

**MONTAJE PARA MEDIR PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE OBLEAS  
SEMICONDUCTORAS A PARTIR DE LA TÉCNICA DE VAN DER PAUW A  
TEMPERATURA AMBIENTE**

**HELMER ANDRÉS ARENAS NAVAS  
EDWIN ARMANDO FLOREZ GAITAN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE FÍSICA  
BUCARAMANGA  
2019**

**MONTAJE PARA MEDIR PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE OBLEAS  
SEMICONDUCTORAS A PARTIR DE LA TÉCNICA DE VAN DER PAUW A  
TEMPERATURA AMBIENTE**

**HELMER ANDRÉS ARENAS NAVAS  
EDWIN ARMANDO FLOREZ GAITAN**

Trabajo de Pasantía de Investigación como requisito para optar al título de:  
**Físico**

Director:

**LINDA BERTEL GARAY, MSC en Química.**

Codirector:

**DAVID ALEJANDRO MIRANDA MERCADO, PHD en Química.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE FÍSICA  
BUCARAMANGA  
2019**

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	12
1. MARCO TEÓRICO.....	14
1.1 MATERIALES SEMICONDUCTORES .....	14
1.1.1 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA .....	14
1.2 MÉTODO DE VAN DER PAUW PARA LA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....	15
1.3 EQUIPOS DE MEDICIÓN.....	17
1.3.1 GPIB USB-HS .....	17
1.3.2 Nanovoltímetro.....	17
1.3.3 Sistema de conmutación.....	18
1.3.4 Picoamperímetro.....	18
1.3.5 Fuente de corriente AC/DC.....	19
1.3.6 Entorno de desarrollo.....	19
2. METODOLOGÍA.....	23
2.1 PRUEBAS PRELIMINARES.....	23
2.2 MONTAJE DE EQUIPOS PARA MEDIR RESISTIVIDAD A PARTIR DEL MÉTODO DE VAN DER PAUW.....	25
2.3 CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE LABVIEW .....	26
2.4 MEDICIÓN DE RESISTENCIA ELÉCTRICA PARA UN CIRCUITO DE PRUEBA USANDO EL MÉTODO DE VAN DER PAUW .....	27
2.5 MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LÁMINAS SEMICONDUCTORAS DE GASB:ND A TEMPERATURA AMBIENTE USANDO EL MÉTODO DE VAN DER PAUW .....	27

2.5.1	Ensamble de la lámina semiconductor al montaje .....	28
2.5.2	Verificación del comportamiento óhmico de la muestra .....	29
2.5.3	Medición de resistividad eléctrica.....	30
2.6	DOCUMENTACIÓN DEL PROCESO DE MONTAJE DE LOS EQUIPOS .....	30
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	31
3.1	PRUEBAS PRELIMINARES .....	31
3.2	CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE LABVIEW .....	35
3.3	MEDICIÓN DE RESISTENCIA ELÉCTRICA PARA UN CIRCUITO DE PRUEBA USANDO EL MÉTODO DE VAN DER PAUW .....	37
3.4	MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LÁMINAS SEMICONDUCTORAS DE GASB:ND A TEMPERATURA AMBIENTE USANDO EL MÉTODO DE VAN DER PAUW .....	38
4.	CONCLUSIONES.....	40
	BIBLIOGRAFÍA.....	41
	ANEXOS.....	43

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Muestra de forma arbitraria de espesor homogéneo. ....	15
Figura 2. Factor de corrección $f$ en función de $RMN$ , $OP/RNO$ , $MP$ . ....	16
Figura 3. GPIB USB-HS.....	17
Figura 4. Nanovoltímetro Keithley 2182A. ....	17
Figura 5. Sistema de conmutación Keithley 7001.....	18
Figura 6. Picoamperímetro Keithley 6485.....	18
Figura 7. Fuente de corriente AC/DC Keithley 6221. ....	19
Figura 8. Ventana del panel frontal y paleta de controles. ....	20
Figura 9. De izquierda a derecha: Controles e indicadores numéricos, booleanos y de cadena de caracteres.....	20
Figura 10. Ventana del diagrama de bloques y paleta de funciones.....	21
Figura 11. Circuito RC de prueba conectado en una protoboard.....	23
Figura 12. Montaje para el proceso de carga y descarga de un condensador: a. Gráfica. b. Real. ....	23
Figura 13. Montaje para medir resistividad eléctrica a partir del método de van der Pauw.....	25
Figura 14. Circuito de prueba, conectado en una protoboard, para verificar el correcto funcionamiento del sistema desarrollado. ....	25
Figura 15. Esquema de las configuraciones de medición por el método de van der Pauw.....	26
Figura 16. Montaje para medir resistencia eléctrica a un circuito de prueba a partir del método de van der Pauw. ....	27
Figura 17. Ubicación de las láminas semiconductoras de GaSb sobre un soporte de madera.....	28
Figura 18. Ubicación de los extremos de los alambres sobre la lámina. ....	28

