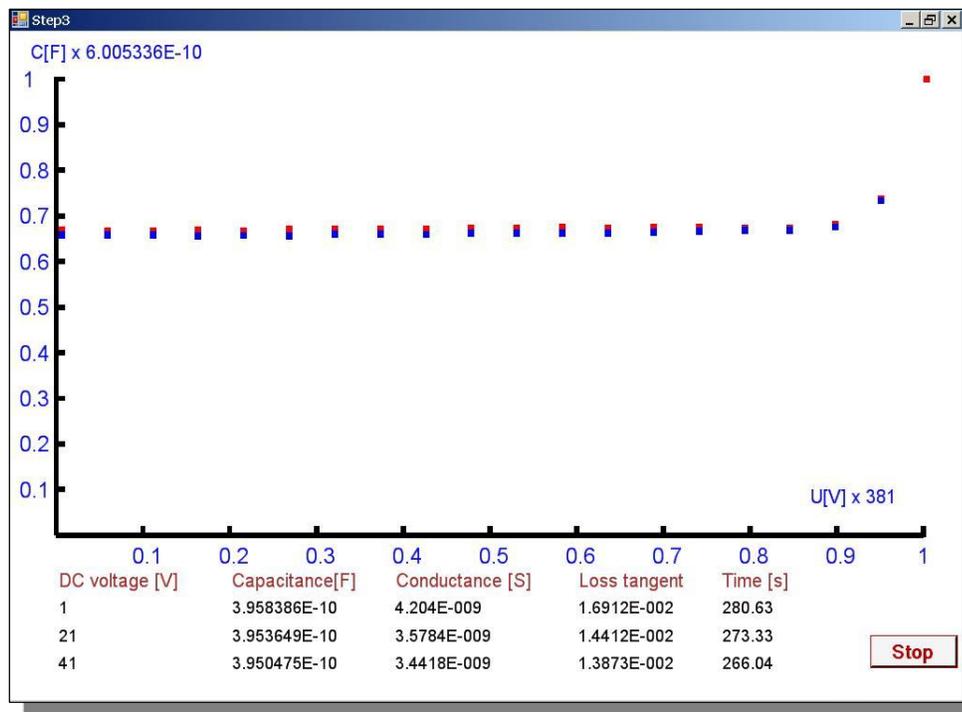


Fig. 48 Resultado de la medición C (U) de un varistor comercial

Se demuestra que las pruebas hechas con el software en el sistema de mediciones LCR-medidor QuadTech 7600 funcionan correctamente.

Capítulo 5

RESULTADOS EXPERIMENTALES

INVESTIGACIÓN DE INFLUENCIA DE TRATAMIENTO TÉRMICO EN CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE UN VARISTOR CERÁMICO $\text{SnO}_2\text{-CO}_3\text{O}_4\text{-NB}_2\text{O}_5\text{-CR}_2\text{O}_3$

Para evaluar el funcionamiento del software se hicieron mediciones con varistores a base de SnO_2 fabricados en la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM), Finalmente se efectuó una investigación de las características dieléctricas de estos varistores, sometidos a tratamientos térmicos adicionales, en comparación con los varistores de ZnO .

5.1 | Introducción al experimento

En la actualidad hay un gran interés por investigar nuevos varistores y más en específico en varistores a base de SnO_2 debido a que presentan características eléctricas altamente no lineales, semejante a las de los varistores a base de ZnO [2,16].

El SnO_2 es considerado un semiconductor tipo-n con una banda de energía prohibida de aproximadamente 3.6 eV [20]. En cuanto a sus propiedades ópticas el dióxido de estaño es único debido a dos aspectos:

- 1) Es uno de los pocos conductores eléctricos transparentes en el rango visible de luz.
- 2) El óxido es el semiconductor más simple de estructura cristalina no cúbica [21].

Las propiedades únicas de este material lo hacen utilizable para una amplia variedad de aplicaciones tecnológicas especialmente en sensores de gas, esmaltes conductivos para evitar cargas electrostáticas, catalizadores, celdas solares y varistores.

Los varistores a base de SnO_2 han sido los candidatos más fuertes para sustituir a los varistores a base de ZnO debido a las siguientes ventajas:

- Los varistores basados en SnO_2 presentan una estructura simple formada por una sola fase cristalina (la casiterita) en contraste con los basados en ZnO que presentan una estructura más compleja formada por diferentes fases.

- Requieren de concentraciones bajas de dopantes para alcanzar una buena característica varistora.
- Los varistores basados en SnO_2 presentan una microestructura más homogénea que los basados en ZnO , lo que facilita el control microestructural durante la etapa de sinterización como se muestra en la (Fig.49). Esta etapa es importante debido a que se ha observado que el tiempo de sinterización influye en el tamaño de grano de los varistores, de tal forma que a mayor tiempo de sinterización mayor tamaño de grano, lo cual implica menos granos, menos límites de grano y una reducción en el número de barreras de potencial formadas en dichos límites de grano; por lo tanto, la etapa de sinterización es fundamental para la optimización de las propiedades eléctricas de los varistores [23].

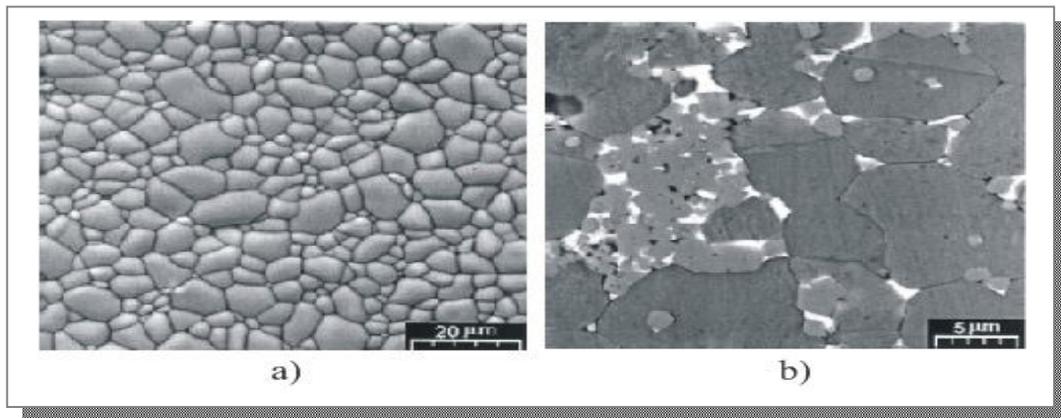


Fig. 49 MEBs de a) un varistor típico basado en SnO_2 y b) un varistor típico basado en ZnO [24].

Debido a los resultados del varistor de SnO_2 , se realizó una investigación para hacer una comparación entre los varistores más usados en la actualidad que son los de ZnO y los de reciente creación que son los de SnO_2 , el experimento consistió en aplicar tratamientos térmicos adicionales a varistores comerciales de ZnO y a varistores de SnO_2 fabricados en la (UTM), sometiendo los varistores a calentamientos y enfriamientos bruscos, después de estos experimentos se hizo un análisis de las características eléctricas de cada uno y finalmente se compararon.

5.2 | Hipótesis del experimento

- Los varistores basados en ZnO han tenido lugar desde su descubrimiento a principios de los años 70. No obstante, a pesar del importante avance tecnológico registrado desde entonces, numerosos aspectos básicos relacionados con su microestructura funcional siguen siendo discutidos al día de hoy [26].
- En la actualidad se investiga intensamente nueva cerámica a base de $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ con alto coeficiente de no linealidad la cual es de gran interés como el material promisorio para fabricar varistores [16].

En vista a las consideraciones anteriores, la hipótesis que se ha considerado para la investigación es:

“Es posible desarrollar una investigación para analizar las características eléctricas del varistor a base de SnO₂, con tratamientos térmicos adicionales bajo diferentes modos de enfriamientos con el objetivo de hacer una comparación con el varistor comercial a base de ZnO”.

5.3 | Objetivos del experimento

- Fabricar varistores a base de SnO₂ con un coeficiente de no linealidad de ($\alpha = 40$).
- Deliberar si los varistores a base de SnO₂ ofrecen un coeficiente de no linealidad, igual o más estable que los varistores con base en ZnO.

5.4 | Procedimiento experimental

Para la fabricación de varistores, la cerámica SnO₂-Co₃O₄-Nb₂O₅-Cr₂O₃ fue sinterizada a 1300°C y 1400°C usando la tecnología de cerámica convencional [16,2]. Después se obtuvieron electrodos de plata mediante el tratamiento térmico en aire a 800°C por un periodo de 10 min con un enfriamiento de 2°C/min. Y finalmente el tratamiento térmicos adicionales se aplicó sometiendo la muestra a un calentamiento de (5°C/min) hasta 800°C, 10 min a 800°C, el enfriamiento lento (2°C/min) desde 800°C hasta T1 y enfriamiento brusco de T1 a temperatura ambiente [24].

A continuación se describe a detalle el experimento:

5.4.1 | Pasó 1: Fabricación de varistor cerámico a base de SnO₂

5.4.1.1 | Compactación

Para este experimento los varistores se fabricaron en el laboratorio de Electrocerámica de la (UTM) y se elaboraron a partir de polvos químicos como el SnO₂ al igual de otros dopantes, para después compactarlo y hacerlo tabletas, estas tabletas tuvieron un peso aproximado de 0.4000g derivadas de la mezcla SNO2-CO3O4-NB2O5-CR2O3 (Fig. 50).



Fig. 50 Pesaje de la mezcla.

Se fabricaron tabletas de corte cilíndrico con un diámetro de 10mm y un espesor de 1mm; A continuación se compactaron en una prensa uniaxial a una presión de 158 MPa (Fig. 51). El peso de la tableta antes del prensado era de 0.3891g. Al ser compactadas se disminuyó el peso en 3.1% debido a la pérdida de polvo.

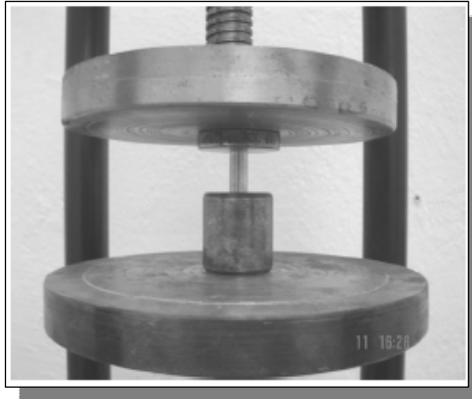


Fig. 51 Compactación de la tableta.

5.4.1.2 | Sinterización

Después de haber obtenido las tabletas, estas se colocaron sobre una cama de óxido de estaño, la cual estaba sobre un recipiente de alúmina que se introdujo en el centro del horno tabular Lindberg Blue modelo STF55433C-1, y se aplicaron los siguientes calentamientos (Fig. 52):

Proceso:

- A) Se aplicó un calentamiento lento de (2°C/min.) hasta llegar a los 1400°C.
- B) Se sinterizó a 1400°C por un periodo de 1 hora.
- C) Se empleó un enfriamiento lento de (2°C/min.).

