

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA



“DESARROLLO DE SOFTWARE PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS DEL ELECTRÓMETRO KEITHLEY 6517B Y EL MULTÍMETRO KEITHLEY 2410 EN MEDICIONES DE CONDUCTANCIA ELÉCTRICA DE MATERIALES CERÁMICOS CONTRA TEMPERATURA”

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN COMPUTACIÓN

PRESENTA:

LORENA DEL MAR RAMÍREZ MORRUGARES

DIRECTORES DE TESIS

DR. OLEXANDR BONDARCHUK

DR. JOSUÉ AMILCAR AGUILAR MARTÍNEZ

HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA, ENERO DE 2016.

DEDICATORIA

A mi padre Hermilo.

A mis hermanos, Janet, Exiva, Aldahir, Raquel, Faby y Maria de Jesús.

A mi sobrino, Samuel Aramis, Regina Sofía.

A mis madres, Mamácita, Julia, mamáchina, Rufi.

A mis tías, Caro, Coi.

A mis tíos, Javier Varela, Víctor Hugo, Vicente y José Luis.

A mi familia, gracias por todo.

-Lorena Del Mar-

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis sinodales y asesores de tesis, el Dr. Alexander Bondarchuk y al Dr. Josué Almicar Martínez por su gran apoyo, motivación y por compartir sus conocimientos para la culminación de este proyecto de tesis.

ÍNDICE GENERAL

LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABLAS	VII
SÍMBOLOS ABREVIATURAS	IX
RESUMEN	X
CAPÍTULO 1- INTRODUCCIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	-1-
1.1 Planteamiento del problema	-2-
1.2 Justificación	-3-
1.3 Hipótesis	-3-
1.4 Objetivo general	-3-
1.4.1 Objetivos específicos	-4-
1.5 Metas	-4-
1.6 Metodología de desarrollo	-4-
1.7 Estructura de la tesis	-5-
CAPITULO 2-MARCO TEÓRICO	-7-
2.1 Materiales cerámicos con conducción no-ohmica	-7-
2.2 Equipos	-10-
2.2. 1 Electrómetro Keithley modelo 6517B	-10-
2.2.2 Fuente y unidad de medición Keithley 2410	-13-
2.2.3 Horno modelo GVA 12/450	-17-

2.2.4 Tarjeta KUSB-488B	-18-
2.2.5 Lenguajes de programación recomendados por el fabricante de KUSB-488B	-20-
2.3 Interfaz GPIB (IEEE 488)	-23-
2.4 Lenguaje unificado de modelado	-29-
<hr/>	
CAPITULO 3- DISEÑO Y PLANEACIÓN DE SOFTWARE PARA EL SISTEMA DE MEDICIÓN	-30-
3.1 Componentes del sistema	-31-
3.2 Descripción general del proceso de medición	-33-
3.3 Diseño del software	-34-
3.3.1 Requisitos del software	-34-
3.3.2 Plataforma de desarrollo del software	-38-
3.3.3 Modelo prescriptivo del proceso	-38-
3.3.4 Diseño modular del software	-39-
3.3.5 Modelado de casos de uso	-43-
CAPÍTULO 4- PRUEBAS	-48-
CAPÍTULO 5- RESULTADOS	-51-
CAPÍTULO 6- CONCLUSIONES	-54-
BIBLIOGRAFÍA	-55-
ANEXOS	-57-

LISTA DE FIGURAS

Figura. 2.1 Densidad de corriente eléctrica contra el campo de un varistor.	-8-
Figura.2.2 Electrómetro Keithley 6517B.	-11-
Figura 2.3 Fuente y unidad de medición Keithley 2410	-14-
Figura 2.4 Esquema estructural de Keithley 2410	-15-
Figura 2.5 Límites de voltaje y corriente generados por Keithley 2410.	-15-
Figura 2.6 Controlador de temperatura 3216P1.	-17-
Figura 2.7 Horno modelo GVA 12/450.	-18-
Figura 2.8 Tarjeta KUSB-488B.	-19-
Figura 2.9 Conector de la interfaz GPIB.	-25-
Figura 3.1 Diagrama del sistema de medición.	-30-
Figura 3.2 Sistema de medición: componentes y conexión.	-31-
Figura 3.3 Fases del modelo en cascada	-39-
Figura 3.4 Diagrama de flujo del software	-41-
Figura 3.5 Diagrama de caso de usos del sistema de medición.	-43-
Figura 4.1 La dependencia de conductancia contra temperatura para la muestra de cerámica In ₂ O ₃ -SrO.	-49-
Figura 4.2 La dependencia de conductancia contra temperatura para la muestra de cerámica In ₂ O ₃ -SrO-ZrO.	-50-
Figura 5.1 Sistema de medición.	-51-
Figura A.1 Interfaz de bienvenida al software.	-57-
Figura A.2 Interfaz del software que muestra al usuario la conexión de Keithley 6517B, eliminación de ruido en la corriente y conexión de Keithley 2410 al termopar.	-58-
Figura A.3 Menú para solicitar los datos para la configuración de Keithley 2410 y Keithley	-59-

6517B.

Figura A.4 Grafica de registro de conductancia eléctrica contra temperatura. -60-

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Mediciones de voltaje DC de 1μV a 200V.	-11-
Tabla 2.2 Las mediciones de resistencia Keithley 6517B.	-11-
Tabla 2.3 Mediciones de corriente Keithley 6517B.	-12-
Tabla 2.4 Datos técnicos de la fuente de voltaje interno.	-12-
Tabla 2.5 Datos técnicos de medidor de carga eléctrica.	-12-
Tabla 2.6 Datos técnicos de medidor de temperatura.	-13-
Tabla 2.7 Datos técnicos de medidor de humedad.	-13-
Tabla 2.8 Exactitud de voltaje programado para la FUM Keithley 2410.	-16-
Tabla 2.9 Exactitud de corriente programada para la FUM Keithley 2410.	-16-
Tabla 2.10 Exactitud de medición de corriente para la FUM Keithley 2410.	-16-
Tabla 2.11 Características de la tarjeta KUSB-488B.	-19-
Tabla 2.12 Especificaciones Eléctricas (TTL).	-25-
Tabla 2.13 Comandos básicos de comunicación para dispositivos.	-26-
Tabla 2.14 Estados operacionales de dispositivos.	-27-
Tabla 2.15 Protocolos de control del estándar IEEE 488.2.	-28-
Tabla 2.16 Comandos de lenguajes de alto nivel para programar un sistema IEEE 488.	-28-
Tabla 3.1 Equipos utilizados en el sistema de medición.	-32-

Tabla 3.2 Requisitos funcionales del software.	-35-
Tabla 3.3 Requisitos no funcionales del software.	-36-
Tabla 3.4 Flujo de datos del caso de uso medir conductancia eléctrica.	-44-
Tabla 3.5 Flujo de datos del caso de uso medir temperatura.	-45-
Tabla 3.6 Flujo de eventos del caso de uso ayuda.	-46-
Tabla 3.7 Flujo de eventos de caso de uso graficar.	-47-

Símbolos | Abreviaturas

U,V	Voltaje
I	Corriente
R	Resistencia
σ	Conductancia eléctrica
T	Temperatura
E	Campo eléctrico
R	Resistencia eléctrica
α	Coefficiente de no linealidad
BP	Barrera potencial
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
GPIB	General Purpose Interface Bus
FUM Keithley 2410	Fuente y unidad de medición Keithley 2410
UML	Lenguaje unificado de modelado

RESUMEN

Objetivo general de la tesis es desarrollar un software para automatizar el proceso de medición del electrómetro Keithley 6517B y la fuente y unidad de medición Keithley 2410 en mediciones de conductancia eléctrica de materiales cerámicos contra temperatura. Este trabajo fue planeado en el proyecto de CONACYT 154625-Y, convocatoria de investigación científica básica 2010, con el título “La obtención, estructura y propiedades eléctricas de materiales con conducción no-Óhmica a base de óxido de indio”.

El resultado principal de la tesis es un software elaborado para la adquisición de datos del electrómetro Keithley 6517B y la fuente y unidad de medición Keithley 2410, que realizan mediciones de conductancia eléctrica de materiales cerámicos contra temperatura.

El software se desarrolló en el lenguaje C++ utilizando el entorno de desarrollo integrado Microsoft Visual Studio, y la librería “ieee_32.h” proporcionada por el fabricante de Keithley.

La aplicación de este software permitió automatizar las mediciones, hacerlas de una manera más cómoda y simple para los usuarios, además de proteger la muestra contra el mal uso.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente en la UTM se cumple el proyecto de CONACYT 154625-Y, convocatoria de investigación científica básica 2010, con el título “La obtención, estructura y propiedades eléctricas de materiales con conducción no-Óhmica a base de óxido de indio”. En este proyecto, gran parte de la investigación consiste en el estudio de propiedades eléctricas de materiales cerámicos, en particular en el estudio del comportamiento de conductancia eléctrica (σ) de materiales contra temperatura (T). La dependencia de σ (T) contiene información sobre los procesos electrónicos en los bordes de granos en materiales cerámicos, en particular sobre la altura de las barreras potenciales que es importante saber para el desarrollo sistemático de materiales con ciertas propiedades.

Para registrar el comportamiento de σ (T) se usa el electrómetro Keithley 6517B como medidor de conductancia, la fuente y unidad de medición Keithley 2410 para medir el voltaje generado por el elemento termoelectrico y el horno modelo GVA 12/450 para calentar la muestra del material. Los equipos mencionados pueden trabajar bajo el control de la computadora a través del estándar de comunicación GPIB IEEE-488. Manejar estos equipos en modo manual es complicado debido a que el operador debe registrar valores de conductancia y temperatura simultáneamente en un intervalo corto de tiempo. Como resultado, existe gran probabilidad de error cometido por el humano. Además de esto, un experimento puede durar un periodo de tiempo aproximadamente de 10 horas o más, lo que hace el trabajo pesado para el operador, por lo que existe la necesidad de automatizar estas mediciones. En este proyecto de tesis se planea desarrollar un software que permita realizar la adquisición de datos del electrómetro Keithley 6517B y la fuente y unidad de medición Keithley 2410 mediante la tarjeta KUSB-488B utilizando el estándar de comunicación GPIB IEEE-488. Los datos obtenidos de las mediciones se requieren de forma gráfica.

1.1|Planteamiento del problema

En el laboratorio de Posgrado de la UTM se cuenta con el electrómetro Keithley 6517B, la FUM Keithley 2410 y los hornos GVA 12/450, utilizados para medir conductancia eléctrica (σ) de materiales contra temperatura (T). Actualmente, las operaciones de registro de dependencia de $\sigma(T)$ se realizan de forma manual: el operador debe configurar los equipos desde su panel frontal y realizar el registro de datos de las mediciones en un intervalo corto de tiempo. También algunos experimentos pueden durar alrededor de 10 horas y al operador le es difícil controlar constantemente las mediciones corriente eléctrica a través de la muestra, voltaje aplicado, temperatura. El electrómetro Keithley 6517B y la FUM Keithley 2410 cuentan con interfaz GPIB lo que permite manejarlos a través de la computadora pero el fabricante no proporciona el software para realizar el registro de dependencia de $\sigma(T)$ con estos equipos. En el presente proyecto de tesis se planea diseñar e implementar un software para la adquisición de datos del electrómetro Keithley 6517B y la FUM Keithley 2410 para automatizar el registro del comportamiento de conductancia eléctrica de materiales contra temperatura.

El uso del software debe reducir el tiempo de las mediciones, ahorrar el tiempo del operador para otras actividades, implementar la misma técnica de medición para diferentes muestras de materiales. También esta automatización debe disminuir o evitar la probabilidad de error cometido por el humano: la introducción incorrecta de parámetros de voltaje, corriente, elección incorrecta del modo de trabajo del equipo. Así, la aplicación de este software debe proteger a los equipos y muestras del material contra el mal uso.

El software debe tener una interfaz amigable de usuario, ser capaz de controlar y configurar los equipos de forma remota a través de la tarjeta KUSB-488B y obtener los datos de las mediciones (conductancia de muestra, temperatura, voltaje aplicado). Se planea que el software tenga la posibilidad de controlar la corriente a través de la muestra y el voltaje aplicado para que el registro de $\sigma(T)$ se realice en la región donde se cumple la ley de Ohm, que es un punto clave para esta técnica de medición. Los datos obtenidos se deben presentar de manera gráfica en la pantalla de la computadora y deben ser almacenados en forma electrónica para uso posterior en programas especializados como Origin, Matlab, Excel, entre otros.

1.2|Justificación

En la UTM se hacen investigaciones de materiales cerámicos donde se usa el electrómetro Keithley 6517B con la fuente y unidad de medición Keithley 2410 para registrar el comportamiento de conductancia eléctrica de materiales contra temperatura. Debido a que las operaciones de registro de mediciones de dependencia de $\sigma(T)$ se realizan de forma manual, configurando los equipos desde su panel frontal escogiendo los parámetros de medición, para el operador le es difícil llevar el registro de datos de las mediciones, ya que debe trabajar simultáneamente con el electrómetro Keithley 6517B y la FUM Keithley 2410 y hacer el registro de los datos de las mediciones en intervalos cortos de tiempo. Algunos experimentos duran aproximadamente 10 horas y en este proceso él operador puede cometer errores durante el experimento.

Por lo que automatizar el proceso de medición para el registro de dependencia $\sigma(T)$, simplifica el trabajo del operador protegiendo la muestra y equipos contra el mal uso, también se disminuye la posibilidad de error humano y el experimento se puede realizar sin necesidad del operador. El operador podría visualizar las características de $\sigma(T)$ de las muestra durante el experimento en la pantalla de la computadora y tener la posibilidad de cambiar los parámetros de medición cuando se requiera. Se podrá aplicar la misma técnica de medición para diferentes muestras de materiales.

1.3|Hipótesis

Es posible diseñar e implementar un software bajo el lenguaje de C++ para la adquisición de datos del electrómetro Keithley 6517B y la fuente y unidad de medición Keithley 2410 en el registro de comportamiento de conductancia eléctrica de materiales cerámicos contra temperatura y realizar los experimentos sin necesidad del operador.

1.4|Objetivo general

Desarrollar un software para automatizar el proceso de medición del electrómetro Keithley 6571B y la fuente y unidad de medición Keithley 2410 en registro de conductancia eléctrica de materiales cerámicos contra temperatura.

1.4.1|Objetivos específicos

1. Diseñar y construir una aplicación informática (Programa de software) que se apegue a los requisitos y restricciones planteadas en el objetivo general.
2. Controlar y configurar los equipos de forma remota a través de la tarjeta KUSB-488B.
3. Verificar y corregir errores del software en pruebas con dispositivos comerciales con características conocidas.
4. Realizar pruebas del software con las muestras de materiales cerámicos a base de óxido de indio y optimizar el funcionamiento del software.

1.5|Metas

1. Desarrollar un software para adquirir datos del electrómetro Keithley 6517B y la FUM Keithley 2410.
2. Realizar mediciones de prueba usando el software desarrollado sin necesidad del operador durante el experimento.
3. Reducir el tiempo en los experimentos en mediciones de conductancia eléctrica contra temperatura.
4. Proteger la muestra y equipo contra el mal uso.

1.6|Metodología de desarrollo

1. Estudiar los manuales del horno modelo GVA 12/450, electrómetro Keithley 6517B, la FUM Keithley 2410 y la tarjeta KUS-488B. Aprender las características, parámetros y limitaciones de los equipos.
2. Definir requisitos y restricciones del software
3. Modelado de casos de usos con la metodología orientada a objetos con modelado UML.
4. Diseño de interfaz de usuario.
5. Diseño de algoritmos para manejar los equipos.
6. Codificación de algoritmos bajo el lenguaje de C++.
7. Pruebas de software elaborado en mediciones con dispositivos comerciales y fabricados en el laboratorio de la UTM.