Figura 19. Acoplamiento de los alambres a la lámina.....	29
Figura 20. Conexiones de los alambres con los equipos.....	29
Figura 21. VI asociado al multímetro a. Panel frontal. b. Diagrama de bloques. .....	31
Figura 22. Gráfica de diferencia de potencial $V$ vs. tiempo de descarga $t$ del capacitor. ....	33
Figura 23. Linealización de la gráfica de la <i>figura 22</i> . ....	33
Figura 24. VI asociado al nanovoltímetro a. Panel frontal. b. Diagrama de bloques. ....	34
Figura 25. VI asociado al picoamperímetro a. Panel frontal. b. Diagrama de bloques. ....	34
Figura 26. Icono de LabVIEW. ....	35
Figura 27. Pestaña de información del experimento. ....	36
Figura 28. Pestaña de configuración. ....	36
Figura 29. Pestaña de toma de datos. ....	37
Figura 30. Gráfica de corriente $I$ vs. diferencia de potencial $V$ para los contactos: <i>I. MN, OP. II. NO, PM.</i> ....	38
Figura 31. Gráfica de resistividad $\rho$ vs. corriente $I$ para los contactos: <i>I. MN, OP.</i> <i>II. NO, PM.</i> ....	39
Figura 32. Lámina con forma de semiplano infinito.....	44
Figura 33. Panel frontal del multímetro HP 3478A.....	50
Figura 34. Panel posterior del multímetro HP 3478A.....	51
Figura 35. Panel frontal del multímetro Keithley 196. ....	52
Figura 36. Panel posterior del multímetro Keithley 196. ....	52
Figura 37. Panel frontal del sistema de conmutación Keithley 7001.....	54
Figura 38. Panel posterior del sistema de conmutación Keithley 7001.....	54
Figura 39. Panel frontal de la fuente de corriente AC/DC Keithley 6221. ....	56

Figura 40. Panel posterior de la fuente de corriente AC/DC Keithley 6221. ....	56
Figura 41. Panel frontal del nanovoltímetro Keithley 2182A. ....	58
Figura 42. Panel posterior del nanovoltímetro Keithley 2182A. ....	59
Figura 43. Panel frontal del picoamperímetro Keithley 6485. ....	60
Figura 44. Panel posterior del picoamperímetro Keithley 6485. ....	61
Figura 45. Conexiones a la entrada IEEE-488 de cada equipo. ....	62
Figura 46. Conexiones de los equipos al sistema de conmutación Keithley 7001. .....	62
Figura 47. Pestaña de información del experimento. ....	65
Figura 48. Pestaña de configuración. ....	66
Figura 49. Pestaña de toma de datos. ....	67

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. TEOREMA DE VAN DER PAUW.....	43
ANEXO B. MANUAL.....	46

## RESUMEN

**TÍTULO:** MONTAJE PARA MEDIR PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE OBLEAS SEMICONDUCTORAS A PARTIR DE LA TÉCNICA DE VAN DER PAUW A TEMPERATURA AMBIENTE\*

**AUTORES:** HELMER ANDRÉS ARENAS NAVAS, EDWIN ARMANDO FLOREZ GAITAN\*\*

**PALABRAS CLAVE:** RESISTIVIDAD ELÉCTRICA, MOVILIDAD HALL, VAN DER PAUW, NANOVOLTIMETRO, PICOAMPERÍMETRO, KEITHLEY, LABVIEW.

**DESCRIPCIÓN:** La caracterización de nuevos materiales, y en particular, el estudio de las propiedades eléctricas de materiales semiconductores, representa un área de investigación muy activa, ya que facilita, entre muchas cosas, la fabricación de dispositivos optoelectrónicos –como detectores o células termofotovoltaicas, elaborados a partir de materiales como el Antimoniuro de Galio (GaSb)–.