Donde T: Temperatura
t: tiempo

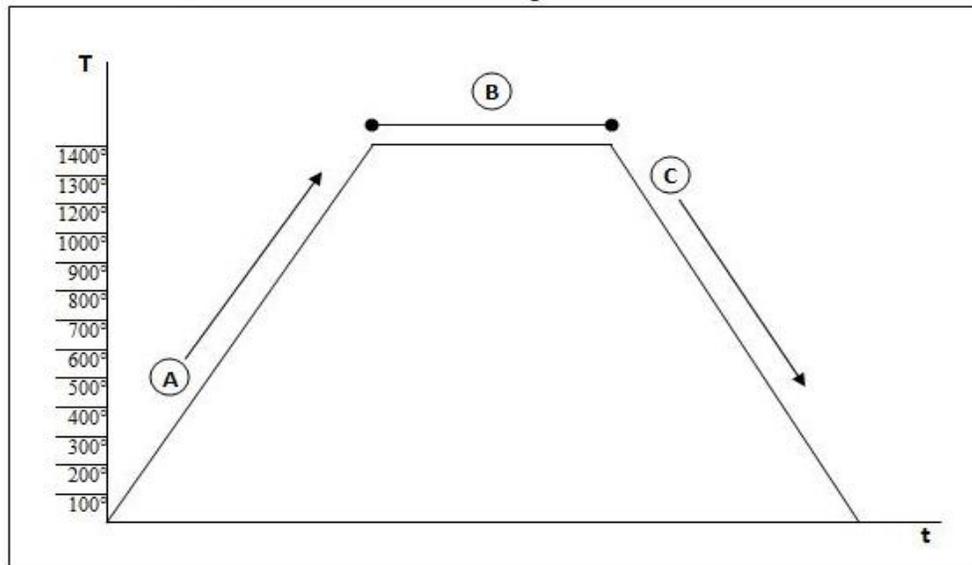


Fig. 52 Sinterización de mezcla SNO₂-CO₃O₄-NB₂O₅-CR₂O₃

La (Fig. 53) muestra el calor irradiado por el horno tabular Lindberg Blue modelo STF55433C-1 a pocos minutos de haber iniciado el calentamiento, aproximadamente aplicando 50°C.

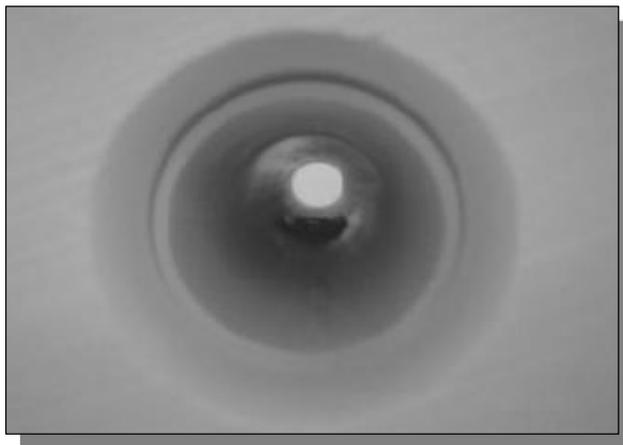


Fig. 53 Horno tabular a 50°C

La (Fig. 54) muestra el calor irradiado por el horno tabular Lindberg Blue modelo STF55433C-1, aproximadamente a 4 horas de haber iniciado el calentamiento, se aprecia a una temperatura de 480°C.

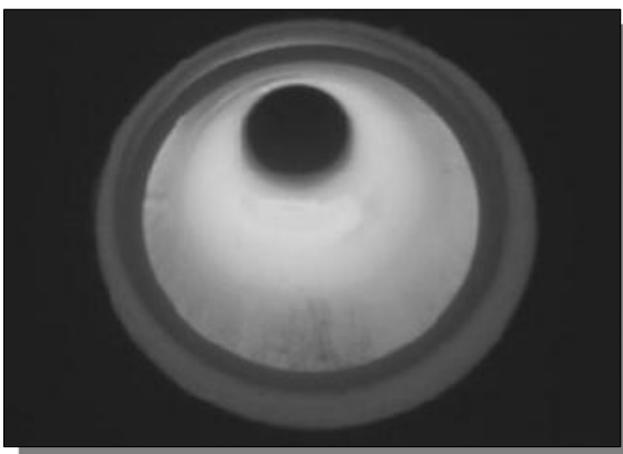


Fig. 54 Horno tabular a 480°C

Finalmente una vez culminada la sinterización se obtuvieron tabletas con consistencia dura (Fig. 55).

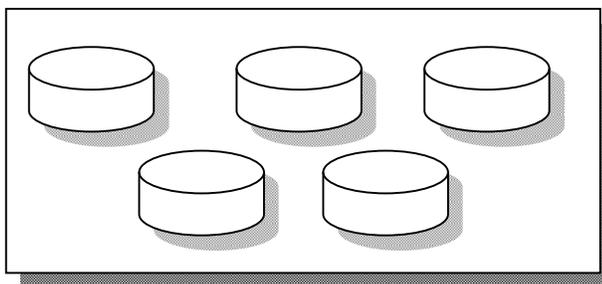


Fig. 55 Muestra después de la sinterización

5.4.1.3 | Caracterización

Finalmente nuestro último paso en la fabricación de varistores es aplicar electrodos a las tabletas, para poder medir las propiedades eléctricas, para esto se empleó pintura de plata Heraeus© capacitor Metalization® DT1723, de forma circular, se cubrió la superficie superior e inferior de la tableta, como se muestra a continuación (Fig. 56).

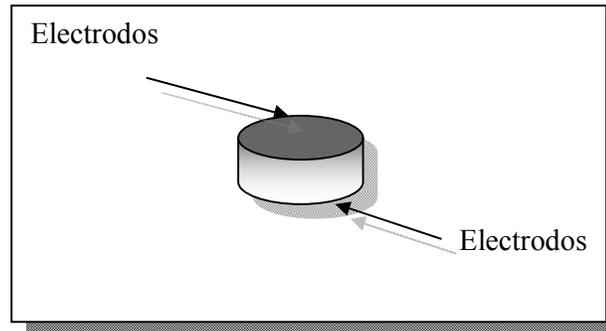


Fig. 56 Muestra con electrodos

Después fue sometida la tableta a un ciclo térmico en un horno Barnstead International Type 47900, con la finalidad de fijar los electrodos (Fig.57).

Proceso:

- A) Calentamiento de 21°C a 150°C en 10 min.
- B) Permanencia a 150°C durante 10 min.
- C) Calentamiento de 150°C a 800°C
- D) Permanencia a 800°C a 10 durante 10 min.
- E) Enfriamiento lento ó normal, hasta llegar a temperatura ambiente

Donde T: Temperatura
t: tiempo

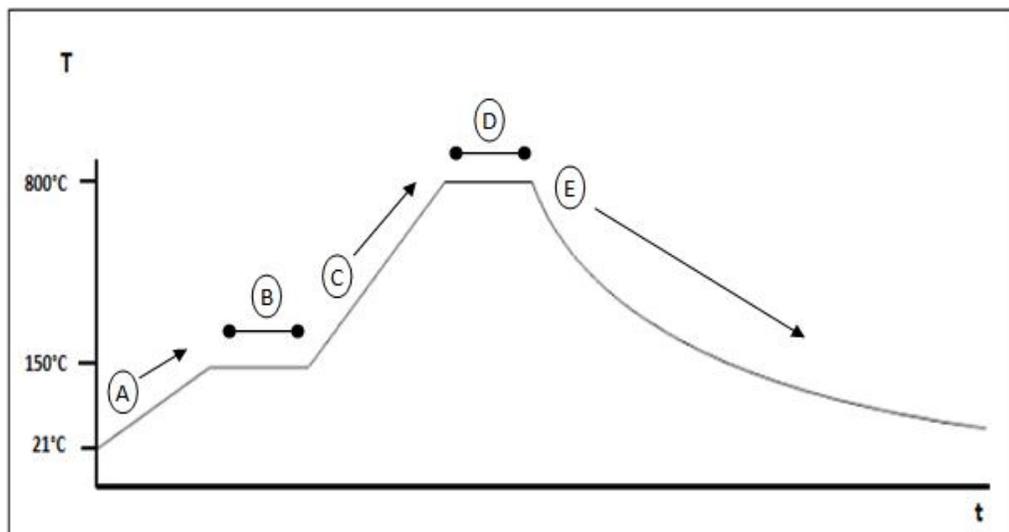


Fig. 57 Ciclo térmico para fijación de electrodos

Finalmente después de utilizar la tecnología de cerámica convencional se fabrico el varistor a base de $\text{SNO}_2\text{-CO}_3\text{O}_4\text{-NB}_2\text{O}_5\text{-CR}_2\text{O}_3$, posteriormente con ayuda del sistema de mediciones y el equipo QuadTech 7600, se obtuvo el coeficiente de no linealidad del varistor, el cual era ($\alpha = 40$), por lo tanto se consideró que era un varistor estable.

5.4.2 | Pasó 2: Tratamientos térmicos adicionales al varistor fabricado a base de SnO_2 .

Tratamiento 1

Seleccionamos algunos de los varistores elaborados a base de dióxido de estaño, con valores del coeficiente de no linealidad en rango de 40 y aplicamos tratamientos térmicos adicionales, como se muestra en la (Fig.58).

Proceso:

- A) Se aplicó al varistor un calentamiento lento de ($5^\circ\text{C}/\text{min.}$) hasta llegar a los 800° .
- B) Se conservó en 800°C por un periodo de 10 min.
- C) Se empleó un enfriamiento lento al varistor de ($2^\circ\text{C}/\text{min.}$), desde los 800°C .
- D) Finalmente con el sistema de mediciones se examinó el coeficiente de no linealidad y se mantiene en ($\alpha = 40$), por lo tanto, el tratamiento térmico adicional no afectó en nada la no linealidad del varistor de SnO_2 , en temperaturas de 800°C con enfriamiento de ($2^\circ\text{C}/\text{min.}$).

Donde T: Temperatura
t: tiempo

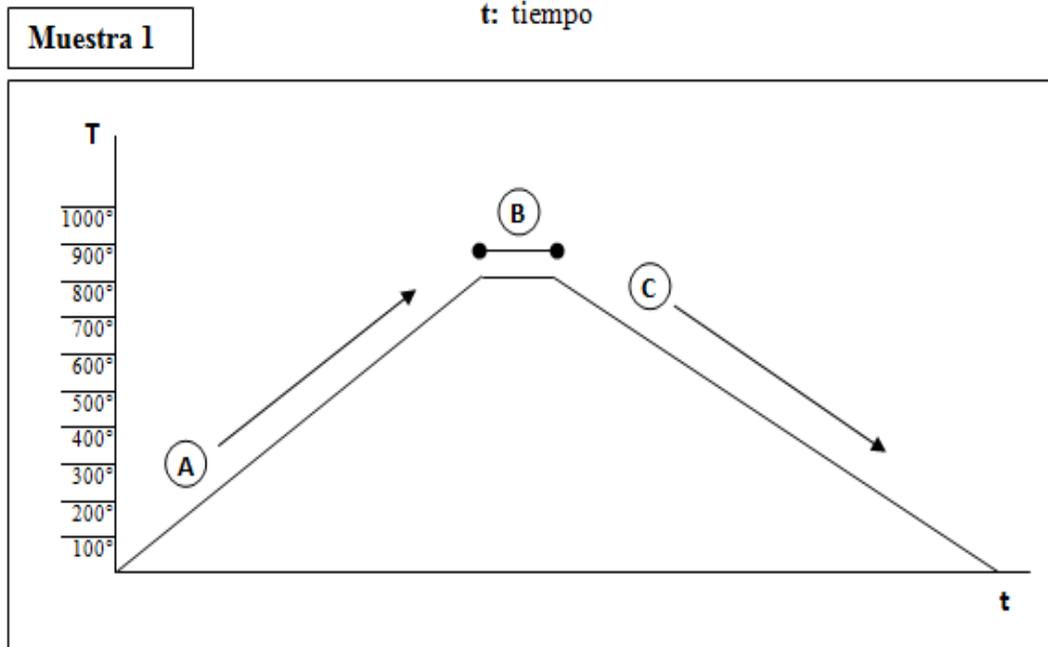


Fig. 58 Tratamiento térmico con enfriamiento lento

Tratamiento 2

Elegimos algunos de los varistores elaborados a base de dióxido de estaño, con valores de coeficiente de no linealidad en un rango de 40, y se aplicaron tratamientos térmicos adicionales como su muestra en la (Fig. 59).