8. Correcciones de errores en el software y la optimización de su funcionamiento.

1.7|Estructura de la tesis

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

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Se presenta una breve introducción sobre el problema que se planea resolver en este proyecto de tesis, el planteamiento del problema, justificación, hipótesis objetivos, metas y metodología del trabajo de tesis.

Capítulo 2. MARCO TEÓRICO

Comprende información sobre los materiales cerámicos con conducción no-ohmica y los equipos que forman parte del sistema de medición: como el electrómetro Keithley6517B, la fuente y unidad de medición Keithley 2410, horno modelo GVA 12/450, tarjeta KUSB-488B. 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.

Capítulo 3. DISEÑO Y PLANEACIÓN DE SOFTWARE PARA EL SISTEMA DE MEDICIÓN

En este capítulo, se describen: los componentes del sistema de medición, y proceso de medición, el diseño del software y el modelo prescriptivo que se utiliza para el desarrollo del software.

Finalmente se describen los requisitos del software, el diseño modular del programa y casos de uso.

Capítulo 4. PRUEBAS

En este capítulo, se describen las pruebas realizadas con dispositivos para verificar el correcto funcionamiento del sistema de medición.

Capítulo 5. RESULTADOS

En este capítulo se presentan descripción de software elaborado, las posibilidades de sistema de medición obtenida y su esquema estructural.

Capítulo 6. CONCLUSIONES

Finalmente en este capítulo se da una conclusión donde se presentan los resultados más importantes del proyecto de tesis obtenidos durante la investigación.

Bibliografía | Bibliografía

Por último se presentan las referencias bibliográficas utilizadas.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta información sobre los equipos, materiales y un el lenguaje de programación usados para la preparación de la tesis.

2.1|Materiales cerámicos con conducción no-Óhmica

Los materiales cerámicos son sólidos inorgánicos no metálicos, policristalinos y frágiles, producidos mediante tratamiento térmico [1]. En los óxidos cerámicos se han descubierto muchos efectos físicos y fenómenos interesantes que han encontrado aplicación en la radiotecnica moderna. Entre estos efectos y fenómenos se pueden mencionar algunos ejemplos como la superconductividad a altas temperaturas [2], el efecto varistor [3], el efecto posistor [4], la sensibilidad de resistencia eléctrica a diferentes gases [5], entre otros. La naturaleza física de estos efectos y sus fenómenos es muy diferente, y en algunos casos no se ha estudiado completamente. Sin embargo, es sabido que en muchos materiales cerámicos las regiones de los bordes de grano juegan un papel muy importante en sus propiedades eléctricas [3,6]. En particular, un ejemplo de dichos materiales son los óxidos cerámicos con efecto varistor. El efecto varistor se origina en los bordes activos de granos donde existen barreras potenciales (BP) para los portadores de carga mayoritarios [7,8]. La formación de BP en los bordes de granos surge como consecuencia de la presencia de electrones atrapados en estados superficiales introducidos en el gap de bandas de energía del semiconductor. Los electrones atrapados forman una capa de carga negativa en el borde de grano que es neutralizada por una capa de sitios donadores cargados positivamente a ambos lados del borde de grano, dando lugar a la mencionada región de carga espacial o región de depleción. Como resultado de esto, se produce la aparición de un campo electrostático en la zona que provoca la curvatura de las bandas de energía y con ello se origina la formación de una barrera potencial en el borde de grano [1]. En tales materiales cerámicos, donde las barreras determinan la resistencia eléctrica de granos, la corriente puede aumentar más rápido que el voltaje aplicado (efecto varistor). Este efecto no-Óhmico se usa en varistores cerámicos [7].

Los varistores son dispositivos electrónicos, cerámicos, policristalinos con comportamiento de corriente-voltaje no lineal y simétrico (Figura 2.1) [7,9].

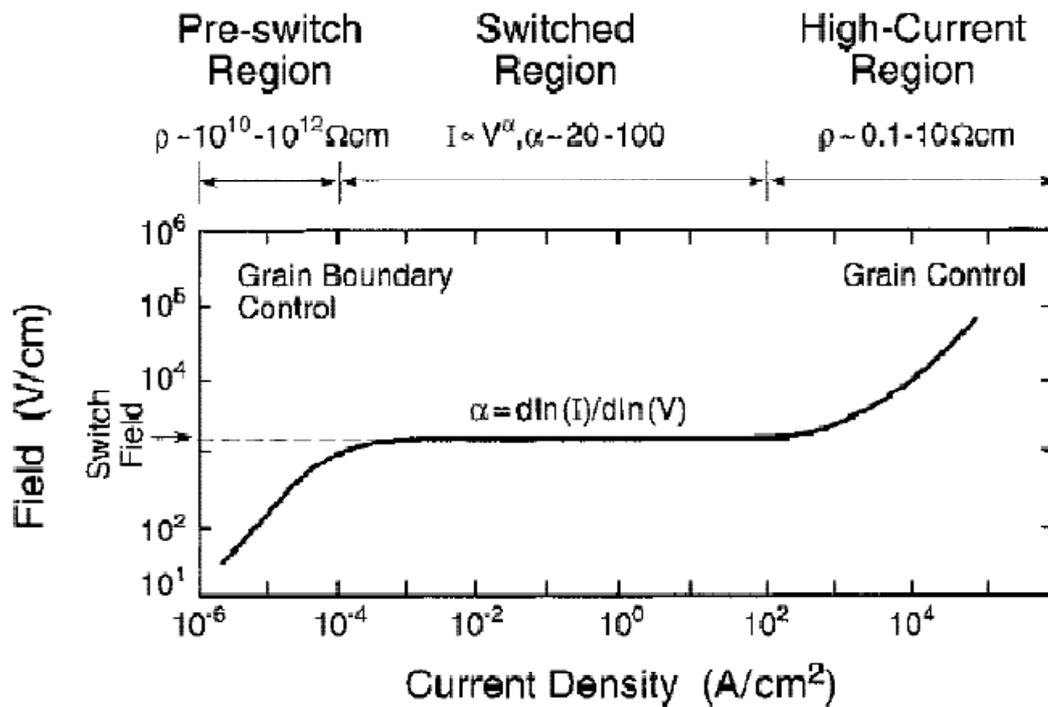


Figura2.1 Densidad de corriente eléctrica contra el campo de un varistor [7].

Los varistores se usan como protectores frente a sobrevoltajes transitorios. Los sobrevoltajes transitorios se pueden originar por maniobras de conexión o desconexión, de descargas atmosféricas o electroestáticas [10]. Cuando se presenta un transitorio, el varistor cambia su resistencia de valor alto a muy bajo, el transitorio es absorbido por el varistor y de esta manera protege a los componentes más sensibles de un circuito [11]. Una vez eliminada la amenaza, el voltaje regresa a su valor habitual y el material recupera su estado altamente resistivo, evitando pérdidas innecesarias de corriente. En ausencia de picos de voltaje el varistor actúa como un elemento pasivo que no influye en el funcionamiento normal del equipo que protege.

Un varistor se caracteriza generalmente mediante dos parámetros: el coeficiente de no-linealidad α y el valor del campo eléctrico E_α , los cuales son determinados a una corriente de 1 mA/cm^2 . El coeficiente de no-linealidad se calcula de la siguiente manera [1, 2, 7]:

$$\alpha = \frac{U}{I} \frac{dI}{dU} \quad (1)$$

Donde U es el voltaje e I es la corriente.

En el régimen de no-linealidad, la relación entre la corriente y el voltaje para varistor se expresa usualmente en términos de la siguiente ley de potencia [7,10]:

$$I \sim U^\alpha \quad (2)$$

Así, tal comportamiento de corriente-voltaje no lineal en varistores permite usarlos para la protección de circuitos eléctricos contra los sobrevoltajes.

Este tipo de comportamiento de dependencia entre I y U se encontró en diferentes óxidos cerámicos semiconductores: ZnO, TiO₂, WO₃, SnO₂ [6, 7]. Sin embargo, actualmente sólo los varistores basados en ZnO son utilizados ampliamente en la radiotecnia moderna. En el proyecto de CONACYT que se cumple en la UTM, una de las metas es la obtención de nueva cerámica a base de In₂O₃ con conducción no-Ohmica para varistores. El óxido de indio es un semiconductor tipo n con una conductividad lo suficientemente elevada y que tiene un gran ancho de banda de energías prohibidas [12]. Por eso el In₂O₃ se usa ampliamente como material para electrodos transparentes de película delgada en dispositivos optoelectrónicos [13,14]. En estructuras cerámicas de In₂O₃ puede observarse la limitación de corriente con el incremento del voltaje y el efecto varistor [15,16]. Estos fenómenos son interesantes desde el punto de vista científico y práctico. Por eso, la obtención y estudio de cerámicas basadas en In₂O₃ con conductividad no-Óhmica tienen gran relevancia.

2.2|Equipos

El proceso de medición requiere el uso de instrumentos como medios físicos para determinar la magnitud de una variable. Los instrumentos constituyen una extensión de las facultades humana y en muchos casos permiten a las personas determinar el valor de una cantidad desconocida, la cual no podría medirse utilizando solamente las facultades sensoriales, por lo tanto, un instrumento se puede definir como un dispositivo para determinar el valor o la magnitud de una cantidad o variable.

El instrumento electrónico, como lo indica su nombre, se basa en principios eléctricos o electrónicos para efectuar alguna medición, se puede ser un aparato relativamente sencillo y de construcción simple o un sistema complejo. El desarrollo de la tecnología demanda la existencia de nuevos diseños e instrumentos con mayor exactitud y precisión [25].

Para medir la dependencia de conductancia de materiales contra temperatura en el laboratorio de la UTM se usa el electrómetro Keithley modelo 6517B y la temperatura se registra a través de mediciones de voltaje del termopar con la fuente y unidad de medición Keithley 2410. Estos equipos tienen interfaz integrada en el estándar IEEE-488 y están manejando por computadora a través de tarjeta KUSB-488B.

2.2.1|Electrómetro Keithley modelo 6517B

El Keithley 6517B es un electrómetro/medidor de alta resistencia de 5½ dígitos (ver Figura 2.2) que ofrece exactitud y sensibilidad [26]. Cuenta con funciones que simplifican la medición de altas resistencias y la medición de resistividad de los materiales aislantes. Ofrece una manera rápida y fácil de medir corrientes muy bajas. La memoria interna respaldada por una batería interna, puede almacenar hasta 50,000 lecturas, puede ser controlado con la interfaz integrada en el estándar IEEE-488, lo que hace posible programar todas las funciones sobre el bus a través de un controlador de equipo [20].

Muchas aplicaciones requieren mediciones de prueba a altos niveles de resistividad (superficie o volumen) de materiales. El método convencional de hacer estas mediciones es aplicar un voltaje suficientemente grande para una muestra, medir la corriente que fluye a través de la muestra, se calcula la resistencia usando la Ley de Ohm ($R = V / I$). Mientras

que los materiales de alta resistencia y dispositivos producen muy pequeñas corrientes que son difíciles de medir con precisión, el electrómetro Keithley 6517B se utiliza con éxito para tales mediciones [20].



Figura 2.2 Electrómetro Keithley 6517B.

El electrómetro Keithley 6517B cuenta con las siguientes capacidades de medición, que se muestran en las siguientes tablas [26]:

Tabla 2.1 Mediciones de voltaje DC de 1μV a 200V [26].

5 1/2 Digit range	Resolution	Accuracy 18°-28°C ±(%rdg+counts)	Temperature Coefficient 0°-18° & 28°-50°C ±(%rdg+counts)/°C
2 V	10 μV	0.025 + 4	0.003 + 2
20 V	100 μV	0.025 + 3	0.002 + 1
200V	1 mV	0.06 + 3	0.002 + 1

Tala 2.2Las mediciones de resistencia de 10Ω a 200TΩ.

Range	5 1/2 Digit Resolution	Accuracy (10-100%Range) 18°-28°C (1 year) ±(%rdg+counts)	Temperature Coefficient (10-100%Range) 0°-18° & 28°-50°C ±(%rdg+counts)/°C	Auto V source	Amps range
2 MΩ	10 Ω	0.125 + 1	0.01 + 1	40 V	200 μA
20 MΩ	100 Ω	0.125 + 1	0.01 + 1	40 V	20 μA
200 MΩ	1 kΩ	0.15 + 1	0.015 + 1	40 V	2 μA
2 GΩ	10 kΩ	0.225 + 1	0.035 + 1	40 V	200 nA
20 GΩ	100 kΩ	0.225 + 1	0.035 + 1	40 V	20 nA
200 GΩ	1 MΩ	0.35 + 1	0.110 + 1	40 V	2 nA
2 TΩ	10 MΩ	0.35 + 1	0.110 + 1	400 V	2 nA
20 TΩ	100 MΩ	1.025 + 1	0.105 + 1	400 V	200 pA
200 TΩ	1 GΩ	1.15 + 1	0.125 + 1	400 V	20 pA

Tabla 2.3 Mediciones de corriente Keithley 6517B.

5 1/2 Digit Range	Resolution	Accuracy (1 year) 18°-28°C ±(%rdg+counts)	Temperature Coefficient 0°-18° & 28°-50°C ±(%rdg+counts)/°C
20 pA	100 aA ²	1 + 30	0.1 + 5
200 pA	1 fA ²	1 + 5	0.1 + 1
2 nA	10 fA	0.2 + 30	0.1 + 2
20 nA	100 fA	0.2 + 5	0.03 + 1
200 nA	1 pA	0.2 + 5	0.03 + 1
2 µA	10 pA	0.1 + 10	0.005 + 2
20 µA	100 pA	0.1 + 5	0.005 + 1
200 µA	1 nA	0.1 5	0.005 + 1
2 mA	10 nA	0.1 + 10	0.008 + 2
20 mA	100 nA	0.1 + 5	0.008 + 1

Tabla 2.4 Datos técnicos de la fuente de voltaje interno.

Range	5 1/2 Digit range Resolution	Accuracy (1 year) 18°-28°C ±(%setting+offset)	Temperature Coefficient 0°-18° & 28°-50°C ±(%setting+offset)/°C
100 V	5 mV	0.15 + 10 mV	0.005 + 1 mV
1000V	50 mV	0.15 + 100 mV	0.005 + 10 mV

Tabla 2.5 Datos técnicos de medidor de carga eléctrica.

Range	5 1/2 Digit Resolution	Accuracy (1 year) 18°-28°C ±(%rdg+counts)	Temperature Coefficient 0°-18° & 28°-50°C ±(%rdg+counts)/°C
2 nC	10 fC	0.4 + 5	0.04 + 3
20 nC	100 fC	0.4 + 5	0.04 + 1
200 nC	1 pC	0.4 + 5	0.04 + 1
2µC	10 pC	0.4 + 5	0.04 + 1

Tabla 2.6 Datos técnicos de medidor de temperatura.

Thermocouple Type	Range	Accuracy (1 year) 18°-28°C ±(%rdg+°C)
K	-25°C to 150°C	±(0.3% + 1.5 °C)

Tabla 2.7 Datos técnicos de medidor de humedad.