Proceso:

- A) Se sometió el varistor a un calentamiento lento de ($5^{\circ}\text{C}/\text{min.}$) hasta llegar a los 800° .
- B) Se conservó en 800°C por un periodo de 10 min.
- C) Se empleó un enfriamiento lento de ($2^{\circ}\text{C}/\text{min.}$), desde los 800°C hasta 700°C posteriormente desde los 700°C se empleó un enfriamiento brusco, sacando la muestra del horno, enfriándola a temperatura ambiente.
- D) Finalmente con el sistema de mediciones se examinó el coeficiente de no linealidad y es ($\alpha = 2 - 3$), es evidente que el enfriamiento brusco afectó notablemente el coeficiente del varistor de SnO_2 .

Donde T: Temperatura
t: tiempo

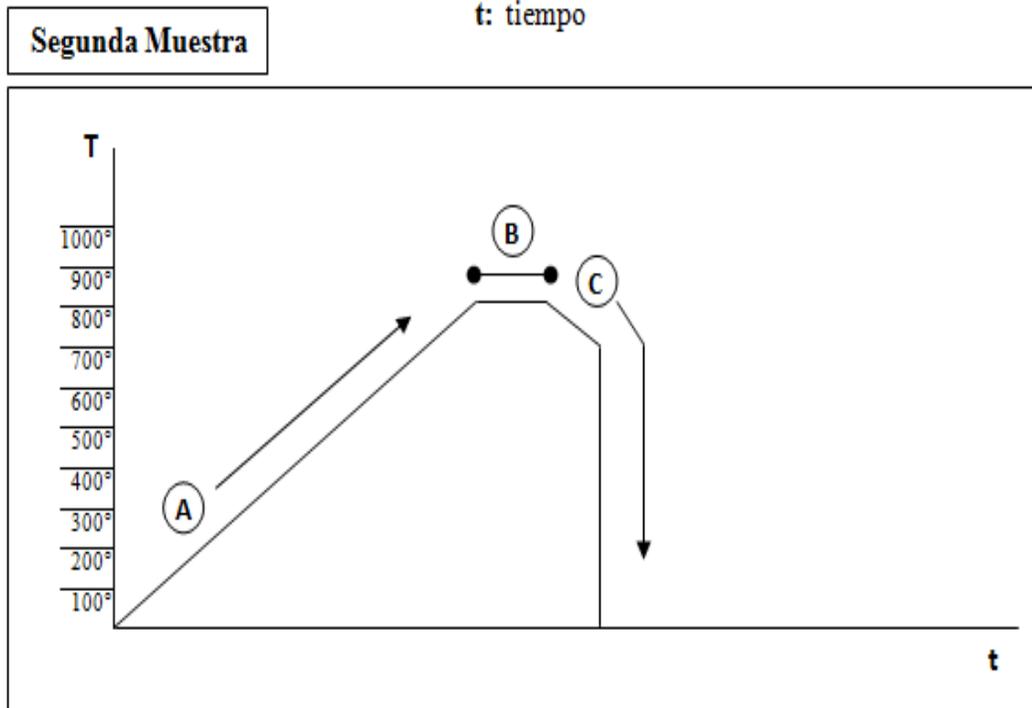


Fig. 59 Tratamiento térmico con enfriamiento brusco a partir de los 700°C .

Tratamiento 3

Nuevamente elegimos algunos de los varistores elaborados a base de dióxido de estaño, con valores del coeficiente de no linealidad en un rango de 40.

En seguida se someten los varistor de SnO₂ a tratamientos térmicos adicionales, como se muestra en la (Fig. 60).

Proceso:

- A) Se aplicó un calentamiento lento al varistor de (5°C/min.) hasta llegar a los 800°.
- B) Se conservó en 800°C por un periodo de 10 min.
- C) Se aplicó un enfriamiento lento de (2°C/min.), desde 800°C hasta 550°C posteriormente desde los 550°C se usó un enfriamiento brusco, sacando la muestra del horno y enfriándola a temperatura ambiente.
- D) Finalmente con el sistema de mediciones se examinó el coeficiente de no linealidad el cual es ($\alpha = 3 - 7$), se aprecia que el enfriamiento brusco también afectó considerablemente, aunque en menor grado que en el tratamiento 2.

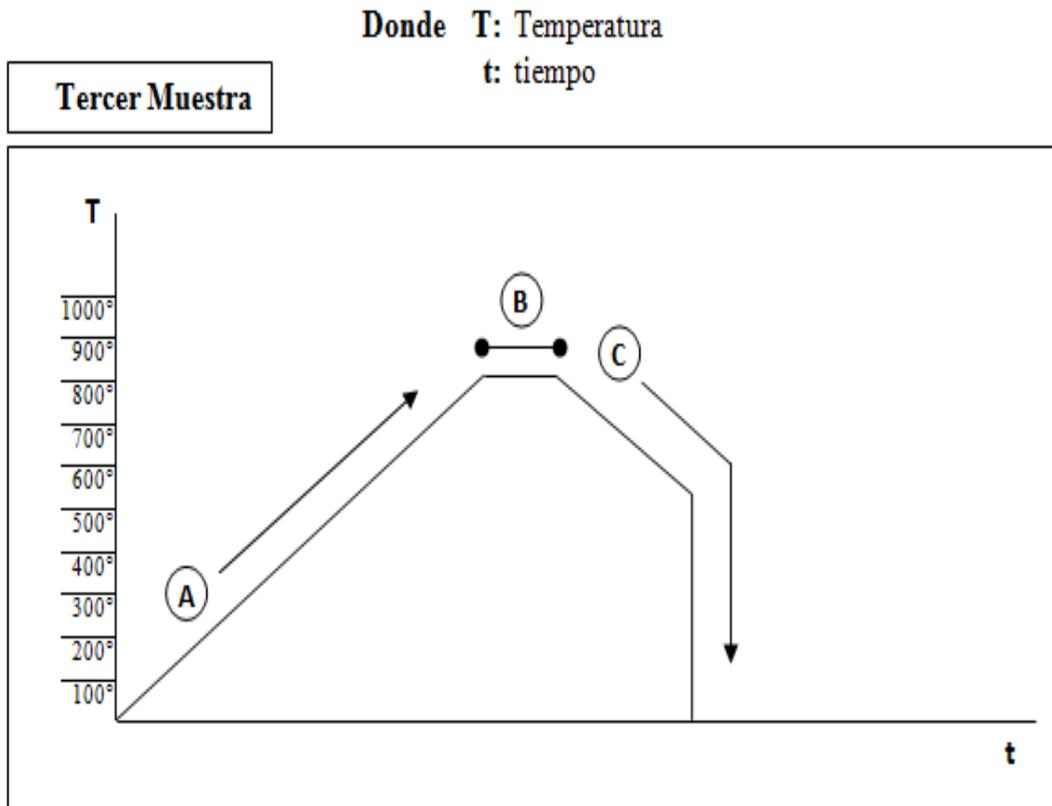


Fig. 60 Tratamiento térmico con enfriamiento brusco a partir de los 550°C.

Tratamiento 4

Elegimos algunos varistores de SnO₂ y los sometemos a tratamientos térmicos adicionales como se muestran en la (Fig. 61).

Proceso:

- A) Nuevamente se aplicó un calentamiento lento a la muestra de (5°C/min.) hasta llegar a los 800°.
- B) Conservamos la muestra a 800°C por un periodo de 10 min.
- C) Empleamos un enfriamiento lento de (2°C/min.), desde 800°C hasta 480°C, posteriormente desde los 480°C aplicamos un enfriamiento brusco como en los tratamientos anteriores.
- D) Una vez más con el sistema de mediciones examinamos el coeficiente de no linealidad y es ($\alpha = 35 - 40$), vemos que el coeficiente de no linealidad no se afectado y podemos derivar que la barrera potencial **BP**¹ se forma en temperaturas arriba de los 480°C. También se hicieron tratamientos térmicos adicionales bajo el mismo proceso, pero con enfriamientos bruscos ha temperaturas más bajas, pero el resultado fue el mismo al **tratamiento 4**, el coeficiente de no linealidad del varistores de SnO₂ no se afecta.

Donde T: Temperatura
t: tiempo

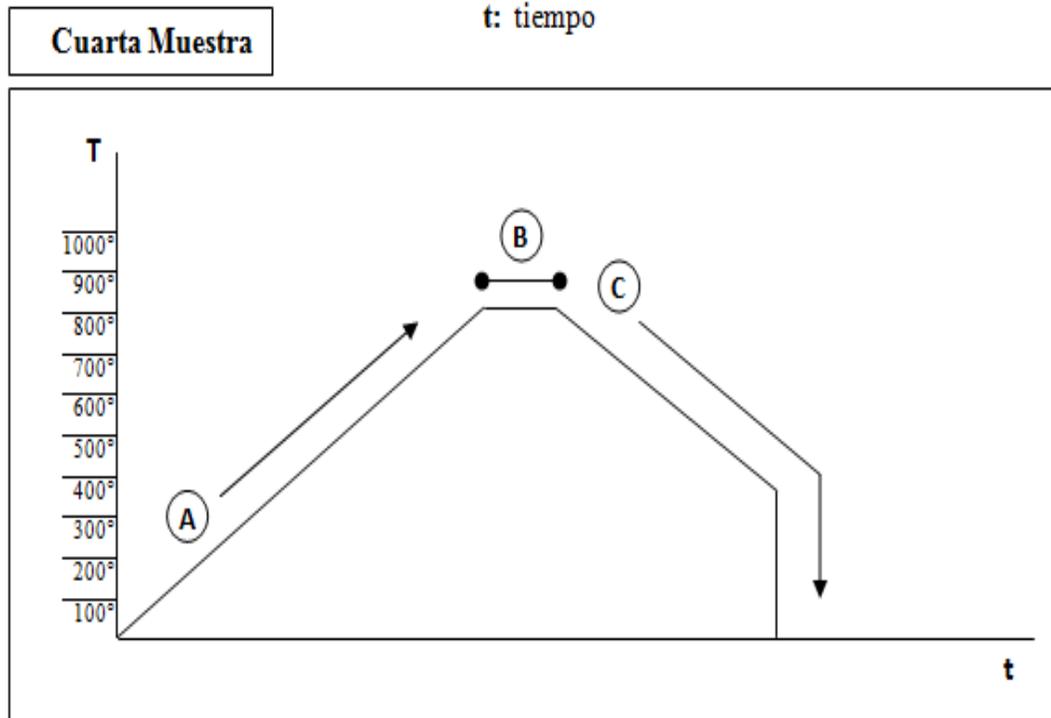


Fig. 61 Tratamiento térmico con enfriamiento brusco a partir de los 480°C

¹ **BP**: Barrera de potencial que hay en los bordes de grano, benefician las propiedades eléctricas del varistor, se forma del oxígeno que existe en la superficie del grano [27].