Range	Accuracy (1 year) 18°-28°C ±(%rdg+°C)
0-100%	±(0.3% + 0.5)

2.2.2| Fuente y unidad de medición Keithley modelo 2410

La fuente y unidad de medición Keithley 2410 o también llamada FUM Keithley 2410 es un instrumento complejo, está diseñada específicamente para aplicaciones de pruebas que exigen un alto abastecimiento en una medición [27]. La fuente y unidad de medición, es a la vez una fuente de alimentación altamente estable, es un multímetro de 6 ½ dígitos. Las características de la fuente de alimentación incluye un nivel bajo de ruido, alta repetibilidad, precisión. En funcionamiento, este instrumento puede actuar como una fuente de voltaje, una fuente de corriente, medidor de voltaje, medidor de corriente y actúa como ohmímetro.

La fuente y unidad de medición se encuentra disponible para una amplia gama de aplicaciones como para uso para fabricantes de componentes y módulos para las comunicaciones, semiconductores y en las industrias médicas.

Este instrumento tiene la ventaja de programar los límites de voltaje y corriente para proteger al dispositivo bajo prueba, circuito externo o la misma FUM Keithley 2410. El cumplimiento apropiado de los límites de corriente puede ser vital para prevenir la disipación de potencia excesiva en un dispositivo, mientras que, al cumplir con los límites de voltaje puede proteger un dispositivo susceptible a ser dañado por picos de sobre voltaje.

La fuente y unidad de medición Keithley 2410 se usará como un medidor de voltaje (Figura 2.3) tiene la funcionalidad de 5 instrumentos en uno [21].

Capacidades:

- Cinco instrumentos en uno (IV Fuente, Medida IVR)
- Multímetro digital de 6 1/2.
- Rango de corriente: 10A a 10pA.
- Rango de voltaje: 1 μ V a 1100V.
- Comunicación: GPIB/RS232/Trigger/Digital I-O, display VFD.
- Genera V, A / Mide V, A, Ω .



Figura 2.3 Fuente y unidad de medición Keithley 2410.

Especificaciones de la fuente y unidad de medición Keithley 2410

La fuente y unidad de medición Keithley 2410 puede ser operado como fuente de voltaje y medidor de corriente o fuente de corriente y medidor de voltaje. También puede ser configurado como medidor de resistencia en el modo de fuente de corriente. Cuando la FUM Keithley trabaja como fuente de voltaje puede suministrar a través de sus terminales de -1100V a 1100V. Su esquema estructural es mostrado en la Figura 2.4, los datos técnicos para la FUM Keithley 2410 se presentan en Figura 2.5 y Tablas 2.8-2.10 [27].

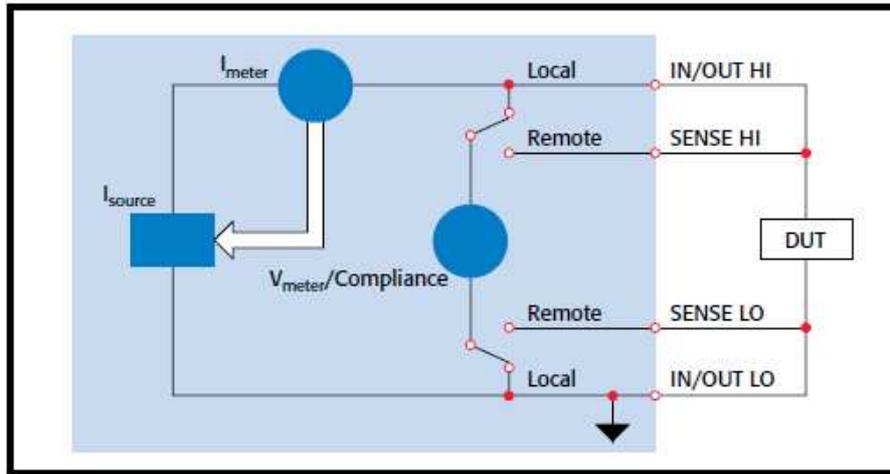


Figura 2.4 Esquema estructural de Keithley 2410.

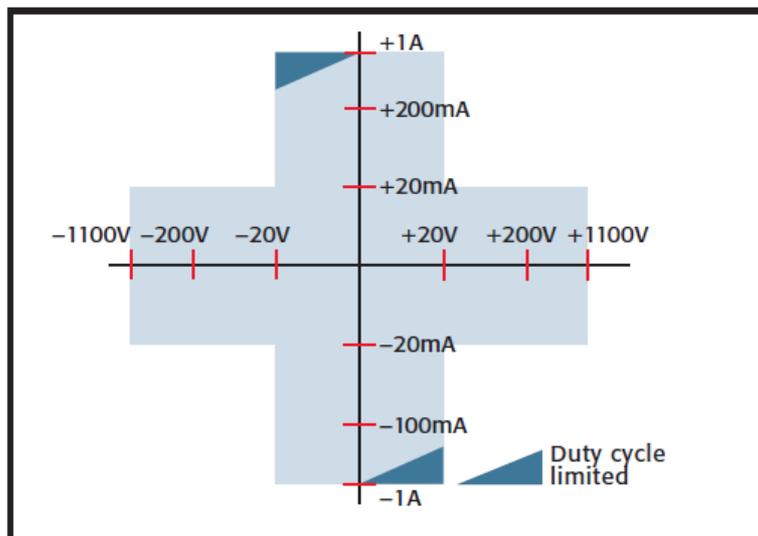


Figura 2.5 Límites de voltaje y corriente generados por Keithley 2410.

Tabla 2.8 Exactitud de voltaje programado para la FUM Keithley 2410 [27].

Model 2410 source and mesure range	Source voltage	Model 2410 voltage reading limits (1 year, 18°C-28°C)
200 mV	200.000 mV	199.676 to 200.324mV
2 V	2.00000 V	1.99946 to 2.00054V
20 V	20.0000 V	19.9960 to 20.0040V
1000 V	975.00 V	974.80 to 975.20V

Tabla 2.9 Exactitud de corriente programada para la FUM Keithley 2410.

Model 2410 source and mesure range	Source current	Model 2410 current reading limits (1 year, 18°C-28°C)
1μA	1.00000 μA	0.99941 to 1.00059 μA
10μA	10.0000 μA	9.9966 to 10.0034 μA
100μA	100.000 μA	99.969 to 100.031 μA
1mA	1.00000mA	0.99967 to 1.00033mA
20mA	20.0000mA	19.9918 to 20.0082mA
100mA	100.000mA	99.939 to 100.061mA
1mA	1.00000A	0.99723 to 1.00277A

Tabla 2.10 Exactitud de medición de corriente para la FUM Keithley 2410.

Model 2410 range	Calibrator resistance	Model 2410 resistance reading limits (1 year, 18°C-28°C)
20Ω	19Ω	18.9739 to 19.0261 Ω
200Ω	190 Ω	189.719 to 190.281 Ω
2kΩ	1.9k Ω	1.897998 to 1.90202k Ω
20kΩ	19 kΩ	18.9805 to 19.0195k Ω
200kΩ	190 kΩ	189.801 to 190.199k Ω
2MΩ	1.9M Ω	1.89722 to 1.90278M Ω
20MΩ	19M Ω	18.9758 to 19.0242M Ω
200MΩ	100M Ω	99.321 to 100.679M Ω

2.2.3|Horno modelo GVA 12/450

Horno GVA 12/450 está desarrollado para el tratamiento térmico de materiales a diferentes temperatura usando diferentes regímenes, con diferente velocidad de calentamiento/ enfriamiento y la exposición a diferentes temperaturas fijas. El proceso de trabajo de horno está regulado por un controlador de temperatura 3216P1 (Figura 2.6). Las características generales de horno GVA 12/450 son las siguientes:



Figura 2.6 Controlador de temperatura 3216P1.

Características del horno

- Temperatura máxima de funcionamiento de 1200°C.
- Acepta tubo de trabajo con un diámetro exterior de hasta 170 mm.
- Acepta tubo de trabajo con 300, 450, 600, 750, 900,1050 o 1200 mm de longitud del tubo calentado.
- Adaptadores para tubos extraíbles, simplifican el trabajo con diámetro de tubo diferente.
- Larga vida, calentamiento rápido, elementos de alambre resistivo montado en rígido, vacío formó módulos de aislamiento.
- Puede ser utilizado de manera horizontal, vertical o en el soporte de la pared.
- Carbolite 301, PID con ajuste digital y pantalla.
- Función de temporizador de inicio / proceso de retraso de serie.
- Comunicación RS232, RS485 o Ethernet.



Figura 2.7 Horno modelo GVA 12/450

El cuerpo versátil del horno y su diseño permite manejarlo de forma horizontal, vertical o en el soporte de pared Figura 2.7 [22].

Lo hornos de tubo GVA utilizan elementos de alambre de irradiación libre incrustados dentro del aislamiento del cuerpo del horno. La ventaja de este diseño es su flexibilidad; con el uso de adaptadores de tubo el mismo horno puede ser utilizado con una variedad de diámetros de tubo. El uso de un tubo de trabajo independiente tiene la ventaja de proteger los elementos de calefacción de daños o contaminación.

2.2.4|Tarjeta KUSB-488B

Las soluciones de Keithley de interfaz GPIB hacen que sea fácil para agregar el control estándar de bus IEEE-488.2 a cualquier sistema de PC. Estas herramientas de alta velocidad pueden controlar hasta 14 instrumentos GPIB u otros dispositivos a una distancia de hasta 20 metros. La interfaz de USB a GPIB Keithley KUSB-488B convierte cualquier computadora con un puerto USB en un controlador GPIB completamente funcional. La tarjeta KUSB-488B fue realizado con una interfaz de propósito general GPIB estándar

IEEE 488. La tarjeta KUSB-488B (Figura 2.8) es pequeño y este factor lo hace perfecto para su uso con computadoras portátiles en aplicaciones portátiles o para otras aplicaciones en las que el equipo no tiene ranuras para tarjetas PCI. Es compatible con USB 2.0 y tiene una tasa de transferencia de datos IEEE más de 1.5 MB / s a través del puerto USB (Tabla 2.11). No requiere alimentación externa.



Figura 2.8 Tarjeta KUSB-488B.

Tabla 2.11 Características de la tarjeta KUSB-488B [28].

Bus/Form Factor	USB
Dimensions	3.2 x 2.6 x 1.1 in (81.7 x 66.1 x 27.8 mm)
Power (Current @5vdc)	500mA
Transfer Speed	1.5 Mbyte/s
EMC	European directive 2004/108/EEC
Enviromental	Operating: 0° to 55°C, 10% to 90% RH non-condensing Storage: -20° to 80°c, 5% to 95% RH non-condensing

Incluye software para su configuración, puede ser ejecutado en los entornos de desarrollo en Windows 7, Vista, XP, 2000 y cuenta con los controladores para la mayoría de los lenguajes de programación actuales [23].

2.2.5|Lenguajes de programación recomendados por el fabricante de la tarjeta KUSB-488B

Keithley es el fabricante de la tarjeta KUSB 488B y recomienda los siguientes lenguajes para el desarrollo del software: Visual Basic, LabVIEW, LabWindows.

Un lenguaje de programación consiste en un conjunto de órdenes o comandos que describen el proceso deseado. Cada lenguaje tiene sus instrucciones y enunciados verbales propios, que se combinan para formar los programas de cómputo. Los lenguajes de programación no son aplicaciones, sino herramientas que permiten construir y adecuar aplicaciones.

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

se puede programar desde sistemas operativos y compiladores, base de datos, procesadores de texto y aplicaciones que resuelvan un problema particular.

Microsoft Visual Studio. Microsoft Visual Studio es un entorno de desarrollo integrado (IDE), que Microsoft ha desarrollado para la creación de software enfocado al sistema operativo Windows. Puede soportar lenguajes de programación como Visual C++, Visual J++ y Visual Basic.NET. Permite crear aplicaciones, sitios y aplicaciones web, servicios web en cualquier entorno que soporte la plataforma .NET.

Microsoft Visual Studio .NET (Visual Basic .NET, C#). Microsoft Visual Studio .NET 2002 cambia completamente la estructura, se introdujo la plataforma .NET de Microsoft .NET. Los programas no se compilan para generar un ejecutable máquina (un archivo .EXE), si no que genera un archivo intermedio para poder ser ejecutado en diferentes plataformas. A esta versión se le agregan nuevos lenguajes: Visual J#, Visual C# y Visual Basic .NET. Este último se convirtió en un lenguaje orientado a objetos.

Microsoft Visual Studio 2005. Microsoft Visual Studio 2005 tuvo un cambio muy importante, ahora es posible trabajar con el Framework .NET 2.0, compilar hacia aplicaciones de 32 bits y 64 bits (por ejemplo para procesadores AMD64 de Advanced Micro Devices, Inc.) y trabajar con Microsoft SQL Server 2005.

Microsoft Visual Studio 6.0 (Visual Basic, Visual C++). Microsoft Visual Studio 6.0 salió en 1998. Con esto se movieron los números de versión de todos los Lenguajes de programación y fue la última versión que Visual J++ y Visual InterDev aparecieron en una paquetería de Visual Studio.

Microsoft Visual Studio 2008. Visual Studio 2008 nos provee una serie de herramientas para desarrollo, así como características de debugging, funcionalidad en base de datos y características innovadoras para la creación de aplicaciones en una variedad de plataformas. Visual Studio 2008 incluye realces como un diseñador visual para desarrollo rápido con el .NET Framework 3.5, esto nos ayuda mucho a los que desarrollan en web por que se incluyen las características de Microsoft Expression Web, que la verdad en mi punto

de vista esta excelente, Visual Studio 2008 provee a desarrolladores con todas las herramientas y el framework el poder crear aplicaciones web con el soporte de AJAX.

Visual Studio 2008 nos provee un nuevo lenguaje de consultas integrado para el manejo de la información, el cual se llama Microsoft Language Integrated Query (LINQ), que es lo nos hará la vida mas fácil para programadores individuales para poder construir soluciones que analicen y actúen sobre la información.

Visual Studio 2008 también nos provee a desarrolladores la habilidad de poder escoger entre múltiples versiones del Framework con el mismo entorno de desarrollo, así nosotros podemos desarrollar en la versión que queramos ya sea en .NET Framework 2.0, 3.0 o 3.5, entiendo así que soporta un gran variedad de proyectos en la versión X en el mismo entorno de desarrollo. Visual Studio 2008 ofrece a desarrolladores nuevas herramientas para la fácil creación de aplicaciones conectadas en las ultimas plataformas incluyendo web, Windows Vista, Office 2007, SQL Server 2008 y Windows Server 2008. Para la web, tenemos ASP.NET, AJAX y otras tecnologías como Silverlight, WPF, etc. que nos dará la posibilidad de crear aplicaciones con rica interfaz de usuario, para poder dar una experiencia de usuario sin precedentes.

LabWindows/CVI. Es un sistema de software para programadores en C. Orientado para aplicaciones de adquisición de datos y control de instrumentos. Un programa en LabWindows/CVI consta básicamente de dos partes: de una interfaz gráfica y un programa escrito en C que gestiona los mensajes de control. Crear una interfaz gráfica (GUI) para controlar y visualizar tareas en una determinada aplicación, se puede construir sin tener que escribir ni una sola línea de código fuente gracias al editor de interfaz de usuario. La interfaz puede constar de: paneles, pulsadores, y otros tipos de controles. En todo tipo de interfaz creada en LabWindows se van generando controles que definen eventos y que serán manejados por el programa de control escrito en C. La importancia de LabWindows/CVI radica en sus librerías. Para la adquisición de datos cuenta con cinco librerías: InstrumentLibrary, GPIB/GPIB 488.2 Library, Data Acquisition Library, RS-232 Library y VXILibrary .

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench). Es un lenguaje de programación gráfico para el diseño de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control. Los programas desarrollados mediante LabVIEW se denominan Instrumentos Virtuales (VIs) porque su apariencia y funcionamiento imitan los de un instrumento real. Permite diseñar interfaces entendibles a la vista, eficaces y muy reales. En el ambiente de trabajo de LabVIEW existen dos paneles: el panel frontal y el panel de programación o diagrama de bloques. En el panel frontal se diseña la interfaz de usuario, y en el panel de programación se relacionan los elementos utilizados en la interfaz mediante operaciones que determinan en sí como funciona el programa. LabVIEW posee extensas librerías de funciones y subrutinas. Además de las funciones básicas de todo lenguaje de programación, LabVIEW incluye librerías específicas para la adquisición de datos, control de instrumentación VXI, GPIB y comunicación serie, análisis y presentación y guardado de datos. LabVIEW también proporciona potentes herramientas que facilitan la depuración de los programas.

2.3 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 serie (transmisión de datos serial) o paralela. La interfaz paralela realiza la transmisión simultáneamente de varios bits y la principal ventaja de una interfaz paralela, es la velocidad con que pueden ser transferidos los datos de una computadora a un dispositivo periférico.

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 irrepitible, que se logra mediante la asignación de una dirección codificada con 7 bits para cada instrumento.

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, dispuestos en 2 filas paralelas. La Figura 2.9 muestra el aspecto físico del conector y el estándar de la distribución de las líneas [19].

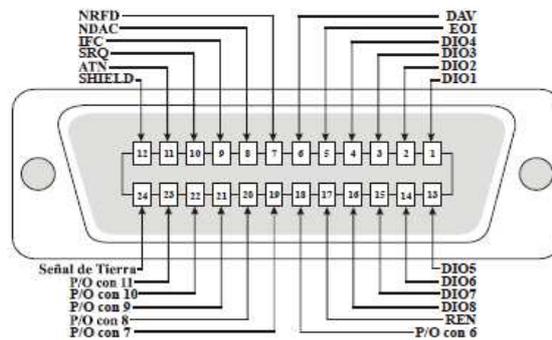


Figura 2.9 Conector IEEE 488.

Las normas del estándar IEEE 488.1 definen que todo sistema GPIB debe trabajar con lógica negativa. En la Tabla 2.12, se muestran los rangos para determinar el valor de falso o verdadero del nivel lógico de recibido.

Tabla 2.12 Especificaciones Eléctricas (TTL).

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

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

Las cabeceras pueden ser de tres tipos: simples, compuestas y comandos comunes. La terminación del mensaje se puede realizar con activación de la línea EOI o con el carácter NL.

La norma define 39 comandos comunes. De ellos 13 (Tabla 2.13) deben ser interpretados por todos los dispositivos conectados al bus GPIB. Estos comandos básicos de comunicación con el equipo pueden a la vez ser utilizados por lenguajes de programación de alto nivel (C++®, visual®, MATLAB®, etc.). Además describe un protocolo de intercambio de mensaje para ser usado en el bus IEEE 488.1.

Tabla 2.13 Comandos básicos de comunicación para dispositivos [18].

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

Se ha definido un conjunto de estados operacionales para implementar el protocolo de mensaje a dispositivo de IEEE 488.2, tal y como se puede apreciar en la Tabla 2.14. Todo esto con la finalidad de poder desarrollar interfaces más amigables con el usuario y que faciliten la extracción de información de forma remota del equipo. Un dispositivo de control debe implementar protocolos, que son rutinas de alto nivel que combinan secuencias de control para realizar operaciones básicas en los sistemas de instrumentación. El estándar IEEE 488.2 define 2 protocolos obligatorios (RESET y ALLSPOLL) y 6 opcionales, como se muestra en 29 la Tabla 2.15. Este protocolo se utiliza al iniciar la ejecución de una aplicación, para verificarla configuración del sistema y para que el dispositivo controlador genere una lista de todos los instrumentos disponibles.

Tabla 2.14 Estados operacionales de dispositivos [17].

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

Tabla 2.15 Protocolos de control del estándar IEEE 488.2 [17].

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

En cuanto a los lenguajes de alto nivel se presenta la Tabla 2.16 que muestra un conjunto de comandos de lenguaje de alto nivel que pueden ser usados para programar un sistema IEEE 488.

Tabla 2.16 Comandos de lenguajes de alto nivel para programar un sistema IEEE 488.

Comando	Función
ABORT	Finaliza el actual dispositivo seleccionado y el mando. Si no se encuentra el dispositivo, el bus es limpiado y ajustado a la situación dada en el último comando CONFIG.
CLEAR	Limpia o restablece el o los dispositivos seleccionados. Si no se encuentra el dispositivo, el bus es limpiado y colocado al último estado conocido.
ENTER	Lee datos del dispositivo seleccionado.
EOI	Envía un byte de datos para el dispositivo con EOI verdadera. El dispositivo debe programarse como emisor antes de que el comando se ejecute
LOCAL	Pone el dispositivo (s) seleccionado en modo local. Si ningún dispositivo es especificado entonces todos los dispositivos sobre el bus son puestos en modo local.
OUTPUT	Envía una cadena al receptor seleccionado. Si ningún oyente es especificado en la orden, entonces todos los receptores recibirán la cadena especificada.

PARPOL	Lee el byte de estado de los dispositivos que han sido puestos para un sondeo paralelo.
PASCTL	Pasa el control del bus al dispositivo especificado.
PPCONF	Ajusta la configuración de sondeo paralelo para el dispositivo especificado.
PPUNCF	Restablece la configuración de sondeo paralelo para el dispositivo especificado.
REMOTE	Selecciona el modo remoto para el dispositivo seleccionado.
REQUEST	Solicita servicio de un controlador activo.
STATUS	Lee un (sondeo serie) byte de estado el dispositivo seleccionado.
SYSCON	Configura el sistema para una configuración de usuario. El comando inicializa una serie de variables del sistema incluyendo MAD. La dirección del controlador del sistema. CIC. El controlador a cargo. NOB. El número de controladores en el bus. BA0. La base de direcciones E/S para el primer controlador de bus. BA1. La base de direcciones E/S para el segundo controlador de bus.
TIMEOUT	Establece la duración de intervalo de espera cuándo se transfieren datos hacia y desde dispositivos.

2.4 | Lenguaje unificado de modelado

UML (Unified Modeling Language) es un lenguaje de modelado visual que se usa para especificar, visualizar, construir, y documentar artefactos de un sistema de software. Permiten capturar decisiones y conocimientos sobre los sistemas a construir. Los modelos consisten en diagramas e imágenes. Sirven para captar con exactitud las partes más importantes del problema y la solución. Así como captar los aspectos importantes de lo que se está modelando, desde cierto punto de vista, y simplifica u omite el resto.

Capítulo 3

PLANEACIÓN Y DISEÑO DE SOFTWARE PARA EL SISTEMA DE MEDICIÓN

En este capítulo se presentan la descripción de las etapas principales de planeación y diseño del software para manejar electrómetro Keithley 6517B y la FUM Keithley 2410 desde computadora.

Este software forma parte de un sistema (Figura 3.1), por lo que interactúa con diversos dispositivos: fuente y unidad de medición Keithley 2410, electrómetro Keithley 6517B y la tarjeta KUSB-488B. Para el diseño del software se ordenó el sistema en componentes para identificar las relaciones y dependencias en el sistema.

- 1) **Tarjeta KUSB-488B.** La tarjeta KUSB-488B, es una tarjeta interface GPIB a USB, con una transferencia de datos IEEE de 1.5 MB/s a través del puerto USB. Soporta numerosos lenguajes de alto nivel y herramientas. Es compatible con USB 2.0.
- 2) **Fuente y unidad de medición Keithley 2410.** Cinco instrumentos en uno, fuente de voltaje, fuente de corriente, medidor de voltaje, medidor de corriente y ohmímetro.
- 3) **Electrómetro Keithley 6517B.** Es un instrumento de 5½ dígitos, simplifica la medición de altas resistencias y la medición de resistividad de los materiales aislantes. Las mediciones de corrientes muy bajas son rápidas y fácil de medir. Cuenta con una interfaz IEEE-488.
- 4) **Software.** El software tiene por objetivo adquirir datos del electrómetro Keithley 6517B y la fuente y unidad de medición Keithley 2410, para automatizar el sistema de mediciones de conductancia eléctrica de materiales contra temperatura.

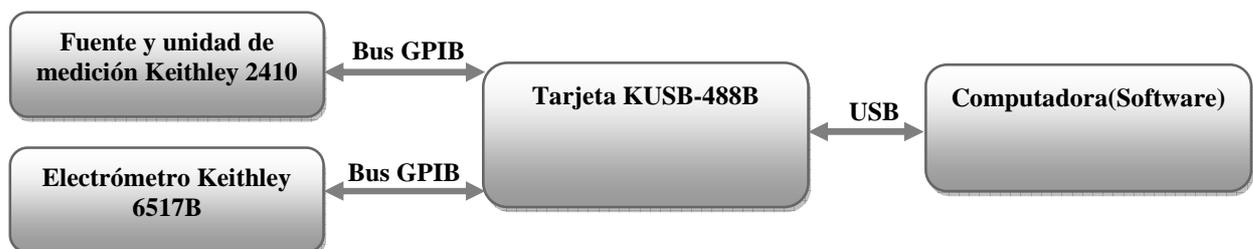


Figura 3.1 Diagrama del sistema de medición.

La comunicación entre la computadora y los equipos en el sistema de medición se realiza a través de la interfaz GPIB mediante la tarjeta KUSB-488B. La función del software es la de generar y enviar los comandos al electrómetro Keithley 6517B y la FUM Keithley 2410 para que trabajen simultáneamente. El electrómetro Keithley 6517B trabaja como medidor de conductancia eléctrica del material cerámico y la FUM Keithley 2410 como medidor de temperatura, los resultados de medición se representa en una gráfica que genera el software. Detalladamente la descripción de los componentes del sistema para medir los parámetros dieléctricos de materiales y diseño del software se presentan en los siguientes subcapítulos.

3.1|Componentes del sistema

Los equipos a utilizar para hacer mediciones de conductancia eléctrica de materiales cerámicos contra temperatura serán conectados como se muestra en la Figura 3.2.

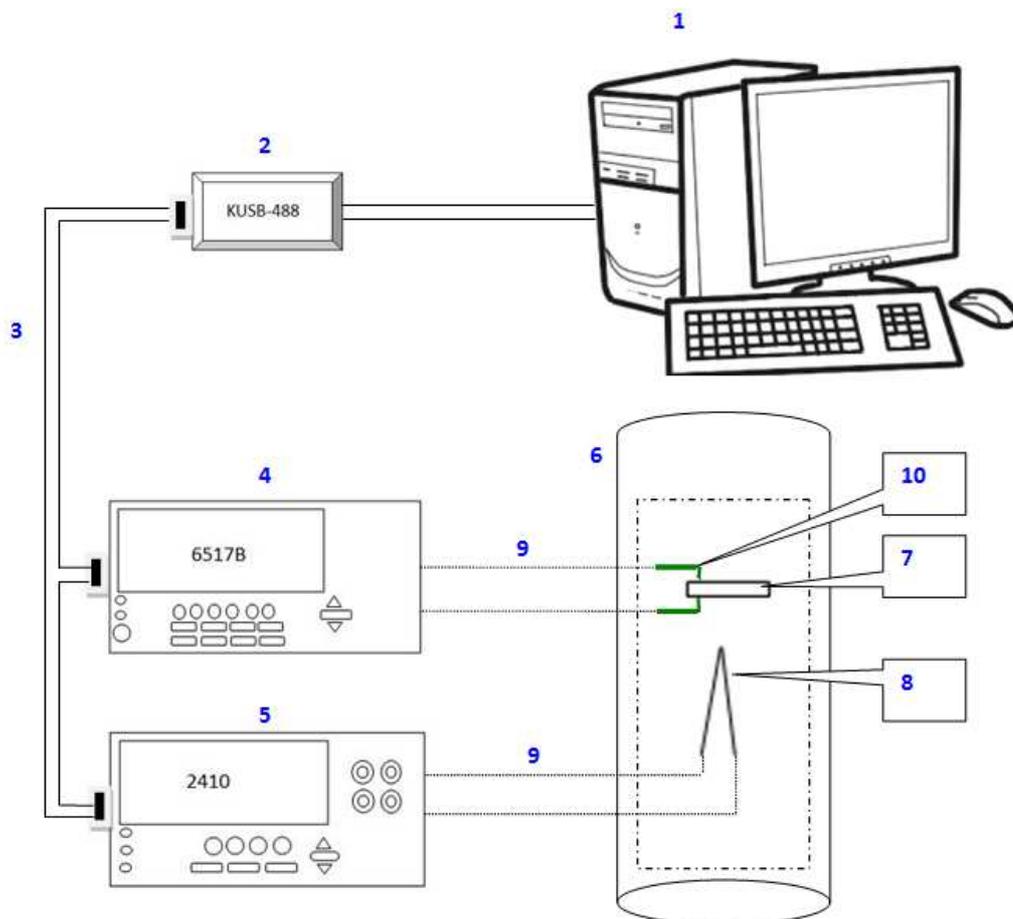
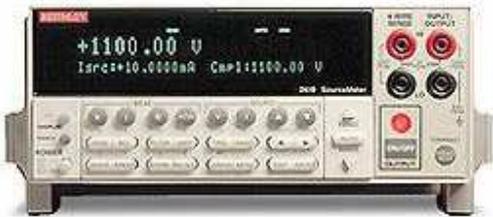


Figura 3.2. Sistema de medición: componentes y conexión (ver correspondencia en la tabla 3.1).

Tabla 3.1. Equipos utilizados en el sistema de medición.

<p>1. Computadora</p> 	<p>2. Tarjeta KUSB-488B</p> 
<p>3. 7007 cable GPIB</p> 	<p>4. Electrómetro Keithley 6517B</p> 
<p>5. FUM Keithley 2410</p> 	<p>6. Horno GVA 12/450</p> 
<p>7. Muestra de material cerámico</p> 	<p>8. Termopar (6517-TP)</p> 
<p>9. Cables de conexión</p> 	<p>10. Tenedor de prueba con termopar</p> 

3.2|Descripción general del proceso de medición

La comunicación entre la computadora y los equipos en el sistema de medición se realiza por la interfaz GPIB mediante la tarjeta KUSB-488B. Al inicio, el operador introduce los parámetros de medición (datos de experimentador, número de medición y de muestra, voltaje y corriente máxima a través de la muestra, temperatura inicial T_{start} , temperatura final T_{end} , el paso de medición por temperatura T_{step}) en la interfaz de usuario. La temperatura máxima del horno, velocidad de calentamiento y enfriamiento de muestra se programa por separado en la microcomputadora del horno.

Después del inicio de las mediciones, el software iniciará la fuente y unidad de medición Keithley 2410 para medir un voltaje que se genera por el termopar cada 15 segundos y recalcula la temperatura. Si la temperatura actual (T_{actual}) de la muestra en el horno es igual o mayor a la temperatura deseable, es decir cuando $T_{actual} \geq T_{anterior} + T_{step}$, el software inicia el electrómetro Keithley 6517B para medir la conductancia de la muestra. Si $T_{actual} < T_{anterior} + T_{step}$, el programa espera 15 segundos más y después inicia la FUM Keithley 2410 para estudiar la temperatura actual otra vez.

El registro de $\sigma(T)$ será realizado en la región donde se cumple la ley de Ohm. Si la corriente a través de la muestra sale de esta región (como el resultado de cambios de conducción de material con temperatura), el software va a disminuir o incrementar un voltaje aplicado para que los mediciones sean cumplidos en la región donde se cumple la ley de Ohm. Este región la indicamos en la interfaz de usuario con parámetros I_{min} e I_{max} basándose a la característica de corriente-voltaje medida antes del registro de $\sigma(T)$.