5.5 | Resultados obtenidos

Se estudiaron las características eléctricas del varistor cerámico basado en $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ sinterizado a 1300°C y 1400°C , después de tratamientos térmicos adicionales con diferentes modos de enfriamiento. Se encontró que el coeficiente de no linealidad $\alpha = (U/I)(dI/dU)$, donde U es voltaje, I es corriente, se aumenta desde 40 hasta 50 después de tratamiento térmico con el enfriamiento lento ($2^\circ\text{C}/\text{min}$) [2].

Después de hacer el procedimiento experimental con los varistores en base de SnO_2 , el resultado es un cambio en el coeficiente de no linealidad $\alpha = (U/I)(dI/dU)$ * y posteriormente de tratamientos térmicos adicionales, el resultado se muestra en la Tabla 13:

Tabla 13. Casos de prueba D

$T_1, ^\circ\text{C}$	α
700	2-3
550	3-7
480	35-40
30	35-40

* U es voltaje y I es corriente.

En seguida del experimento se puede resumir que en temperaturas de 30°C a 480°C , el coeficiente de no linealidad no se ve afectado, aunque el enfriamiento sea brusco se forman BP suficientemente altas y el coeficiente de no linealidad es de ($\alpha \approx 40$) [24].

Por otra parte después de un enfriamiento brusco desde 550°C a 700°C , la cantidad de oxígeno adsorbido disminuyó considerablemente, también disminuyó respectivamente la altura de BP y el coeficiente de no linealidad de $I(U)$ se ve afectado [24].

Se puede definir que la BP en cerámica basada en $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ se forman a temperaturas arriba de 480°C donde la difusión de oxígeno a bordes de granos es suficientemente grande [24].

Una vez analizados los resultados se puede señalar que la resistencia eléctrica del varistor cerámico $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ se determina por barreras de potencial (BP) que existen en los bordes de granos [1,2]. La formación de estas BP es la consecuencia de la presencia de electrones atrapados en estados superficiales creados por oxígeno adsorbido. Por eso, la altura de BP depende de la cantidad de oxígeno que se contiene en los bordes de granos.

Finalmente comparando el desempeño del varistor en base de SnO₂ y el varistor en base de ZnO, se encontró que el comportamiento del varistor comerciales basado en ZnO (marca CH2-1) es similar. Por lo tanto la estabilidad en las características de $I(U)$ del varistor de SnO₂ fabricado en la UTM, no es peor que en el varistor en base de ZnO comercial, después de tratamientos térmicos adicionales [24].

El tratamiento térmico al que se sometió la muestra T₁ fue bajo las siguientes temperaturas 30°C, 480°C, 550°C y 700°C respectivamente, la sinterización del experimento fue de 1300°C, bajo estas condiciones se puede señalar que a mayor temperatura existe mayor linealidad, sobre todo por los resultados se aprecian a detalle en la Fig. 62, en la primer muestra T₁ se observa sinterización a 30°C y no se aprecia linealidad, pero conforme va incrementando la temperatura, la linealidad es mayor cuando la muestra T₁ se encuentra a 700°C.

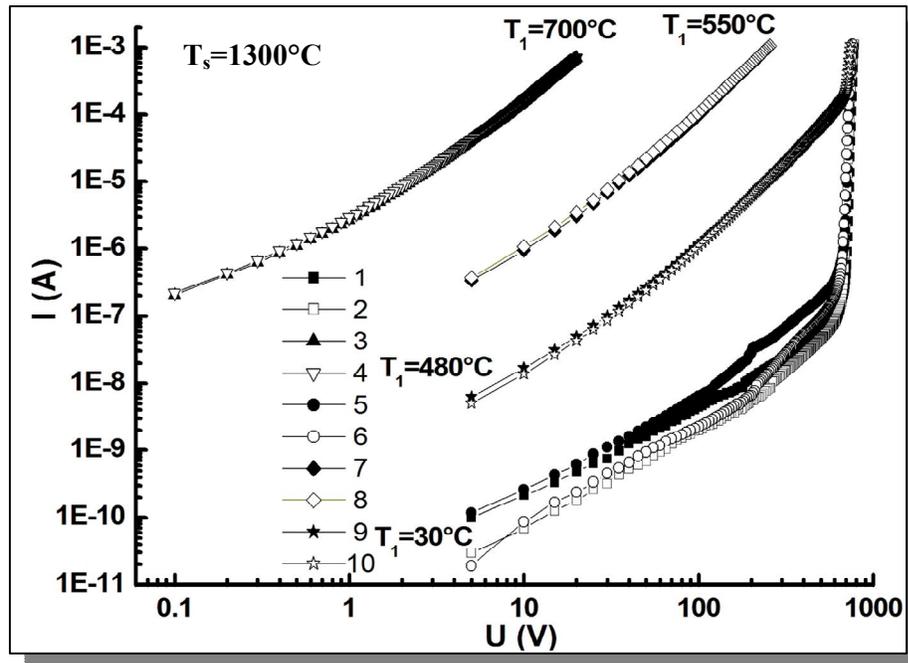


Fig. 62 Corriente/Voltaje con cerámica sinterizada a 1300°C . [24]

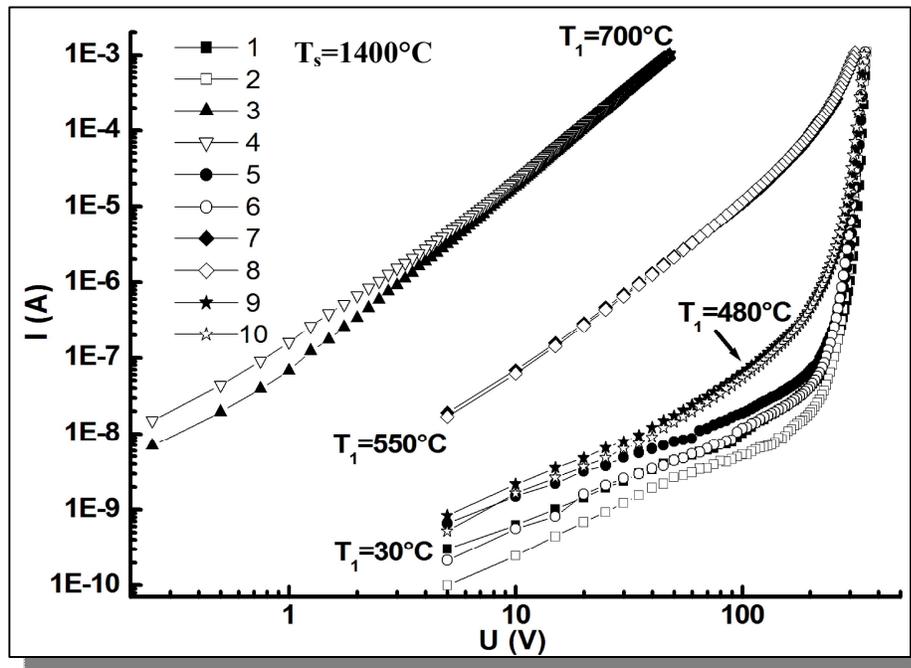


Fig. 63 Corriente/Voltaje con cerámica sinterizada a 1400°C . [24]

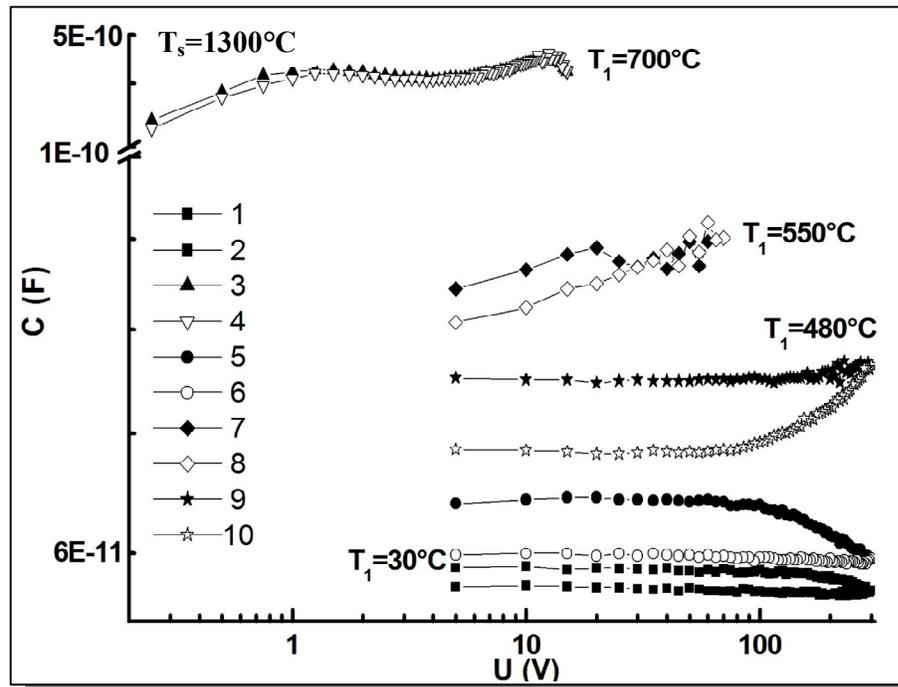


Fig. 64 Capacitancia/Voltaje con cerámica sinterizada a 1300°C . [24]