Los valores de conductancia de muestra y temperatura van a graficarse en la pantalla de la computadora en tiempo real. La curva correspondiente al calentamiento se presenta en color rojo. La curva que corresponde al enfriamiento va a presentarse en color azul. Además, en la pantalla de la computadora serán presentados el voltaje aplicado a la muestra, corriente y tiempo de medición.

El registro de $\sigma(T)$ se planea realizar en dos modos: 1) en el modo de “ida y vuelta” cuando las mediciones de conductancia se registran al calentamiento de la muestra desde T_{start} hasta T_{end} y después al enfriamiento hasta T_{start} ; 2) en el modo “ida” cuando las mediciones se hacen solo al calentamiento de la muestra, desde T_{start} hasta T_{end} .

Al terminar el registro de $\sigma(T)$, es decir cuando sea $T_{actual} \leq T_{end}$ (modo “ida y vuelta”) o $T_{actual} > T_{end}$ (modo “ida”), el software guardará la grafica de $\sigma(T)$ en un archivo (.jpg) y en archivo (.txt) con los datos completos de la medición. Después, el software enviará los equipos a modo de espera y apagará sus salidas.

Además, se planea realizar la posibilidad para que el operador pare las mediciones manualmente con el respaldo de datos en caso necesario.

3.3|Diseño del software

En el presente subcapítulo se muestran los requisitos funcionales y no funcionales del programa, las fases del diseño del programa, algoritmos, diagrama de flujo del programa y la interfaz de usuario.

3.3.1|Requisitos del software

Se obtuvo una lista de requisitos, los cuales fueron clasificados en requisitos funcionales y no funcionales del sistema del software: los requisitos funcionales son todos aquellos requisitos dados por el usuario para ejecutar el programa, mientras los requisitos no funcionales, son las restricciones que el usuario pidió para la seguridad, precisión y manejo con el sistema de medición conductancia eléctrica de materiales cerámicos contra temperatura $\sigma(T)$.

Tabla 3.2 Requisitos funcionales del software.

Requisitos funcionales	Tipo de requisito	Descripción
	Comunicar el electrómetro Keithley 6517B y la FUM Keithley 2410 con la computadora.	El programa debe establecer una comunicación entre la computadora y el electrómetro Keithley 6517B y la FUM Keithley 2410, a través de la tarjeta KUSB-488B.
	Requerir los parámetros de la señal.	El usuario debe configurar la temperatura inicial T_{star} , temperatura final T_{end} y el paso de medición por temperatura T_{step} .
	Establecer el modo de registro de $\sigma(T)$	Mediante la interfaz gráfica el usuario podrá elegir la opción el registro de $\sigma(T)$ que se planea realizar en dos modos: 1) T_{star} hasta T_{end} , 2) T_{end} hasta T_{star} .
	Indicar la región donde se cumple la ley de Ohm, para el registro de $\sigma(T)$.	Esta región se debe de indicar en la interfaz del usuario con los parámetros I_{min} y I_{max} . También, indicar la magnitud de DC voltaje inicial que va a aplicarse a muestra; magnitud de este voltaje debe ser desde la región donde se cumple la ley de Ohm.
	Mediante una grafica se representa la $\sigma(T)$.	Se representa una grafica de la $\sigma(T)$ en el tiempo de su ejecución, mientras en pantalla se mostrará el voltaje aplicado a la muestra, corriente y el tiempo de la medición.
	Almacenar los datos	El programa debe guardar los datos de la medición en un archivo (.txt), y en un archivo (.jpg) la grafica generada de la $\sigma(T)$.

Tabla 3.3 Requisitos no funcionales del software.

Requisitos no funcionales	Tipo de requisito	Descripción
	No aceptar parámetros de la medición fuera de rango	El programa debe identificar cuándo los valores dados por el usuario no son correctos y mandar un mensaje de error.
	No dejar algún valor de voltaje en las terminales de los instrumentos al terminar la medición.	El programa debe proteger a la muestra sujeta a investigación, al usuario, electrómetro Keithley 6517B y FUM Keithley 2410. Por lo tanto el software regresa a los equipos en el modo inicial (antes de medición) y apaga sus salidas.
	Verificar el equipo	El usuario tiene como responsabilidad cuidar los equipos y estar pendiente de las mediciones, por lo tanto debe verificar el equipo antes de iniciar la medición.

Requerimientos de interfaz de usuario

- La información mostrada en el software deberá ser escrita en su totalidad en idioma inglés, ya que gran parte de los investigadores de la UTM son de procedencia extranjera.
- Todo el texto del software deberá ser escrito con letra mediana o grande para que sea fácilmente visible para los investigadores de edad avanzada y problemas de visión.
- Los colores deberán ser claros y que no lastimen a la visión o impidan la correcta visibilidad de los resultados y/o de la información necesaria para la consulta de ayuda.
- Cada uno de los títulos y nombres de botones deberán ser claros y precisos para evitar una confusión.

En la interfaz de bienvenida al software se muestra:

- Nombre y logo de la universidad
- Nombre del desarrollador del software

Interfaz de ayuda:

- Conexión del electrómetro Keithley 6517B.
- Eliminación de ruido en la corriente.
- Conexión del termopar a la fuente y unidad de medición Keithley 2410.
- Opción de regresar y seguir (Back y Next).

Interfaz para solicitar los datos para realizar el experimento:

Datos generales:

- Experimentador
- Número de muestra
- Número de medición
- Comentarios

Temperatura

- Temperatura inicial (T_{start}), temperatura final (T_{end}).
- Paso de temperatura (T_s).
- Modo de medición de temperatura: temperatura inicial a temperatura final (T_{start} to T_{end}) y de temperatura inicial a temperatura final y a temperatura inicial.

Medición para Keithley 6517B

- Parámetros de DC voltaje, límite del voltaje, corriente máxima y corriente mínima que pertenece a la región de Ohm.
- Botón de ayuda, verificación de datos, botón de guardar, editar, regresar y siguiente.

Gráfica

- Mostrar en pantalla la temperatura, conductancia, DC voltaje y tiempo de
- Medición.
- Botones de empezar y parar.

3.3.2|Plataforma de desarrollo del software

Para desarrollar el software de adquisición de datos del electrómetro Keithley 6517B y la fuente y unidad de medición Keithley 2410, se selecciono como lenguaje de programación C++ utilizando el entorno de desarrollo integrado Microsoft Visual Studio. Se optó trabajar con este lenguaje de programación C++ y entorno de desarrollo por las siguientes ventajas:

1. La compañía fabricante Keithley proporciona ejemplos para realizar la conexión con el equipo configurar el envío y recepción de datos y sugiere el uso del lenguaje C++.
2. Es uno de los lenguajes de programación más usados actualmente.
3. La programación se realiza en alto nivel pero con la posibilidad de tener un mayor control de la aplicación y un mejor rendimiento.

3.3.3|Modelo prescriptivo de proceso

Los modelos prescriptivos de proceso se propusieron originalmente para ordenar el caos del desarrollo de software. Los modelos son “prescriptivos” porque prescriben n 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 de cascada, por lo tanto, el proceso empleado para el diseño e implementación del programa se apego lo más posible a las fases del modelo prescriptivo (Figura 3.5).

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

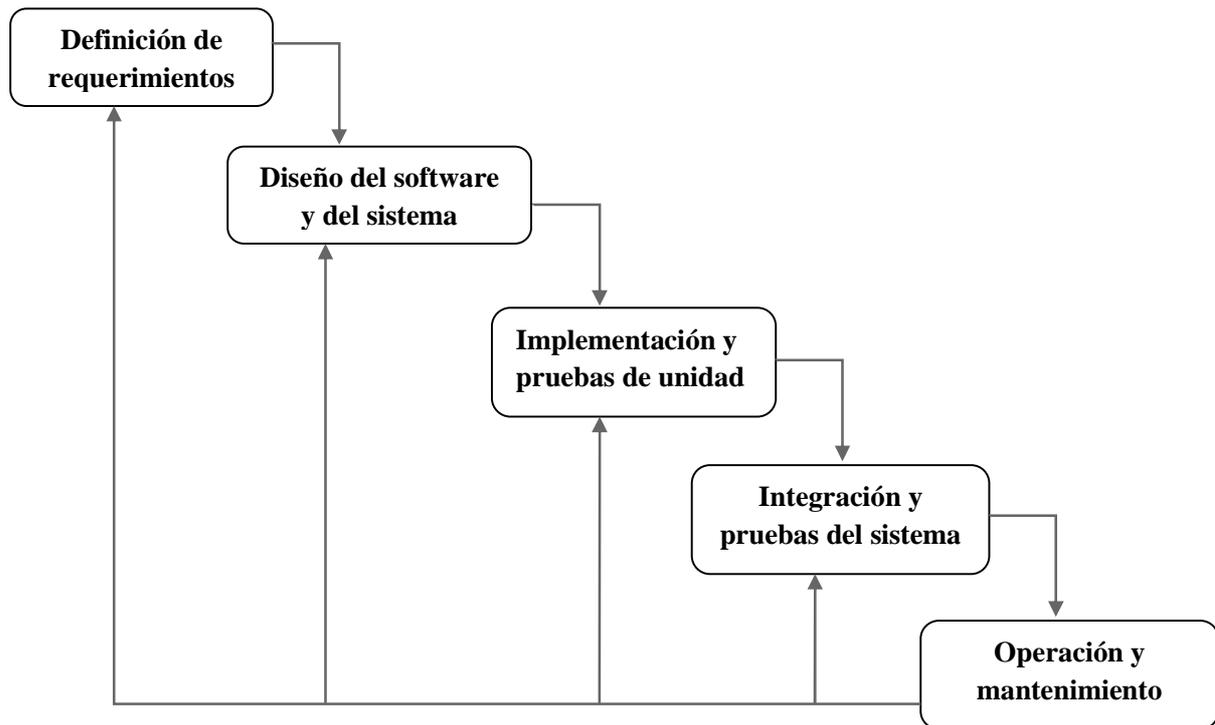


Figura 3.3 Fases del modelo en cascada.

3.3.4|Diseño modular del software

El programa para la configuración del electrómetro Keithley 6517B y la FUM Keithley 2410, 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 electrómetro Keithley 6517B y FUM Keithley 2410.

A continuación se especificará la función que desempeñan los módulos del programa y la relación que existe entre ellos. El diagrama de flujo del software se presenta en la Figura.3.4.

Módulo de entrada de datos: para obtener los datos del usuario se generan menús, que solicitan información para realizar la medición, ésta es:

1. Nombre del experimentador

2. Número de medición
3. Número de muestra
4. Comentarios
5. Temperatura inicial T_{star} .
6. Temperatura final T_{end} .
7. El paso de temperatura T_s .
8. Modo de registro de $\sigma(T)$, desde T_{star} hasta T_{end} , o desde T_{end} hasta T_{star} .
9. Parámetros de entrada para el electrómetro Keithley 6517 B: voltaje y límite del voltaje.
10. Región donde se cumple la región de Ohm, pide al usuario los valores de I_{min} y I_{max} .

Los valores introducidos por el usuario para la configuración del electrómetro Keithley 6517B deben ser correctos para que el programa continúe.

Módulo de verificación de datos: el bloque de verificación de datos es un resumen de los datos proporcionados por el usuario para realizar la medición. Se han de mostrar los valores configurados anteriormente. También se puede reconfigurar un valor o parámetro de la medición.

Módulo de construcción y envío de los comandos para el electrómetro Keithley 6517B y la FUM Keithley 2410: se encarga de construir los para el electrómetro Keithley 6517B de acuerdo a la configuración de la medición hecha por el usuario.

Módulo de medición de temperatura con la FUM Keithley 2410 y medición de conductancia de la muestra con Keithley 6517B: una vez que la FUM Keithley 2410 y el electrómetro Keithley 6517B estén configurados de acuerdo al bloque de construcción y envío de comandos, el electrómetro Keithley 6517B y la FUM Keithley 2410 realiza la medición.

Módulo de autocorrección de voltaje generado por Keithley 6517B: este modulo se ejecuta cuando la corriente actual (I) es mayor a la corriente máxima permitida (I_{max}) o menor a la corriente mínima permitida (I_{min}). En este modulo se hace una ajuste del voltaje para que $I_{min} \leq I \leq I_{max}$.

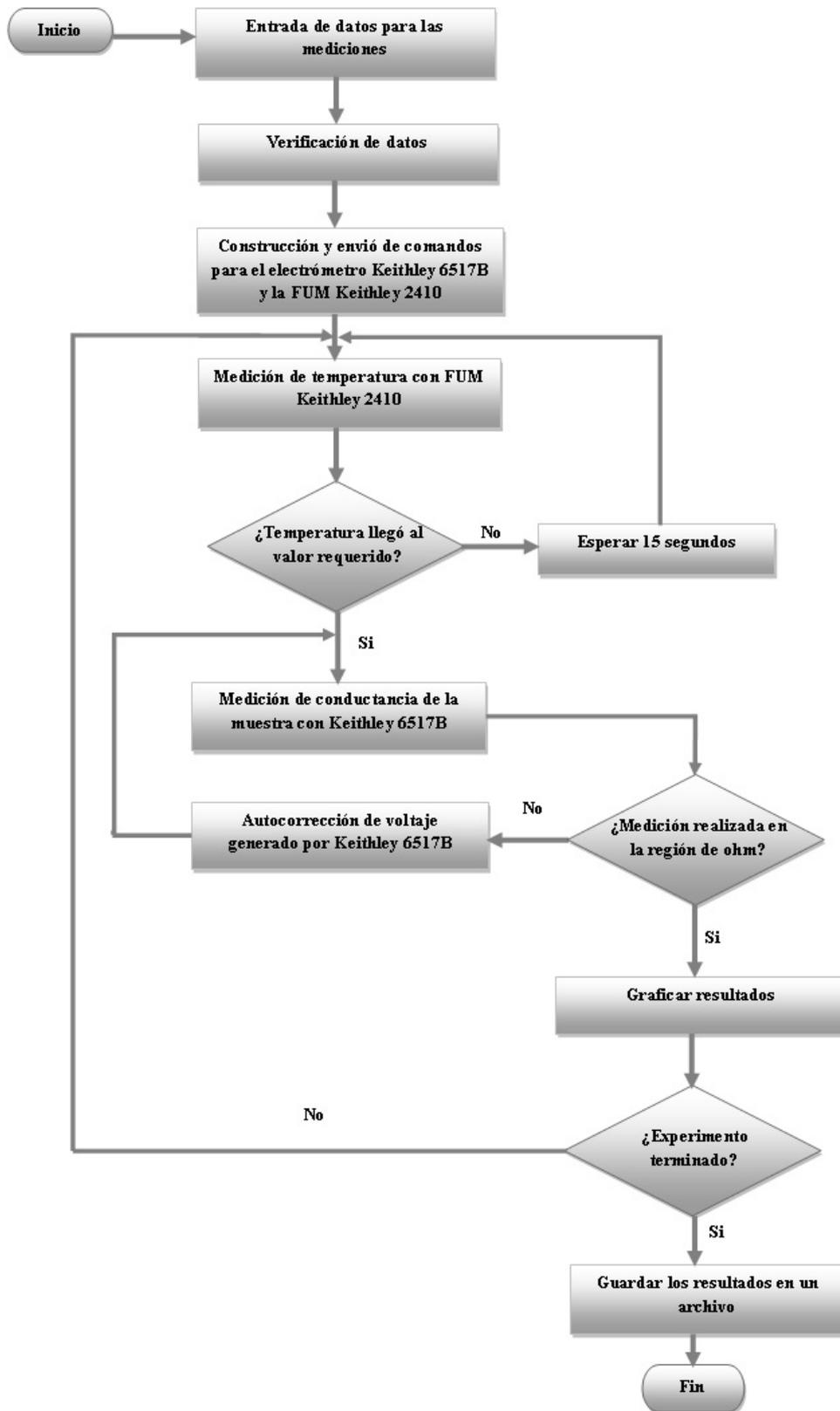


Figura 3.4 Diagrama de flujo del software para medición de conductancia eléctrica contra temperatura.