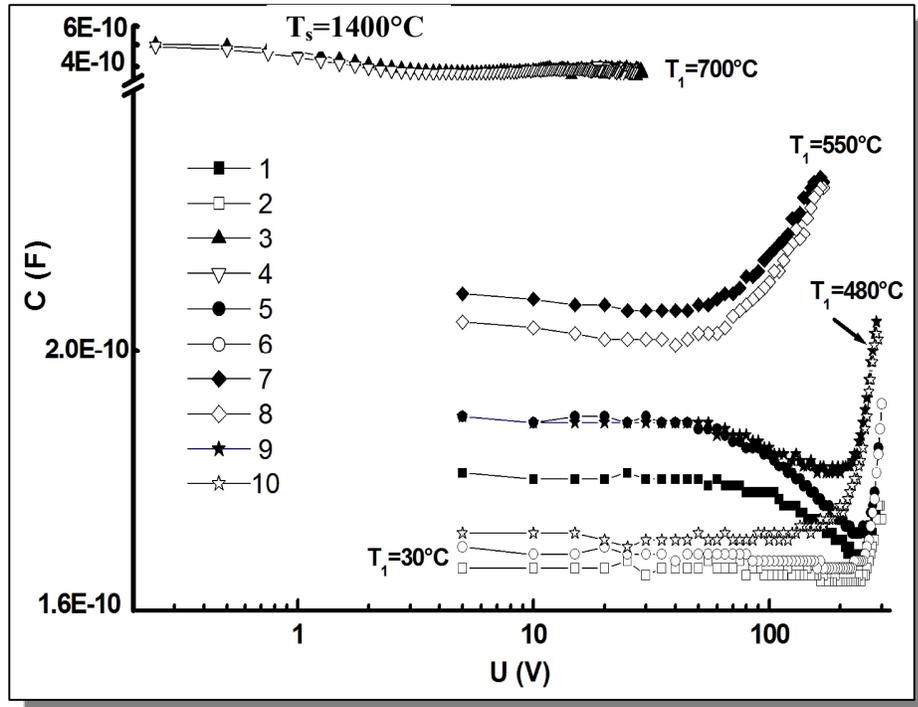


Fig. 65 Capacitancia/Voltaje con cerámica sinterizada a 1400°C . [24]

Los varistores basados en SnO_2 presentan una microestructura más homogénea que los basados en ZnO , lo que facilita el control microestructural durante la etapa de sinterización (Fig. 66). La etapa de sinterización es importante debido a que se ha observado que el tiempo de sinterización influye en el tamaño de grano de los varistores, de tal forma que a mayor tiempo de sinterización mayor tamaño de grano, lo cual implica menos granos, menos límites de grano y una reducción en el número de barreras de potencial formadas en dichos límites de grano; por lo tanto, la etapa de sinterización es fundamental para la optimización de las propiedades eléctricas de los varistores [17].

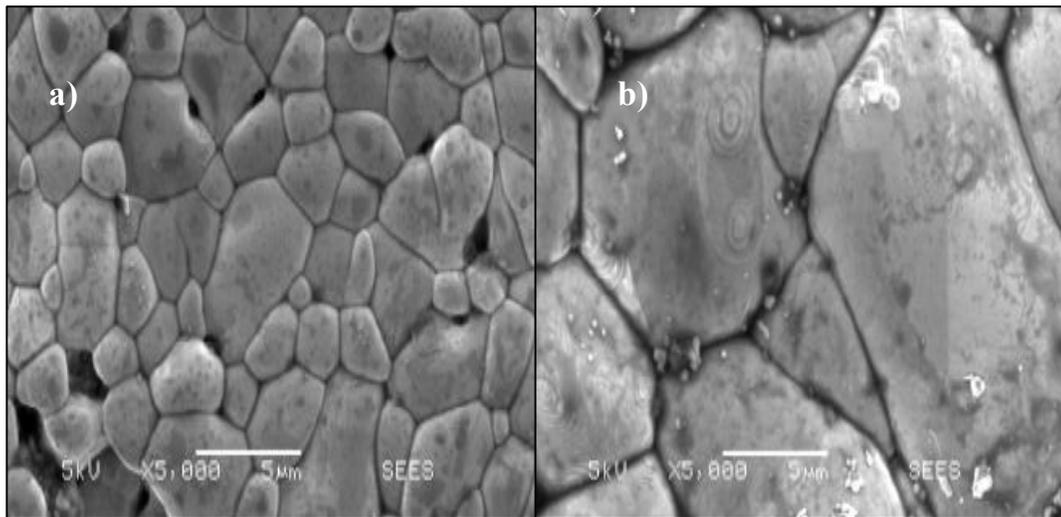


Fig. 66 muestra de cerámica sinterizada a 1300°C y b) muestra sinterizada a 1400°C [24]

Capítulo 6

CONCLUSIONES

La elaboración de este trabajo contribuye a la confiabilidad y eficiencia de la información generada por las unidades LCR-medidor QuadTech 7600 y fuente de voltaje Keithley 6487, el proyecto favorece el control y administración de las unidades.

Una vez concluido el proyecto de tesis se obtuvo un software para administrar las unidades de LCR-medidor QuadTech 7600 y fuente de voltaje Keithley 6487 mediante el uso de una computadora. El software consiste en gestionar el flujo de datos y los diferentes comandos para controlar en forma remota las unidades LCR-medidor QuadTech 7600 y fuente Keithley 6487.

Al realizarse el software se ha generado una herramienta eficaz para atender el problema de adquisición de datos de los equipos de medición en el laboratorio de electrocerámica de la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM).

Una vez concluido el software, y después de aplicarle pruebas de validación y funcionamiento para evitar errores, se integro un sistema de mediciones juntos con los equipos LCR-medidor QuadTech 7600 y fuente de voltaje Keithley 6487, para después hacer una investigación experimental de materiales dieléctricos, el proceso inicio con la fabricación de varistores basados en $\text{SnO}_2\text{-CoOCr}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$ en el laboratorio de electrocerámica de la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM), la investigación consistió en averiguar cuál era comportamiento del varistor cerámico de SnO_2 fabricado en la UTM después de aplicarle tratamientos térmicos adicionales, en comparación con

el varistor comerciales basado en ZnO (marca CH2-1). Finalmente después de la investigación, comparando el desempeño del varistor en base de SnO₂ y el varistor comerciales en base de ZnO (marca CH2-1), se encontró que el comportamiento del varistor de SnO₂ es similar que el varistor basado en ZnO (marca CH2-1), y se puede definir que la BP en cerámica basada en SnO₂-Co₃O₄-Nb₂O₅-Cr₂O₃ se forman a temperaturas arriba de 480°C donde la difusión de oxígeno a bordes de granos es suficientemente grande.

Al realizar el proyecto se cumplieron los objetivos planteados, pero también surgieron nuevas ideas que se proponen en trabajos futuros, para enriquecer los conocimientos con respecto al varistor de SnO₂, y obtener una mayor utilidad de LCR-medidor QuadTech 7600.

Por lo tanto se propone seguir investigando al respecto con diferentes tratamientos térmicos ha varistores de SnO₂, y encontrar una base que fundamente las ventajas del varistor a base de SnO₂, Quizá en este experimento resulto haber una semejanza entre las características eléctricas del varistor a base de SnO₂ fabricado en la UTM, y el varistor comercial a base de ZnO, pero también es conocido que los varistores comerciales de ZnO después de un constante uso presentan pequeñas fisuras y/o perforaciones que pueden ser factor a investigar, el verificar las cualidades de ambos varistores bajo el factor de tiempo y uso. También se sugiere fabricar varistores a base de SnO₂ con otros dopantes y desiguales concentraciones en los dopantes, además de diferentes velocidades y tiempos de mezcla etc.

Por otra parte el desarrollo del software fue justificable para el proyecto pero también se recomienda agregar otros módulos, con nuevos parámetros de medición, es importante considerar que se desarrolla un software para LCR-medidor QuadTech 7600, el cual ofrece 14 diferentes parámetros de medición, así que se propone delimitar los aspectos a innovar en el software

Finalmente es importante mencionar que la realización de este proyecto ha sido substancial ya que me ayudó a fabricar nuevos conocimientos y esto me servirá en el ámbito laboral, pues me involucró en el área de la investigación, además de forjarme con experiencia.

BIBLIOGRAFÍA | Bibliografía

- [1] A.B.Glot, A.V.Gaponov, A.P.Sandoval-Garcia, *Physica B* 405, 705 (2010).
- [2] A.N. Bondarchuk, A.B. Glot, S.V. Mazurik, M. Marquez Miranda, G. Jimenez-Santana, *Eur. Phys. J: Appl. Phys.*, 48, 30302 (2009).
- [3] A. Juan, J. Beltrán, “Química teórica y computacional”, Castellón de la plata, Universidad Jaime I, 2000.
- [4] R. Boylestad, “Análisis Introductorio de Circuitos”, Prentice Hall, ed. 2000.
- [5] L. Prat, “Circuitos y dispositivos electrónicos”, Ediciones UPC, 1998.
- [6] M. McGillivray, “Instrument Systems”, McGraw-Hill, 2000.
- [7] A. Nell, W. Chip, “Turbo Pascal”, Editorial sales, and customer service, 2001.
- [8] F. Seco, C. Álvarez, “Conexión de Instrumentos de medida con GPIB”, Instituto de Automática Industrial, 2005.
- [9] M. Tooley, S. Winder, “Newnes Data Communications Pocket Book”, British Library, 2002.
- [10] K. Louden, “Lenguajes de programación”, Thomson Paraninfo, 2004.
- [11] G. Zola, “Correlación entre ondas de ensayo para dispositivos supresores de sobretensiones”, Ingeniería y Ciencia, 2008.
- [12] A. García, “El control automático en la industria”, Ediciones de la universidad de castilla-la mancha, 2005.
- [13] F. Ceballos, “Visual Basic: curso de programación”, Ilustrada, Ra-ma, 1997.
- [14] R. Lajara, J. Pelegrí, “Labview. Entorno grafico de programación”, Alfahomega, 2007.
- [15] Pianaro, S., Bueno, P, Longo, E and Varela, J, “*Microstructure and electrical properties of a SnO₂ based varistor*”, *Ceramics International*, Vol. 25, pp.1-6 (1999).
- [16] P.R. Bueno, M.R. Cassia-Santos, E.R. Leite, E. Longo, J. Bisquert, G. Garcia-Belmonte, F. Fabregat-Santiago, *J. Appl. Phys.*, 88, 6545(2000).
- [17] A.B. Glot, I.A. Skuratovsky: “Non-Ohmic conduction in tin dioxide based varistor ceramics”, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 99 [2-3], (2006), pp. 487-493.
- [18] Askeland, Donald R.: *Ciencia e ingeniería de los materiales*, 3a. edición, International Thomson Editores, México, (2000).
- [19] Z.M. Jarzebski and J.P. Marton: “Physical Properties of SnO₂ Materials: I. Preparation and Defect Structure”, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 123, No. 7, July (1976), pp., 199C-205C.