Módulo de graficar resultados. Este módulo es para graficar el resultado de la medición en tiempo de ejecución en la pantalla de computadora.

Módulo de guardar los resultados en un archivo: este bloque guarda los valores obtenidos de la medición (resultados del bloque Medición) en un archivo (.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 Origin (herramienta de análisis de datos).

El software para la adquisición de datos del electrómetro Keithley 6517B y la FUM Keithley 2410, está diseñado para ser:

- Entendible: el software debe ser una herramienta de medición intuitiva al usuario.
- Sencillo: la información se presenta a través de una interfaz amigable al usuario.
- Rápido: las operaciones se llevan a cabo en pocas ventanas.
- Interfaz gráfica: con ayuda de una interfaz del usuario se presentan las opciones para hacer más amigable el entorno del sistema.

Algunos de los aspectos más importantes del sistema son:

- Presenta una GUI amigable.
- El sistema trabaja con dos instrumentos, los cuales deben estar sincronizados.
- El sistema cuenta con ayuda para el usuario.

3.3.5]Modelado de casos de uso

Una vez obtenidos los requerimientos del sistema, se realizó el modelado de casos de uso. Dicho modelado se utilizó para mejorar la comprensión de los requerimientos del sistema. Para los presentes casos de uso, el actor será el experimentador quien da inicio al proceso de medición. A continuación se presentan los casos de uso (Figura 3.5) medir conductancia eléctrica (Tabla 3.4), medir temperatura, ayuda y graficar.

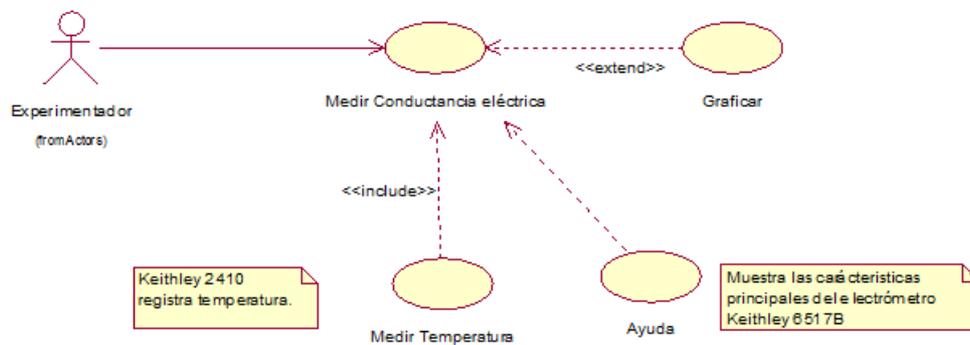


Figura 3.5 Diagrama de caso de usos del sistema de medición.

Caso de uso “Medir conductancia eléctrica”.

Este caso de uso, inicia cuando el experimentador decide ingresar al sistema de medición, se considera de tipo primario y esencial debido a que sin este inicio no se puede empezar con las mediciones, este caso de uso (Tabla 3.4) describe el flujo de datos que presenta el experimentador y el software de manera general del proceso de medición de conductancia eléctrica contra temperatura.

Tabla 3.4 Flujo de datos del caso de uso medir conductancia eléctrica.

Acción del actor	Respuestas del sistema
1. El actor entra al sistema.	
	2. El sistema muestra una interfaz de bienvenida (interfaz principal).
3. El actor da clic en “Temperature Dependence of Conductivity in Semiconductors”	
	4. El sistema muestra una interfaz nueva, la cual presenta pasos para la conexión del Electrómetro Keithley 6517B, la eliminación de ruido en la corriente y como conectar la FUM Keithley 2410 con el termopar.
5. El actor da clic en “Next” para iniciar a introducir los parámetros de medición.	
	6. El sistema carga valores por default para cada uno de los parámetros y opciones del formulario. La interfaz mostrada requiere datos del experimento, parámetros de temperatura y de Keithley 6517B.
7. El actor da clic en el botón “Save” para guardar los valores de los parámetros que introdujo en el sistema.	
	8. El sistema valida que los datos introducidos se encuentren dentro del rango permitido por la FUM 2410 y Keithley 6517B. El sistema crea un archivo (.txt) y muestra al usuario el nombre y la ubicación del archivo.
9. El actor confirma que sus datos sean correctos y da clic en el botón	

“Next”.	10. El sistema verifica que el actor haya confirmado los datos para la medición y el sistema lleva a la siguiente interfaz para el modo gráfico y realizar la medición.
Flujos alternativo y excepciones: Que los datos introducidos sean incorrectos.	

Caso de uso “Medir temperatura”

El caso de uso medir temperatura inicia cuando el actor introduce los parámetros de medición de temperatura. Este caso de uso se considera de tipo primario para continuar con el proceso de medición. En la siguiente tabla se presenta los flujos de eventos básicos.

Tabla 3.5 Flujo de datos del caso de uso medir temperatura.

Acción del actor	Respuestas del sistema
	1. El sistema carga por default los valores de los parámetros de temperatura.
2. El actor introduce los valores de temperatura inicial, temperatura final (Tstart y Tend), el paso de temperatura (Step of temperature) y elige el modo de tratamiento térmico.	3. El sistema valida que los datos introducidos se encuentren dentro del rango permitido por la FUM 2410.
	4. El sistema inicia la FUM Keithley 2410, para medir el registro de la temperatura cada 30 s.
	5. El sistema manda el comando al electrómetro Keithley 6517B para realizar la medición de conductancia de la muestra
Flujos alternativo y excepciones: Que los datos introducidos sean incorrectos.	

Caso de uso “Ayuda”

El caso de uso ayuda (Tabla 3.6) comienza cuando el experimentador desea consultar las características principales de Keithley 6517B para programar correctamente los parámetros de medición. Este caso de uso se considera de tipo secundario porque la solicitud de ayuda no afecta el funcionamiento del sistema.

Tabla 3.6 Flujo de eventos del caso de uso ayuda.

Acción del actor	Respuestas del sistema
1. El actor decide obtener ayuda dando clic en el botón “Help”.	2. El software muestra una interfaz nueva referente a las características principales del electrómetro Keithley 6517B.
3. El actor cierra la ventana de ayuda para seguir con la configuración del electrómetro Keithley 6517B en la interfaz principal.	

Caso de uso “Graficar”

El caso de uso graficar (Tabla 3.8) inicia, cuando el experimentador decide que debe empezar el registro de $\sigma(T)$, con los parámetros que ya se han introducido y validados en los casos de uso (tabla 3.5).

Tabla 3.7 Flujo de eventos de caso de uso graficar.

Acción del actor	Respuestas del sistema
1. El actor inicia dando clic en el botón “Start” de la interfaz donde se graficaran los resultados de la medición.	
	2. El sistema se conecta con la FUM Keithley 2410 y Keithley 6517B, envía los valores y parámetros para la medición.
	3. El sistema recoge los datos que envía la FUM Keithley 2410 al software y del electrómetro Keithley 6517B, con ello realiza las operaciones necesarias para los cálculos para la graficación de los resultados.
	4. El sistema dibuja en la pantalla bidimensional pintando cada punto como resultado de un segmento de medición en color rojo o color azul.
	5. El sistema muestra en tiempo real los valores resultantes de la medición: voltaje aplicado a la muestra, corriente y tiempo de medición.
	6. El sistema guarda la impresión de pantalla en un archivo (.jpg).
	7. El software envía a los equipos en modo de espera y apaga sus salidas.
Flujos alternativo y excepciones: Que el actor decida parar las mediciones.	

Capítulo 4

PRUEBAS

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas realizadas para el sistema de medición basado en electrómetro Keithley 6517B y la FUM Keithley 2410 administrados por el software elaborado. El objetivo de estas pruebas fue verificar que el funcionamiento del software elaborado y el trabajo del sistema de medición sean correctos, los resultados de medición son reproducibles y corresponden a los esperados. Usando los resultados de las pruebas fueron corregidos errores en el software, fueron optimizados los algoritmos de mediciones y funcionamiento del programa.

Para verificar que el sistema de medición funcione correctamente fueron hechas las siguientes pruebas.

Prueba 1

Medición de resistores comerciales de 10 Ohm, 10 KOhm, 100kOhm, 1 MOhm y 100 MOhm con tolerancia 5% al temperatura ambiente. En todos los casos fueron obtenidos los valores de conductancia que corresponden a los dados por el fabricante con tolerancia 5%.

Prueba 2

Para verificar que los datos de medición hechos por el sistema son reproducibles fue registrada sucesivamente 2 veces la conductancia σ contra temperatura T para cerámica de $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SrO}$ al aumento y a la disminución de la temperatura. Los resultados de experimento son presentados en la Figura 4.1 es posible ver que las curvas de $\sigma(T)$ obtenidos en 2 diferentes mediciones coinciden. Así, el sistema de medición da los datos reproducibles. El carácter de la curva $\sigma(T)$ corresponde a la típica para este material.

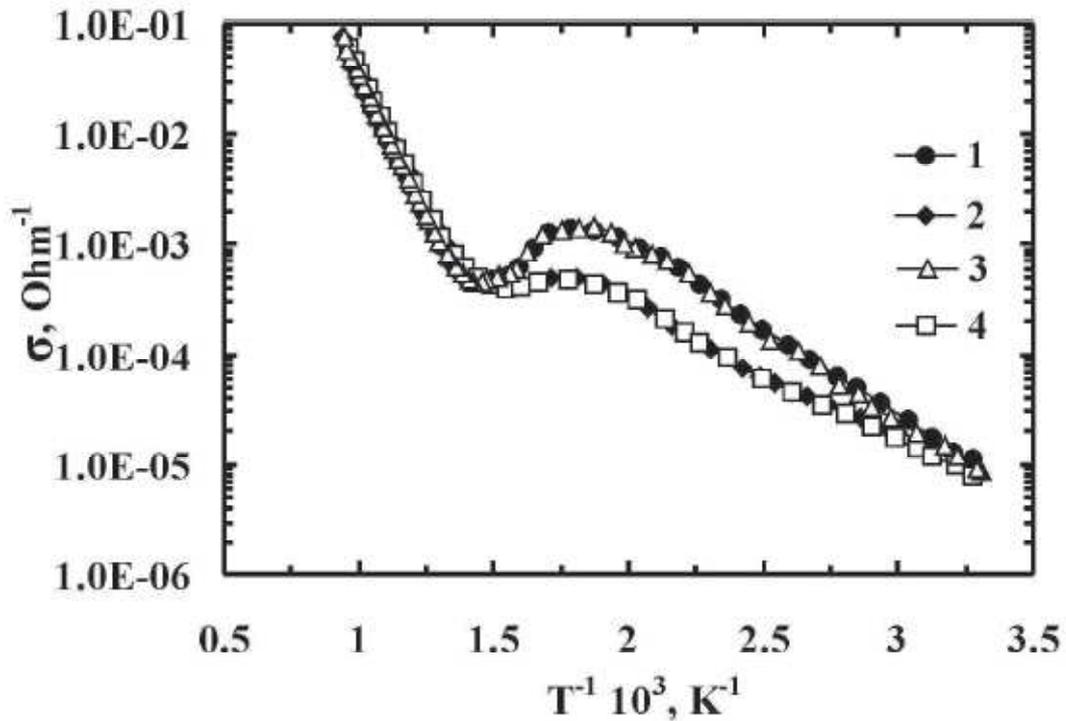


Figura 4.1 La dependencia de conductancia eléctrica contra temperatura para la muestra de cerámica $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SrO}$ registrada en dos consecuentes mediciones al calentamiento (curva 1 y 3) y al enfriamiento (curvas 2 y 4) de material.

Prueba 3

Para verificar que el sistema de medición funciona correctamente al registrar la dependencia de $\sigma(T)$ para materiales que tienen conductividades que varían en grande rango, fueron hechos pruebas con cerámica $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SrO-ZrO}_2$ con diferente contenido de ZrO . Los resultados están presentados en la Figura 4.2. Es posible ver que el sistema de medición administrada por el software elaborado puede registrar con éxito la dependencia de $\sigma(T)$ para materiales cuya conductancia varía desde $10 \text{ Ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ hasta $10^{-6} \text{ Ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$.

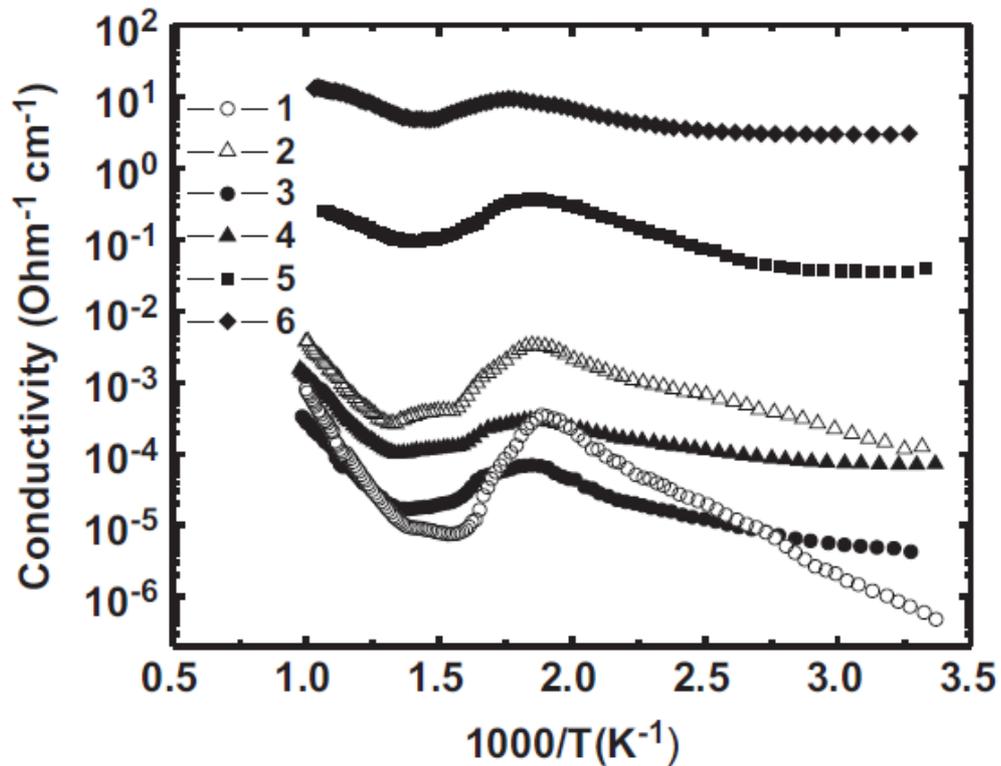


Figura 4.2 La dependencia de conductancia eléctrica contra temperatura para la muestra de cerámica $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SrO-ZrO}$ con diferente contenido de ZrO que resulta a diferente conductividad de material.

Así, el software elaborado puede administrar con éxito el electrómetro Keithley 6517B y la fuente y unidad de medición Keithley 2410 en mediciones de conductancia eléctrica de materiales cerámicos contra temperatura. El sistema de medición controlado por la computadora a través del software obtenido funciona correctamente.