- [20] Z.M. Jarzebski and J.P. Marton: "Physical Properties of SnO₂ Materials: II. Electrical Properties", Journal of the Electrochemical Society, Vol. 123, No. 9, September (1976), pp., 299C-310C.
- [21] Z.M. Jarzebski and J.P. Marton: "Physical Properties of SnO₂ Materials: III. Optical Properties", Journal of the Electrochemical Society, Vol. 123, No. 10, October (1976), pp., 333C-346C.
- [22] P.R. Bueno, M.M. Oliveira, M.R. Cássia-Santos, E. Longo, S.M. Tebcherani, J.A. Varela: "Varistores à base de SnO₂: estado da arte e perspectivas", Cerâmica 46 (299), (2000), pp. 124-130.
- [23] P.A. Santos, S. Maruchin, G.F. Menegoto, A.J. Zara, S.A. Pianaro: "The sintering time influence on the electrical and microstructural characteristics of SnO₂ varistor", Materials Letters 60, (2006), pp. 1554-1557.
- [24] A. N. Bondarchuk, A. B. Glot, F. Fera SILVA: "Influencia de tratamiento térmico en características eléctricas de varistor cerámico SnO₂-Co₃O₄-Nb₂O₅-Cr₂O₃", II Congreso Nacional de Ciencia e Ingeniería en Materiales, Febrero, Toluca, México 2010.
- [25] T. Noergaard, F. Eady, "Embedded Hardware (Newnes Know It All)", British library cataloguing-in-publication data, (2007) pp.456 (ISBN13: 9780750685849)
- [26] Peitado M.; "Varistores cerámicos basados en óxido de cinc" Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio, 44 [2] 77-87 (2005). ISSN: 0366-3175
- [27] Mosquera, A., J. A. Varela & J. E. Rodríguez-Páez: "Varistores de SnO₂ obtenidos por el método de precursor polimérico (Pechini)". Rev. Acad. Colomb. Cienc. 31 (118): 89-96, 2007. ISSN: 0370-3908.
- [28] Mari, Eduardo; "Los materiales cerámicos", Librería y editorial Alsina, pp.88, (2011). ISBN: 978-950-553-081-6.
- [29] Peitado M., "Zinc oxide-based ceramic varistors", Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio, 44, 77-87 (2005).
- [30] Boylestad, Robert L.: "Introducción al análisis de circuitos", Pearson educación, México, pp.1249 (2004), ISBN: 970-26-0448-6.
- [31] D. C. Giancoli, V. C. Olgún; "Física: principios con aplicación", Pearson educación, Vol. 2, pp.753 (2006)
- [32] QuadTech©: Instruction Manual, Model 150261/A4 7600 Precision LCR Meter, (1997).
- [33] Keithley Instruments©: Operator's manual, Model 6487-901-01 Rev.A Source Measure Units, (2002).

ANEXOS

Anexo 1. Publicación



C - 11

INFLUENCIA DE TRATAMIENTO TERMICO EN CARACTERISTICAS ELECTRICAS DE VARISTOR CERAMICO $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$

A.N. Bondarchuk, A.B. Glot, F. Feria Silva*

Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, C.P. 69000, México. *Universidad del Istmo, Ixtepec, Oaxaca, C.P. 70110, México

E-mail: alexglot@mixteco.utm.mx

Un varistor es un dispositivo con característica de voltaje-corriente no lineal y simétrico que se usa para la protección de circuitos eléctricos contra el sobrevoltaje. Actualmente para fabricar los varistores comerciales se usa generalmente cerámica en base de ZnO. Sin embargo, últimamente se obtuvo y se investiga intensamente nueva cerámica $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ con alto coeficiente de no linealidad la cual es de gran interés como el material promisorio para fabricar varistores [1].

Se estudian las características eléctricas de cerámica $\text{SnO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$ sinterizada a los 1300°C y 1400°C [2] después de adicionales tratamientos térmicos con diferentes modos de enfriamiento. Se encontró que el coeficiente de no linealidad $\alpha = (U/I)(dI/dU)$, donde U es voltaje, I es corriente, se aumenta desde 40 hasta 50 después de tratamiento térmico con el enfriamiento lento (2°C/min). Al contrario, el coeficiente α disminuye hasta 2-3 después del tratamiento con enfriamiento brusco desde $T_1=700^\circ\text{C}$. Si se hace el enfriamiento brusco desde $T_1=550^\circ\text{C}$, el coeficiente α también queda bajo ($\alpha = 3 - 7$). En caso de $T_1 = 480^\circ\text{C}$, $\alpha \approx 40$. Para comparación se realizó la misma investigación con varistores comerciales en base de ZnO (marca CH2-1). Los resultados muestran que la estabilidad de $I(U)$ características de SnO_2 varistores con respecto a los tratamientos térmicos por lo menos no es peor que para ZnO varistores. Los cambios de las características de voltaje-corriente y capacitancia y conductancia vs voltaje directo se discuten usando concepto de barreras potenciales en los bordes de granos.

- [1] P.R. Bueno, M.R. Cassia-Santos, E.R. Leite, E. Longo, J. Bisquert, G. Garcia-Belmonte, F. Fabregat-Santiago, J. Appl. Phys., 88, 6545(2000).
- [2] A.N. Bondarchuk, A.B. Glot, S.V. Mazurik, M. Marquez Miranda, G. Jimenez-Santana, Eur. Phys. J: Appl. Phys., 48, 30302 (2009).

Anexo 2. Manual de usuario



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

“MANUAL DE USUARIO DEL SOFTWARE LCR-MEDIDOR QUADTECH 7600”

ELABORO:
L.I. FRANCISCO DE JESUS FERIA SILVA

DIRECTORES DE TESIS:
DR. OLEXANDR GLOT
DR. OLEXANDR BONDARCHUK

HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA, FEBRERO DEL 2012

ÍNDICE DEL MANUAL DE USUARIO

INTRODUCCIÓN.....	- 92 -
REQUERIMIENTOS MINIMOS DEL SISTEMA	- 93 -
CONEXIÓN DEL SISTEMA	- 94 -
INSTALACION DEL SISTEMA	- 95 -
DIAGRAMA GENERAL DEL SOFTWARE.....	- 98 -
ESQUEMA DE FLUJO DEL SOFTWARE.....	- 99 -
PRUEBA DE MEDICIÓN CON VARISTOR COMERCIAL	- 100 -
SALIDAS DEL SISTEMA.....	- 101 -

INTRODUCCIÓN

A continuación se muestra el uso del sistema de cómputo hecho para las unidades LCR-medidor QuadTech 7600 y fuente Keithley 6487 dichas unidades serán administradas mediante el uso del software, se controlará el flujo de datos y los diferentes comandos para el manejo de las unidades LCR-medidor QuadTech 7600 y fuente Keithley 6487. En el laboratorio de electrocerámica de la universidad tecnológica de la mixteca.

El software es capaz de operar los siguientes modos de medición:

4. Capacitancia (C) y Conductancia (G) vs Voltaje (U);
5. Capacitancia (C) y Conductancia (G) vs frecuencia (f) para voltaje directo fijo;
6. Capacitancia (C) y Conductancia (G) a un voltaje directo fijo (U) en función del tiempo t .

En este manual se presentan las formas correctas en las que el usuario debe utilizar el sistema para evitar que surjan problemas por mal uso del sistema, y pueda recurrir a él para saber qué datos son esenciales en el manejo del sistema porque es conveniente que lea este manual antes de iniciar con el uso del sistema y cada vez que así lo crea conveniente.

REQUERIMIENTOS MINIMOS DEL SISTEMA

Para que el sistema pueda funcionar de manera adecuada, el equipo de cómputo en el que se instale deberá contar con las siguientes características técnicas:

Requerimientos mínimos de Hardware:

- Espacio libre en disco duro para instalación 300MB
- Disco duro de por lo menos 100GB
- Procesador a 2.4 GHz o superior
- Memoria RAM 1GB o superior
- Tarjeta GPIB controladora KPCI 488.
- Cables GPIB.
- Monitor VGA o superior con resolución de 1024x768.
- Lector de CD-DVD
- Teclado y Mouse
- Impresora

Requerimientos mínimos de Software:

- Sistema operativo Microsoft Windows XP, Windows Vista ó Windows 7 de 32 bits.
- Drivers de comunicación para el modulo GPIB
- Framework 4.0
- Flash Player 10

En relación a los usuarios, estos deben de tener conocimientos básicos en computación para poder hacer uso del sistema.

CONEXIÓN DEL SISTEMA

A continuación se muestra un pequeño ejemplo de cómo se utiliza el software, de forma breve veremos los pasos para configurar las mediciones. Esta prueba se realizó con varistores comerciales para ver su valor nominal, primero se conectaron los equipos, como se muestra a continuación en la figura:



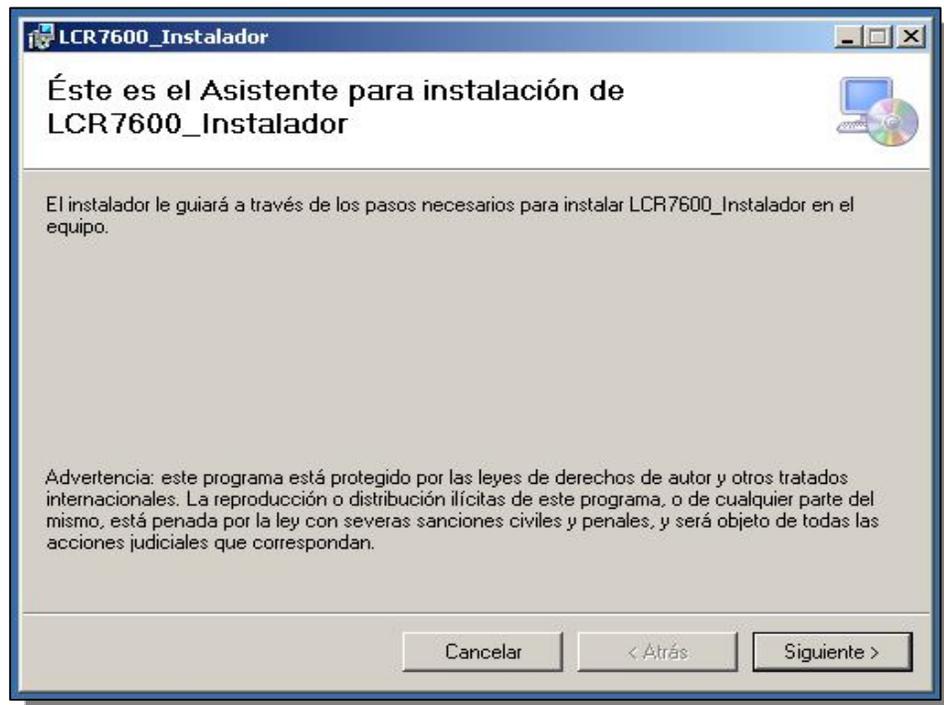
El diseño del sistema consta de los siguientes componentes:

- PC para el control del software
- Software para administrar las mediciones
- tarjetas KPCI-488
- Equipo LCR-medidor QuadTech 7600
- Fuente de voltaje Keithley 6487
- Muestra sujeta a experimentación

INSTALACION DEL SISTEMA

Para instalar el software que administre las unidades de LCR-medidor QuadTech 7600 y fuente Keithley 6487 en su ordenador tiene que seguir los siguientes pasos:

1. Inserte el disco de instalación del software, inmediatamente aparecerá el asistente para la instalación y debe presionar el botón siguiente para continuar con la instalación como se muestra en la ventana siguiente:



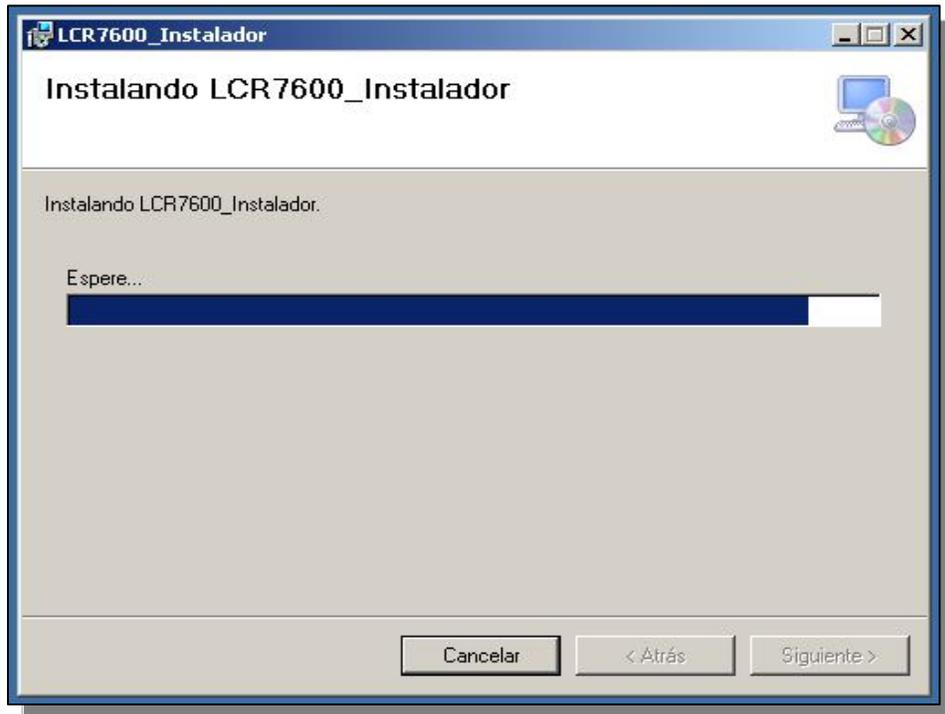
2. Al dar clic en el botón de *siguiente* aparecerá otra ventana donde se selecciona la carpeta de instalación y se puede cambiar la ruta dando clic en *examinar* o verificar el espacio disponible en cada unidad de disco seleccionando *espacio en disco*, posteriormente se elige si es para todos los usuarios o únicamente para el que lo está instalando y se selecciona *siguiente* como se muestra en la siguiente figura:



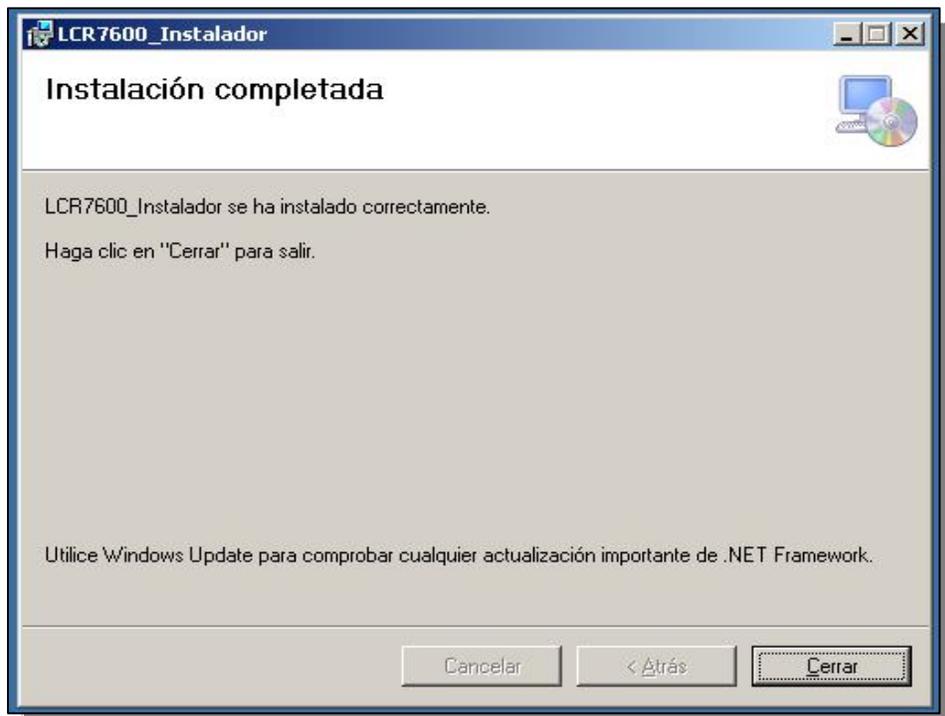
3. Después de dar clic en *siguiente* aparecerá otra ventana donde se debe confirmar la instalación, presionando el botón *siguiente* como se ve en la siguiente figura:



3. Posteriormente se mostrara la ventana donde se muestra el avance de la instalación como la siguiente:

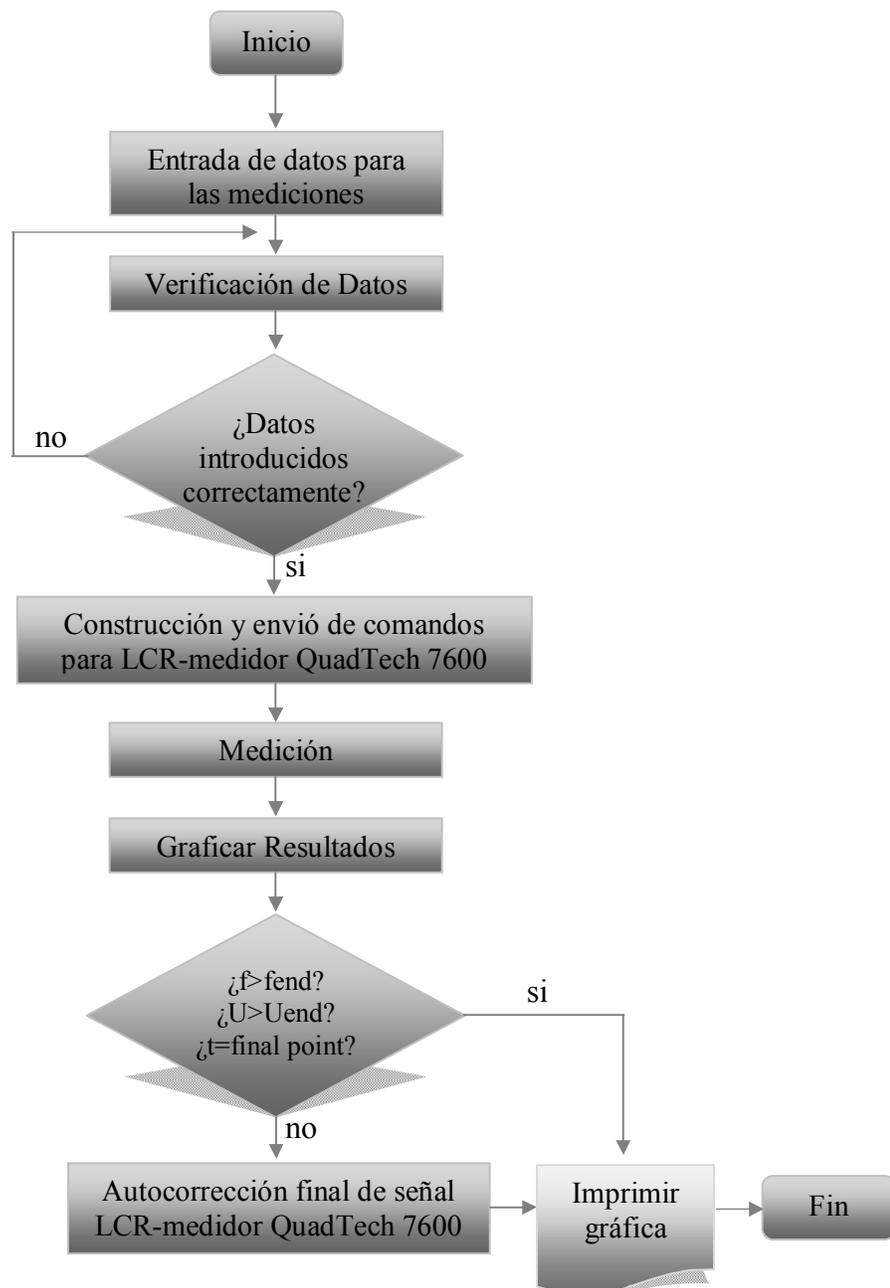


5. Finalmente aparecerá la ventana donde muestra la instalación completada y únicamente hay que dar clic en *cerrar*. Después de esto aparecerá el icono en el escritorio y en el menú programas.

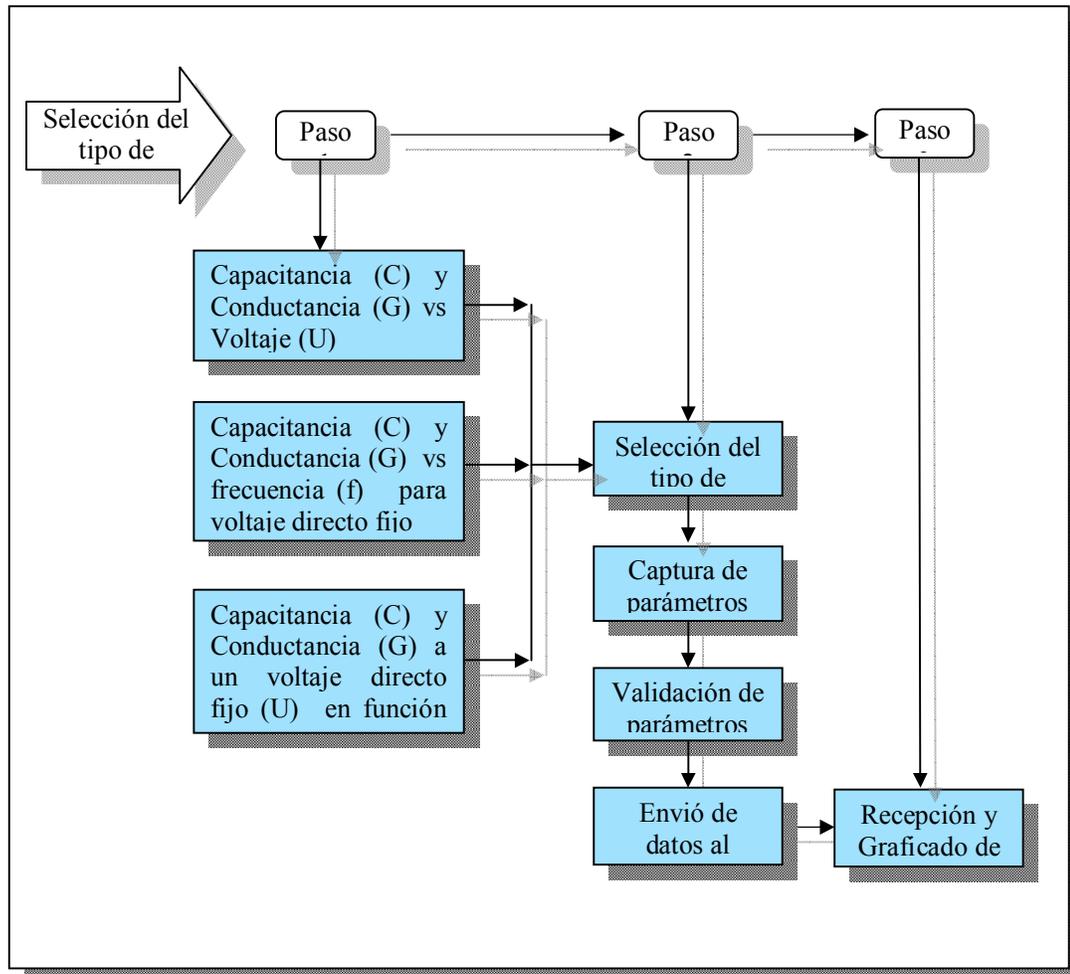


- Si tiene algún problema durante la instalación (por ejemplo, falta de espacio en disco), intente resolverlo y, una vez resuelto, repita el proceso desde el paso 1. Es posible que, en este caso, reciba algún mensaje de que el fichero que está intentando copiar ya existe. conteste a este tipo de pregunta de la manera que estime conveniente.