Capítulo 5

RESULTADOS

En este capítulo se presentan y se describen los resultados principales que fueron obtenidos durante el cumplimiento del proyecto de tesis. De acuerdo a las metas descritas en el capítulo 1:

1. El resultado principal que fue obtenido es un software para la adquisición de datos del electrómetro Keithley 6517B y la fuente y unidad de medición Keithley 2410 en mediciones de conductancia eléctrica de materiales cerámicos contra temperatura. El sistema de medición obtenido contiene los siguientes elementos principales indicados en la Figura 5.1:

1. Electrómetro Keithley 6517B.
2. FUM Keithley 2410.
3. Horno GVA 12/450.
4. Tenedor de muestra con termopar.
5. Computadora con el software desarrollado.

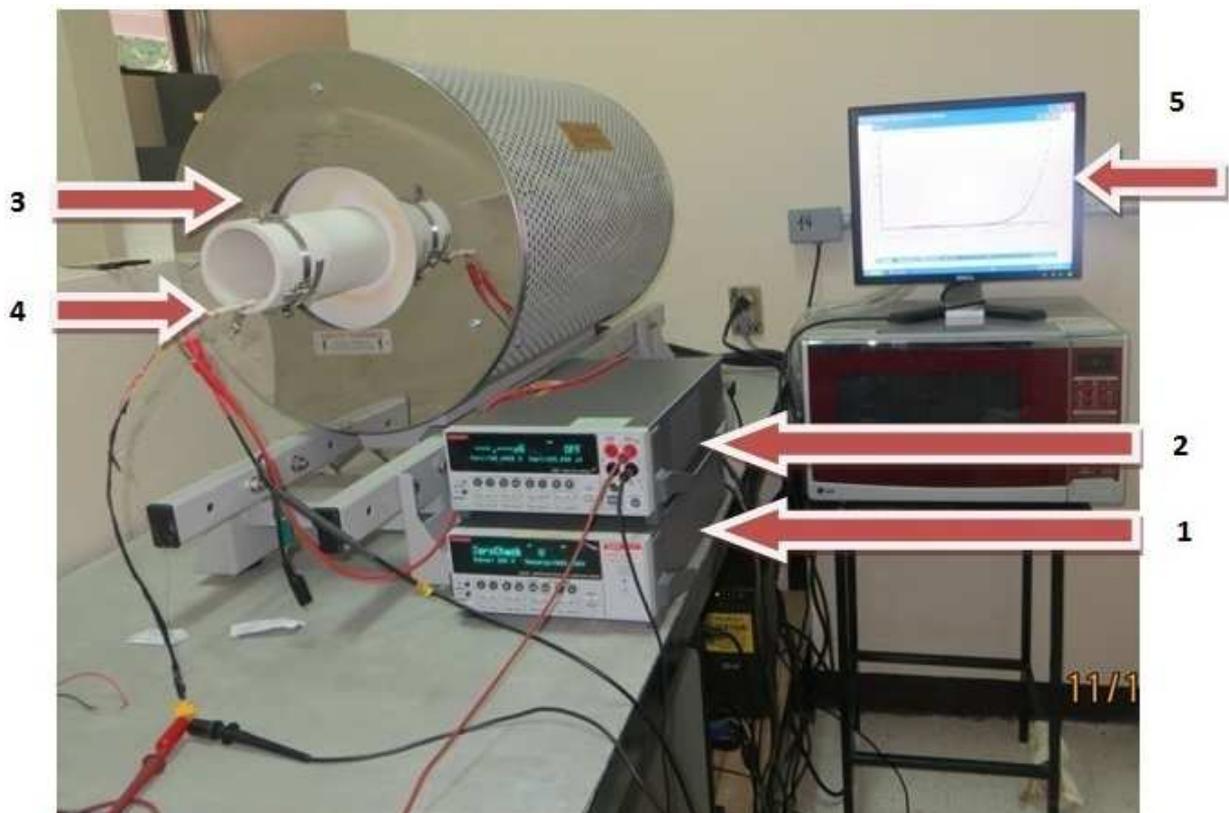


Figura 5.1 Sistema de medición: electrómetro Keithley 6517B (1), FUM Keithley 2410 (2), horno GVA 127/450 (3), tenedor de muestra con el termopar (4), computadora con el software (5).

El electrómetro Keithley 6517B y la FUM Keithley 2410 son controlados y configurados de forma remota a través de la tarjeta KUSB-488B.

2. El uso de este software permite automatizar el proceso de registro de la conductancia eléctrica de materiales a diferentes temperaturas. El sistema realiza el experimento que dura alrededor de 10 a 12 horas de forma automática sin necesidad de la presencia del operador.

3. El software permite reducir el tiempo de medición. Por ejemplo, si registra la conductividad de la muestra en 300 puntos, el tiempo de medición disminuye aproximadamente 10 minutos suponiendo que el sistema mide durante 1 s y el operador necesita 10 s.

Experimento	Tiempo del experimento
Manual	1 hora
Software	45 minutos

Las mediciones se realizan de forma manual como se describe a continuación:

1. Obtener la dependencia de corriente contra voltaje, $I(U)$.
2. Escoger los parámetros de medición:
 - a) voltaje que sea aplicado a la muestra (basándose a la $I(U)$ dependencia), “DC voltaje”.
 - b) valores de corriente (I_{max} y I_{min}) que corresponden a la región de Ohm.
 - c) El rango de temperatura (T_{start} y T_{end}) donde va a registrarse la dependencia de conductancia contra temperatura, $G(T)$.
 - d) La velocidad del calentamiento, T_s .
3. Programar los equipos:
 - a) Horno.
 - b) Electrómetro Keithley 6517B para trabajar en modo de fuente de voltaje y medidor de corriente.
 - c) FUM Keithley 2410 para trabajar en el modo de medidor de voltaje. Mide el voltaje que aparece en el termopar.
4. Inicio del experimento:

- a) Medir el voltaje que aparece en el termopar con la FUM Keithley 2410. Usando las tablas podemos recalculamos este voltaje a la temperatura.
 - b) Medir la corriente a través de la muestra con el electrómetro Keithley 6517B. Después se puede recalculamos la conductancia de la muestra (programado en 3). $G=I/U$.
 - c) Subir la temperatura de la muestra (calentamiento del horno). Cuando la temperatura de la muestra llega al valor deseable (lo controlamos con la FUM Keithley 2410), hace las mediciones de corriente otra vez con electrómetro Keithley 6517B.
5. Controlar que las mediciones se encuentren en la región de Ohm cambiando el voltaje aplicado a la muestra que da el electrómetro Keithley 6517B.

El proceso de medición que realiza el operador con el software utiliza el mismo proceso de medición al que se hace de forma manual, el resultado principal del uso del software es que no es necesaria la presencia del operador durante el experimento.

4. Durante el experimento el software permite proteger las muestras y equipos contra el mal uso, apagando sus salidas al terminar el experimento.

Capítulo 6

CONCLUSIONES

1. Se elaboró un software para la programación y adquisición de datos del electrómetro Keithley 6517B y la FUM Keithley 2410 en mediciones de conductancia eléctrica de materiales cerámicos contra temperatura.
2. Usando el software desarrollado, fue obtenido el sistema de medición en base del electrómetro Keithley 6517B y la unidad y fuente de medición Keithley 2410 para el registro de la dependencia de conductancia de muestras contra temperatura sin la participación del operador. El tiempo para realizar el experimento disminuye a 15 minutos aproximadamente, comparado a una hora de experimento de manera manual. Los datos de la medición de conductancia y temperatura se presentan en forma de una grafica en tiempo real a la pantalla de la computadora y se guardan en el disco duro en forma electrónica para su siguiente tratamiento en software especializado como Origin, Matlab.
3. El funcionamiento de software fue verificado en la práctica, mediante el registro de los parámetros eléctricos de los dispositivos comerciales y muestras de varios cerámicos fabricados en el laboratorio de la UTM.
4. El sistema de medición obtenido puede ser utilizado para investigaciones de materiales con diferentes propiedades desde temperatura ambiente hasta 1000C.
5. El trabajo de tesis desarrollado puede evolucionar dando paso a los siguientes trabajos:
 - Realizar la administración de horno desde la computadora.
 - Considerar la posibilidad del uso otros equipos con interfaz GPIB en mediciones de conductancia eléctrica de muestras contra temperatura.

Bibliografía

- [1] M. Peiteado, Varistores cerámicos basados en óxido de cinc, Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio, 44, 2, 77-87 (2005).
- [2]. J. G. Bednorz, K. A. Mueller, Possible high TCU superconductivity in the Ba-La-Cu-O system, Z. Phys., B64, 2, 189-193 (1986).
- [3]. M. Matsuoka, Non-Ohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics, Jap. J. Appl. Phys., 10, 736-746 (1971).
- [4]. M. G. Harwood, P. Popper, D. F. Rushman, Curie Point of Barium Titanate, Nature, 160, 58-59 (1947).
- [5]. I. A. Myasnikov, V. Ya. Sukharev, L. Yu. Kupriyanov, S. A. Zavjalov, Semiconductor sensors in physico-chemical studies; Nauka: Moscow, pp 87-88 (1991).
- [6]. R. van de Krol, H. L. Tuller, Electroceramics—the role of interfaces, Solid State Ionics, 150, 167- 179 (2002).
- [7]. D. R. Clarke, Varistor Ceramics, J. Am. Ceram. Soc., 82, 485-502 (1999).
- [8]. G. D. Mahan, L. M. Levinson, H. R. Philipp, Theory of conduction in ZnO varistors, J. Appl. Phys., 50, 2799-2812 (1979).
- [9] M.A Ramírez, P.R. Bueno, J.A. Valera, M.A. Márquez, Cerámica y vidrio, Varistor ZnO, 347-351 (2005).
- [10] Supresores de sobrevoltajes transitorios [Internet]. Recuperado www.mty.itesm.mx. [Consulta 11 de octubre de 2013].
- [11] Lecciones de electrónica [Internet].Varistores. (2005). www.ifent.org. [Consulta 11 de octubre de 2013].
- [12] P. Erhart, A. Klein, R. G. Egdell, K. Albe, Band structure of indium oxide: Indirect versus direct band gap, Phys. Rev. B: Condens. Matter.,75, 1-183 (2007).
- [13] K. G. Gopchandran, B. Joseph, J. T. Abraham, P. Koshy, V. K. Vaidyan, The preparation of transparent electrically conducting indium oxide-films by reactive vacuum evaporation, Vacuum, 48, 547-550 (1997).
- [14] E. Savarimuthu, K. C. Lalithambikar, A. Moses Ezhilraj, L. C. Nehru, S. Ramamurthy, A. Thayumanavane, C. Sanjeeviraj, M. Jayachandran, Synthesis and materials properties of transparent conducting In₂O₃ films prepared by sol-gel-spin coating technique, Journal of Physics and Chemistry of Solids, 68, 1380-1389 (2007).

- [15] A. B. Glot, S. V. Mazurik, B. J. Jones, A. N. Bondarchuk, R. Bulpett, N. Verma, Current limiting effect and negative differential resistance in indium oxide based ceramics, *Journal of the European Ceramic Society*, 30, 539-544 (2010).
- [16] A. Bondarchuk, A. Glot, G. Behr, J. Werner, Current saturation in indium oxide based ceramics, *Eur. Phys. J: Appl. Phys.*, 39, 211-217 (2007).
- [17] Tooley, M. Winder, S. “Newnes Data Communications Pocket Book”, British Library, 2002.
- [18] Riu, P. Rosell, F. Ramon, J. “Sistemas de instrumentación”, Ediciones UPC, 1995.
- [19] E. Mandado, P. Merino, A. Lago, Instrumentación electrónica, Marcombo; Edición: 1 (1995).
- [20] Final test, Keithley 6571 B Electrómetro/Medidor de alta resistencia [Internet]. Recuperado www.finaltest.com.mx. [Consulta 8 de noviembre de 2013].
- [21] Keithley Instruments Inc. (2013), [Internet] Model 2410 High-voltage SourcerMeter w/ Measurements up to 1100V and 1A, 20W power output. Recuperado www.keithley.com. [Consulta 8 de noviembre de 2013].
- [22] Carbolite. GVA single zone versatile configuration tube furnaces. [Internet] Recuperado www.carbolite.com. [Consulta 10 de noviembre de 2013].
- [23] Keithley. (2013). IEE-488(GPIB) InterfaceSolutions [Internet]. Recuperado www.keitheley.com. [Consulta 11 de noviembre de 2013].
- [24] Ingeniería de software: un enfoque practico, 7ma edición- Rogers Pressman.
- [25] Helfrick, A. y Cooper, W.: Instrumentación Electrónica Moderna y Técnicas de Medición.
- [26] Reference manual Keithley, “Model 6517B”, 6517B-901-01 Rev. B, June 2009.
- [27] Service Manual, “Model 24101100V SourceMeter®”, Second Printing, July 1998 Document Number: 2410-902-01 Rev. B.
- [28] Reference manual, “Model KPCI-488LPA GPIB Controller Interface Card and Model KUSB-488B USB to GPIB Converter”, KI488-901-01 Rev. A / March 2010.
- [29] Joyanes, L.: Programación Orientada a Objetos. McGraw-Hill, segunda edición, 1998.
- [30] Rumbaugh, J.: Modelado y diseño orientado a objetos. Prentice Hall, 1999.

Anexo A | Manual de usuario

La interfaz es considerada un elemento esencial del sistema de medición cuyo objetivo consiste en obtener información del usuario para configurar la fuente y unidad de medición Keithley 2410 y el electrómetro Keithley 6517B. En el software, el proceso de programación para realizar las mediciones es a través de la interfaz del usuario, dividida en los siguientes pasos.

Paso 1 | Step 1

Al ejecutar el software aparece la ventana indicada en la Figura A.1. En esta ventana se muestra la información del elaborador y contacto de la universidad. Además esta ventana contiene el botón “*Temperature dependence of conductivity in semiconductors*” al dar clic se presenta la siguiente ventana mostrada en la Figura A.2.

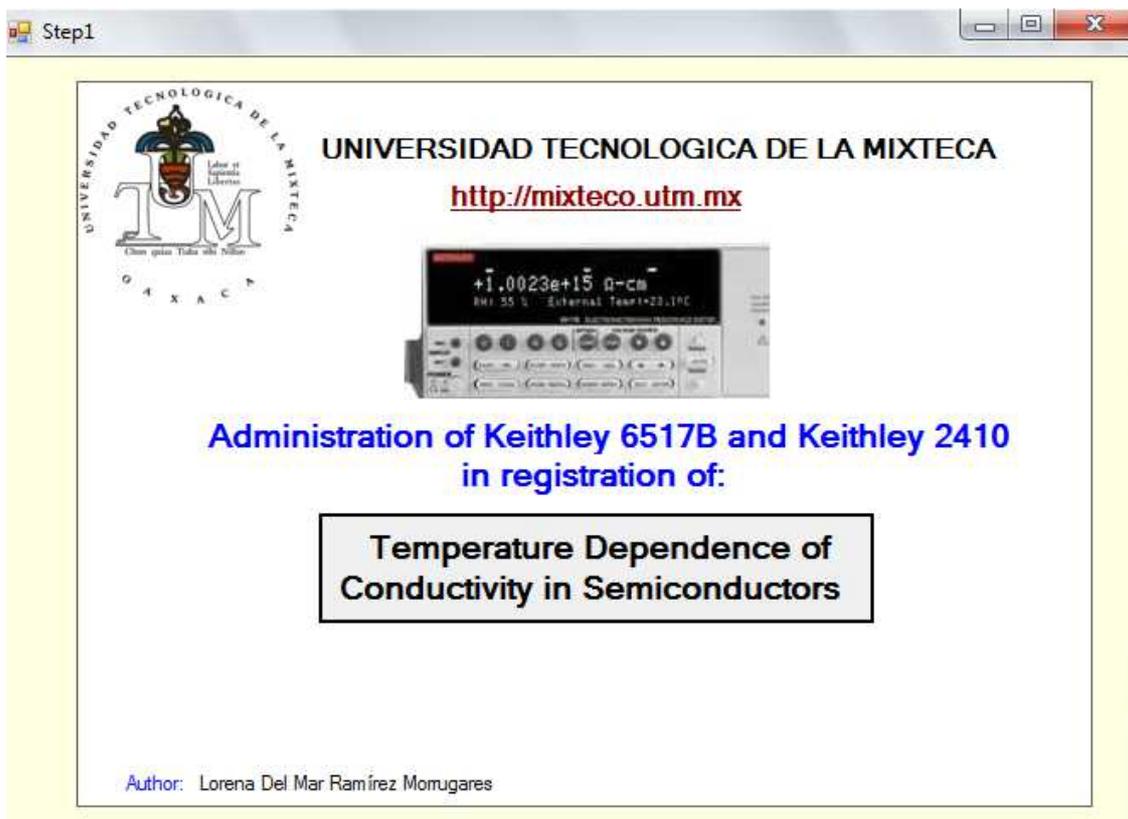


Figura A.1 Interfaz de bienvenida al software.