DIAGRAMA GENERAL DEL SOFTWARE

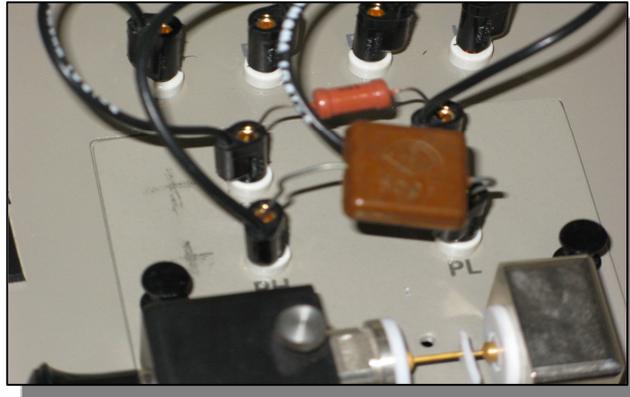


ESQUEMA DE FLUJO DEL SOFTWARE



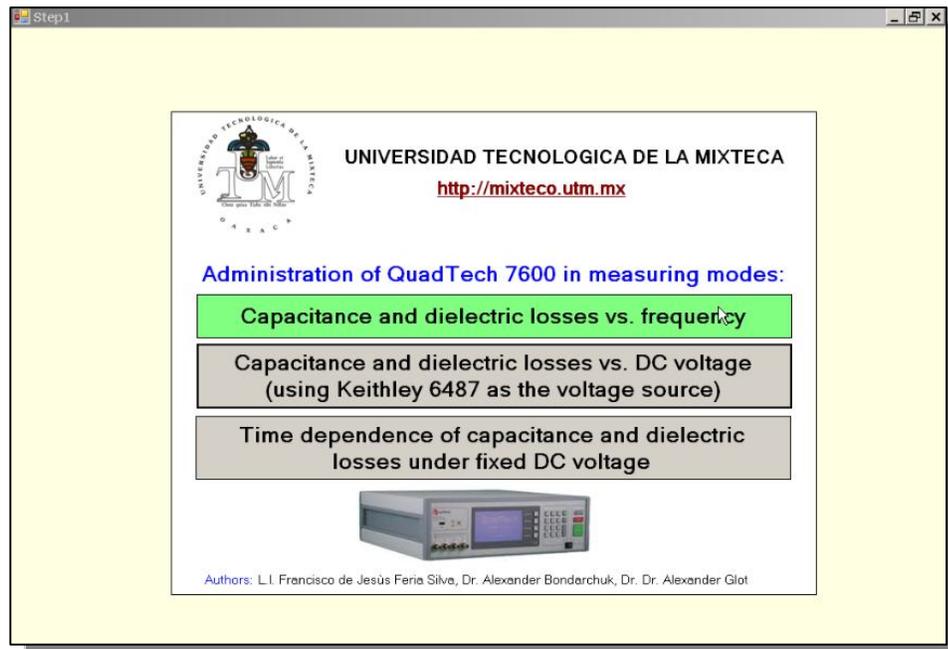
PRUEBA DE MEDICIÓN CON VARISTOR COMERCIAL

Se realizó una prueba de la medición con un circuito sencillo, este circuito está conectado en paralelo y se usó un R-resistor con resistencia de 4.7M Ω , mientras que por el otro lado tiene un C-capacitor con capacitancia de 1100pF, y se conectó así como de muestra en la siguiente figura.



Circuito sencillo de capacitor y resistor en paralelo

Después se configuró el software para trabajar bajo el modo de capacitancia (C) y conductancia (G) vs frecuencia (f), este modo de medición se selecciona en la pantalla de inicio del software, así como se muestra a continuación:



Tipos de mediciones en la interfaz del software

Una vez que se selecciona el modo de medición, se configuran los parámetros, de acuerdo a la medición que se desea realizar, el software ya esta validado para que no acepte parámetros mayores a los que los equipos soporte, además de que tiene una casilla de verificación para que no existan errores en las mediciones, la configuración para esta prueba se realizara con los parámetros que se muestran en la siguiente pantalla:

The screenshot shows a software window titled "Step2" with the main heading "Capacitance and dielectric losses vs. frequency". It is divided into several sections:

- 1. General data:** Includes fields for "Experimentator" (Dr. A. Bondarchuk), "Sample #" (1), "Measurement #" (112), and a "Commentary:" box containing the number 112.
- 2. QuadTech LCR 7600 Measurement Parameters:**
 - First:** Capacitance (parallel circuit)
 - Secondary:** loss tangent
 - Initial frequency (fstart, Hz):** 100
 - Final frequency (fend, Hz):** 1.0e6
 - Step of frequency (fs, Hz):** 3
 - AC voltage (V):** 0.5
 - Measurement Speed:** Slow
 - Mode:** Radio buttons for "linear", "from fstart to fend", and "from fstart to fend and to fstart".
- Results of measuring will be saved to C:\Results_LCR7600\o_s1_m112**
- Help:** A scrollable text area containing instructions:
 - The value of frequency can be from 10Hz to 2MHz. Frequency must be integer.
 - 'Step of frequency' is:
 - 'linear': the difference between neighbor frequency values;
 - 'logarithmic': the ratio of neighbor frequency values.
 - The minimal value of AC voltage is 20mV, the maximum one is: 5V (fend <= 500 kHz); 1V (fend <= 1 MHz); 0.5V (fend > 1 MHz).

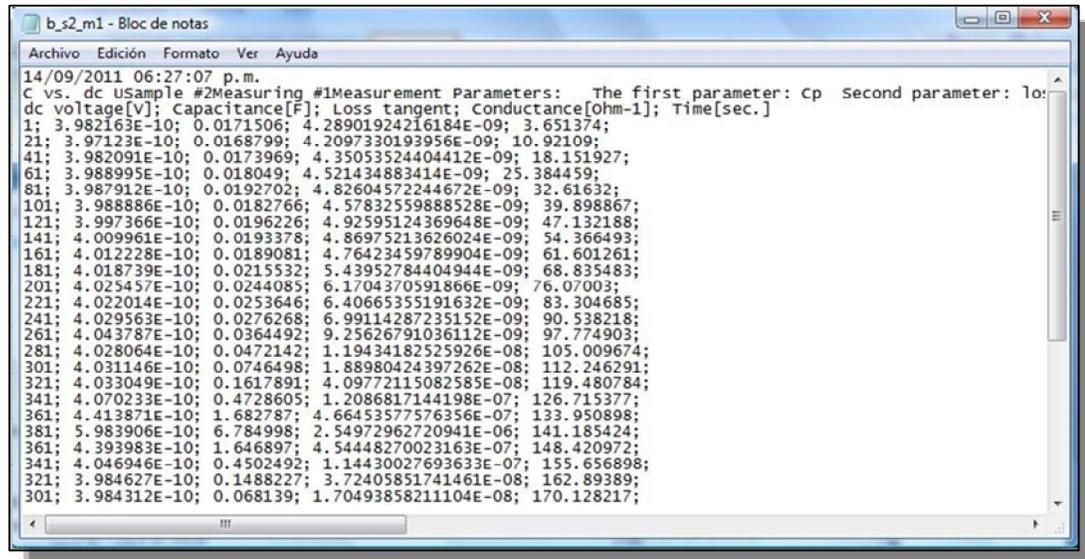
At the bottom, there is a checked checkbox "I am sure that all data is right" and three buttons: "Edit", "Back", and "Next".

Interfaz para ingresar parámetros de medición en modo capacitancia y conductancia vs f

Sin embargo es necesario leer el manual de LCR-medidor QuadTech 7600 y la fuente de voltaje Keithley 6487 para una mejor comprensión del tema.

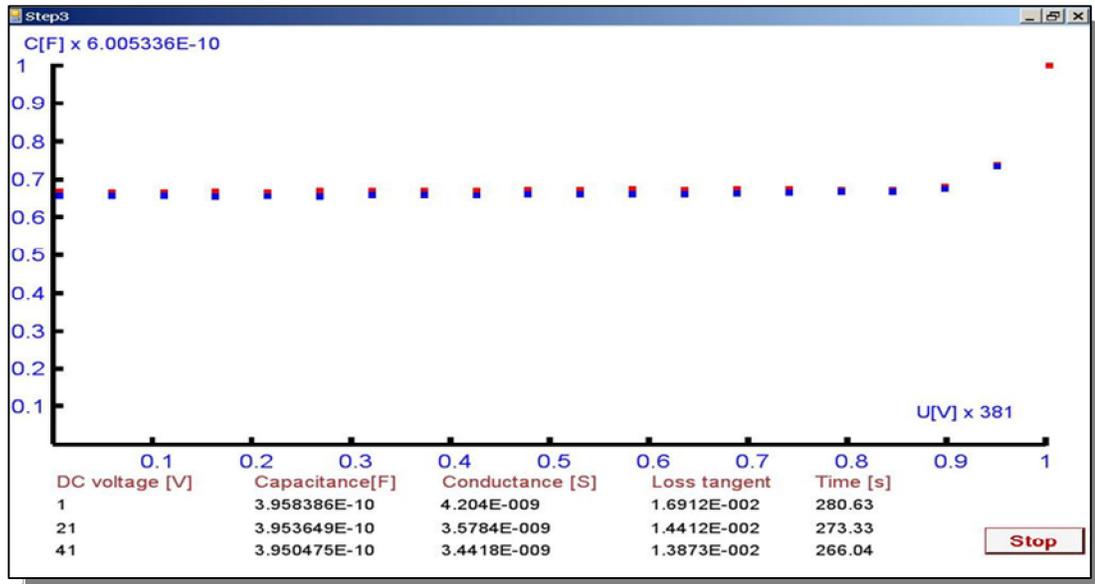
SALIDAS DEL SISTEMA

El sistema tiene 2 salidas, una de ellas es un respaldo en digital, un archivo donde vienen todos los registros de las mediciones en texto plano para que sea más fácil de utilizar en algún otro graficador como OriginLab, este archivo es guardado por default en la carpeta c:\Resultados_LCR\'nombre del archivo', en la siguiente imagen te mostramos un ejemplo de este archivo



Archivo con los datos de la medición

La otra salida es una imagen con la grafica que genera en el software, en esta se puede apreciar el resultado de la medición en una forma más precisa, como se muestra a continuación:



Grafica del software bajo la medición de capacitancia y conductancia vs frecuencia

En esta prueba se mostro solo una de las mediciones que se pueden hacer con el sistema LCR-medidor QuadTech 7600. Para realizar otro tipo de medición únicamente se selecciona el tipo de medición mostrado en la pantalla de *Tipos de mediciones en la interfaz del software*, eliges otro modo de medición, y realizas los pasos mostrados anteriormente ya que tienen la misma interfaz, solo varían los resultados dependiendo de los parámetros que desees medir.