Paso 2|Step 2

En esta etapa se muestra como es necesario conectar el electrómetro Keithley 6517B al tenedor de muestra que va a estar en el horno con el dispositivo bajo prueba (ver Step 2.1 “*Connection of Keithley 6517B*” en la Figura A.2). Al hacer clic a Step 2.1. Aparece el archivo en formato pdf referente al manual donde detalladamente se especifica como hacer la eliminación de ruido en la corriente “*Canceling leakage current in a test fixture*”.

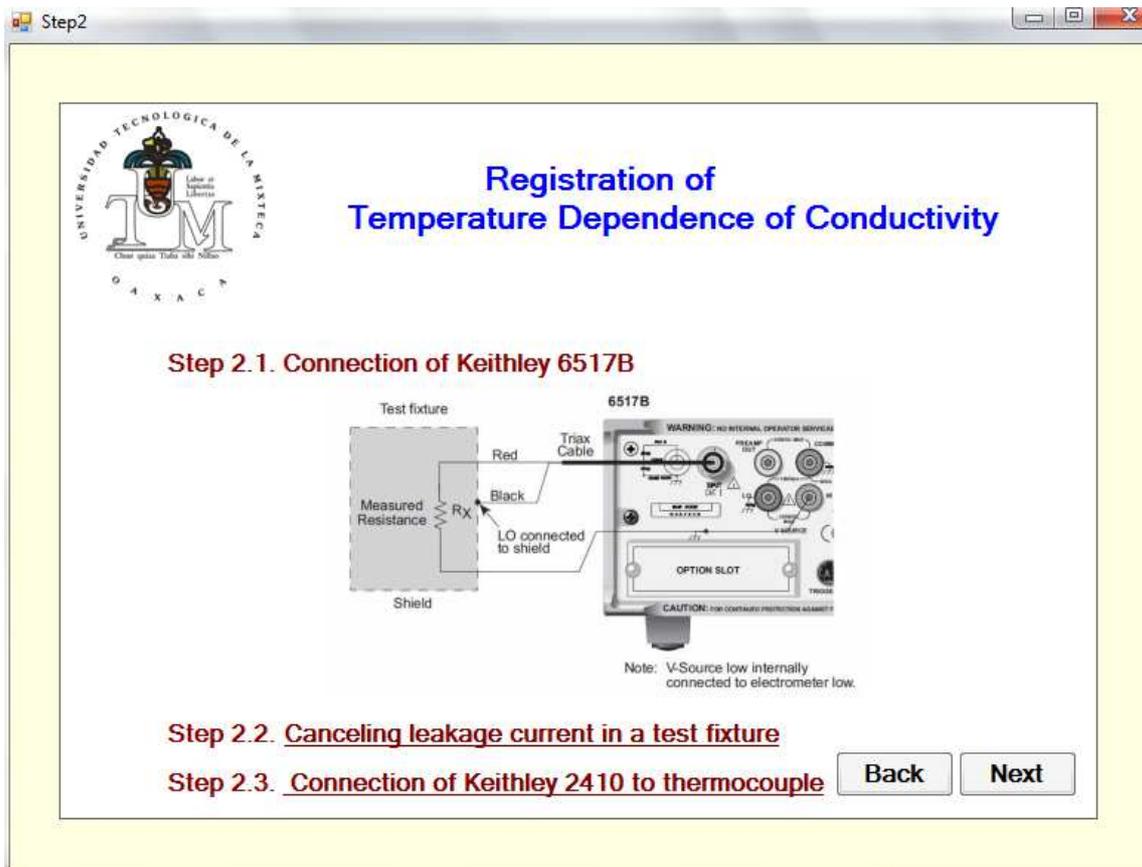


Figura A.2 Interfaz del software que muestra al usuario la conexión de Keithley 6517B, eliminación de ruido en la corriente y conexión de Keithley 2410 al termopar.

Además en esta ventana, si es necesario, es posible obtener información de cómo conectar la fuente y unidad de medición Keithley 2410 al termopar (Step 2.3, ver Figura A.2). En la parte inferior, se muestran dos botones “Back” y “Next” lo cuales permiten continuar el proceso de programación o regresar a la etapa anterior (Paso1).

Paso 3|Step 3

En esta etapa (Figura A.3) el usuario introducirá los siguientes datos: Nombre de experimentador, número de muestra, comentarios. Estos datos sirven también para formar el nombre de archivo (.txt) y (.jpg) que permite al usuario encontrar de manera fácil el archivo deseado, el menú para introducir estos datos se encuentran en el grupo “*General data*”.

Resistive Impedance vs. Temperature

1. General data

Experimentator: amírez Morrugares
Sample #: 1
Measurement #: 1
Commentary: 1

2. Temperature

Initial temperature (Tstart, K): 290
Final temperature (Tend, K): 1000
Step of temperature (Ts, K): linear Ts: 3
Mode:
 from Tstart to Tend
 from Tstart to Tend and to Tsta

3. Keithley 6517B

DC voltage (V): 0.5
Limit of DC Voltage (V): 990
Bounds of Ohm region
Imax (A): 5.0e-6
Imin (A): 3.0e-7

Results of measuring will be saved to C:\\Results_Termo\\

Help I am sure that all data is right Save Back

Figura A.3 Menú para solicitar los datos para la configuración de Keithley 2410 y Keithley 6517B.

En el grupo “*Temperature*” (Figura A.3) se indica la temperatura inicial (Tstart) y la temperatura final (Tend) para muestras que dan el rango de temperatura que le interesa al operador para hacer mediciones eléctricas. El controlador del horno se programa en tal

manera que el horno llegue a la temperatura final programada en la interfaz. También en esta etapa, el usuario puede indicar el modo de tratamiento térmico. Si ha elegido el modo “*from Tstart to Tend*”, el software termina las mediciones cuando la temperatura llega al valor de la temperatura final y guarda los resultados de las mediciones en los archivos apropiados. Si ha elegido el modo “*from Tstart to Tend and to Tstart*”, el software termina las mediciones solo cuando la temperatura baja hasta el valor de la temperatura igual a la temperatura inicial. El paso de temperatura se programa con una frecuencia de puntos experimentales, es decir, la medición de conductancia de la muestra se va a cumplir solo si la temperatura aumenta o disminuye a una magnitud que es igual o mayor que un valor de paso indicado. Durante la ejecución del software, cada 15 segundos la unidad y fuente de medición Keithley 2410 registra la temperatura y si la temperatura cambia al paso, el software envía el comando de hacer la medición de conductancia de la muestra con el electrómetro Keithley 6517B. Si la temperatura no cambia lo suficiente, el software esperará los siguientes 30 segundos.

En el grupo “*Keithley 6517B*” el usuario está programando el valor de DC voltaje que se aplica a la muestra, el límite de DC voltaje indica los bordes de región de Ohm (Figura A.3). Durante el registro de conductancia de materiales contra temperatura, Keithley 6517B está trabajando como fuente de voltaje y medidor de corriente. Para mediciones correctas, el voltaje aplicado y la corriente a través de la muestra deben estar en región donde se cumple la ley de Ohm. Pero al incremento de la temperatura, la conductancia de la muestra se cambia y puede tener los valores impredeciblemente. Si se mantiene el voltaje fijo, la corriente puede salir desde la región de Ohm. Para estar siempre en la región de Ohm, en el software se indican los valores de corrientes que corresponden a los bordes de la región de Ohm. El software está controlando la corriente a través de la muestra y si la corriente es menor que I_{min} o mayor que I_{max} , el comando para Keithley 6517B cambia el voltaje aplicado para que la corriente I siempre se encuentre como $I_{min} < I < I_{max}$. Valores de I_{max} y I_{min} los debe de indicar el usuario basándose en la dependencia de corriente contra voltaje para la muestra. Si es necesario, para el usuario hay posibilidad en esta etapa consultar las características principales de Keithley 6517B para programar correctamente los parámetros de medición. Para esto el usuario debe dar clic en el botón “*Help*”. También en el software está realizada la verificación automática de los parámetros de medición que

el usuario introduce. Si los parámetros de medición son incorrectos, aparece el aviso y se bloquea la posibilidad ir a la siguiente etapa.

Cuando el usuario ha terminado de introducir los datos y está seguro que los datos son correctos, puede marcar la casilla *“i am sure that all data is right”*, para guardar los datos el botón *“Save”* y al darle clic se activan los botones *“Edit”*, y *“Next”*. El botón *“Next”* lleva a usuario a la interfaz que grafica los resultados de medición.

Paso 4|Step 4

En esta etapa se muestra la interfaz para graficar el registro de $\sigma(T)$ el cual será realizado conforme a parámetros de medición programados en las etapas anteriores al presionar el botón *“Start”*. Después del inicio de medición se puede mostrar el botón *“Stop”* que permite parar las mediciones en cualquier momento y guardar los datos si esto es necesario.

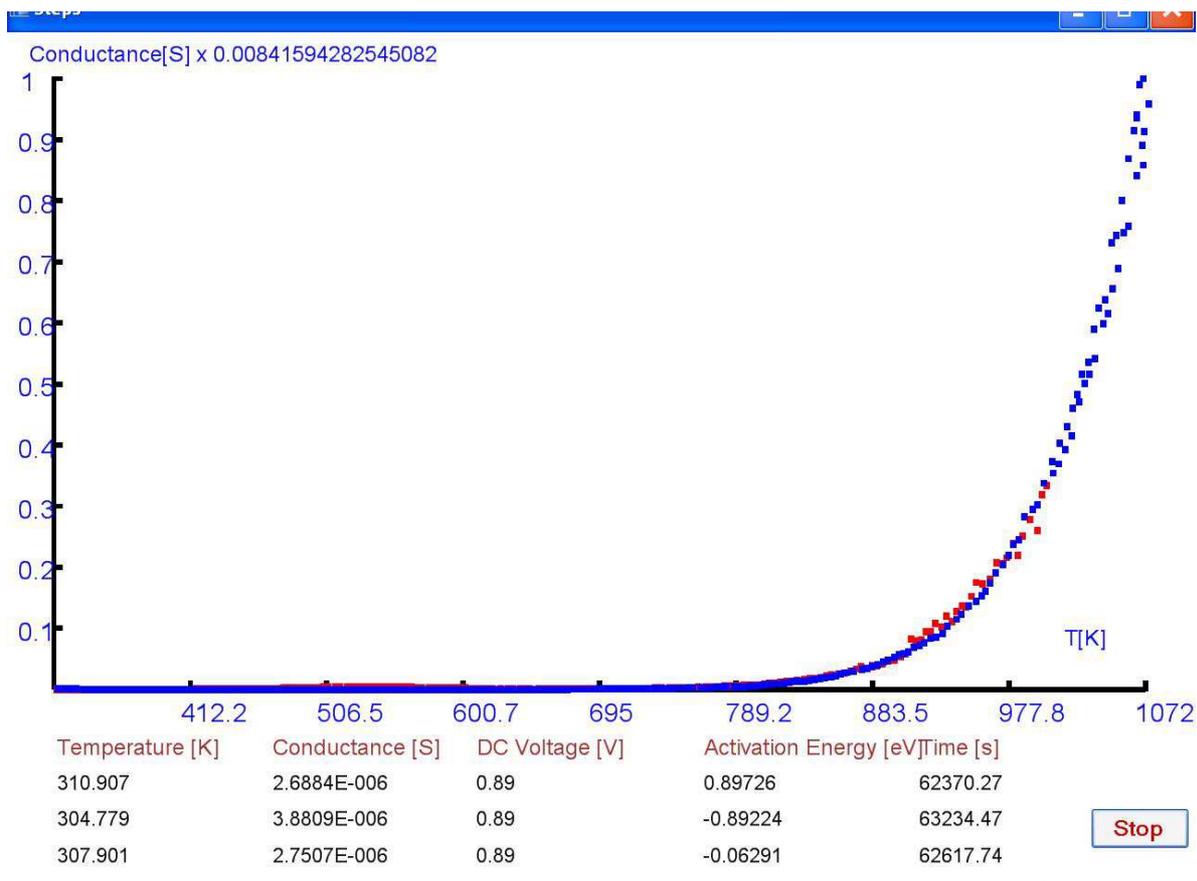


Figura A.4 Grafica de registro de conductancia eléctrica contra temperatura.

Los resultados de la medición aparecen como puntos de grafica y también está presentado como numero abajo del eje de la temperatura. Además, en la pantalla de la computadora serán presentados el voltaje aplicado a la muestra, corriente y tiempo de medición. La curva correspondiente al calentamiento se presenta en color rojo, la curva que corresponde al enfriamiento va a presentarse en color azul (Figura A.4).

Después de dar clic al botón “*Start*”, al inicio aparecen ejes con valores máximos de 10^{-19} S (conductancia) y 10^0 K (temperatura). Pero después de la primera medición de conductancia y temperatura, la escala de ejes va a cambiarse automáticamente para presentar los datos obtenidos. Por ejemplo, si los resultados de la medición son 3×10^{-3} S a 300K, el valor máximo por escala de conductancia estará establecido a 1×10^{-2} S y el valor máximo de escala de temperatura a 1000K. Esto permite graficar los resultados del experimento de manera cómoda para ser leída por el usuario. Durante el experimento, el software guarda los valores de conductancia y temperatura en un archivo (.txt) y después de finalizar las mediciones, se guarda la impresión de pantalla en un archivo (.jpg) y el software envía los equipos a modo de espera y apaga sus salidas.

Anexo B | Requerimientos mínimos del sistema

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

Requerimientos mínimos del hardware

- Espacio libre en disco duro para instalación 1GB.
- Disco duro de por lo menos 100GB
- Procesador a 2.4Ghz o superior
- 2 cables GPIB
 - 1 para conectar el electrómetro Keithley 6517B
 - 1 para conectar la fuente y unidad de medición Keithley 2410
- Lector de CD-DVD
- Teclado y mouse
- Puerto USB.

Requerimientos mínimos del software

Sistema operativo Microsoft Windows XP, también puede ser utilizado en otros sistemas más recientes pero la capacidad de procesamiento de la PC debe ser mayor.

- Drivers de comunicación para el módulo GPIB
- Framework 4.0
- Flash Player 10

Los usuarios deben tener conocimientos básicos en computación para hacer uso del sistema.