En la presente pasantía de investigación se actualizó, complementó e implementó un sistema de medición de resistividad eléctrica y movilidad Hall –que incluye un montaje y un código, escrito en LabVIEW, que permite configurar y controlar los equipos necesarios para llevar a cabo la caracterización (fuente de corriente AC/DC, sistema de conmutación, nanovoltímetro y picoamperímetro)– de láminas semiconductoras a temperatura ambiente, a partir del método de van der Pauw. A fin de verificar el sistema de medición desarrollado, se realizaron pruebas preliminares con un circuito, que permitieron corroborar las medidas posteriormente tomadas con unas láminas semiconductoras de GaSb.

Como resultado de la pasantía de investigación se obtuvo que los valores adquiridos para cada medición concuerdan con los valores teóricos esperados, con lo cual se pudo concluir que, tanto el montaje como la configuración del software controlador desarrollado actúan como el sistema apropiado para realizar mediciones de las propiedades eléctricas deseadas.

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de ciencias. Escuela de Física. Director: MSc. Linda Bertel Garay. Codirector: PHD. David Alejandro Miranda Mercado.

## ABSTRACT

**TITLE:** ASSEMBLY FOR MEASURING ELECTRICAL PROPERTIES OF SEMICONDUCTOR WAFERS BASED ON THE VAN DER PAUW TECHNIQUE AT ROOM TEMPERATURE\*

**AUTHORS:** HELMER ANDRÉS ARENAS NAVAS, EDWIN ARMANDO FLOREZ GAITAN\*\*

**KEYWORDS:** ELECTRICAL RESISTIVITY, HALL MOBILITY, VAN DER PAUW, NANOVOLTMETER, PICOAMMETER, KEITHLEY, LABVIEW

**DESCRIPTION:** The characterization of new materials, in particular, the study of the electrical properties of semiconductor materials, represents a very active research area, since it facilitates, among many things, the manufacture of optoelectronic devices –such as detectors or thermophotovoltaic cells, elaborated from materials such as Gallium Antimonide (GaSb)–.

In the present research internship, a system for measuring electrical resistivity and Hall mobility – which includes an assembly and a code, written in LabVIEW, that allows to configure and control the equipment necessary to carry out the characterization (AC / DC current source, switching system, nanovoltmeter and picoammeter) of semiconductor sheets at room temperature was updated, complemented and implemented, based on the van der Pauw method. In order to verify the measurement system developed, preliminary tests were carried out with a circuit, which allowed to corroborate the measurements subsequently taken with GaSb semiconductor sheets.

As a result of the research internship, it was obtained that the values acquired for each measurement agree with the expected theoretical values, with which it could be concluded that both the assembly and the configuration of the developed controller software act as the appropriate system to perform measurements of the desired electrical properties.

\* Bachelor thesis.

\*\* Facultad de ciencias. Escuela de Física. Director: MSc. Linda Bertel Garay. Codirector: PHD. David Alejandro Miranda Mercado.

## INTRODUCCIÓN

La materia en estado sólido está formada por átomos empaquetados densamente por la fuerza de interacción nuclear fuerte entre ellos. Como resultado de tales interacciones, aparecen propiedades ópticas, térmicas, magnéticas y eléctricas en los sólidos. De acuerdo con sus propiedades eléctricas, la materia se clasifica en tres grandes grupos: conductores, semiconductores y aislantes. Estos materiales se diferencian entre sí principalmente por la magnitud de su resistividad eléctrica a una temperatura determinada. Los metales tienen resistividad eléctrica baja (entre  $10^{-6}$  y  $10^{-4} \Omega \cdot cm$ ), esto los hace buenos conductores; mientras que los aislantes son el grupo con mayor resistividad (entre  $10^{14}$  y  $10^{22} \Omega \cdot cm$ ), es decir, su facilidad para conducir corriente es muy baja. Los semiconductores se encuentran entre estos dos grupos, con resistividades entre  $10^{-2}$  y  $10^9 \Omega \cdot cm$  [11], lo que les confiere propiedades eléctricas propias –debidas a las impurezas, defectos en la red cristalina o a la excitación térmica– de gran interés y múltiples aplicaciones tecnológicas: desde la construcción de sistemas electrónicos integrados para computadoras, teléfonos celulares y cámaras digitales hasta instrumentación electrónica para diagnósticos médicos y monitoreo ambiental [13].

Actualmente existen diferentes métodos para la medición y determinación de propiedades eléctricas de muestras sólidas, entre ellas: radio frecuencias o la transmisión de microondas (los cuales no requieren conexiones eléctricas), el método a dos puntas, que utiliza un multímetro u óhmetro para medir resistencias; el método a cuatro puntas, que utiliza un voltímetro y un amperímetro para lograr mediciones más exactas de resistencias; y el método de van der Pauw, que utiliza cuatro electrodos ubicados en la periferia de la muestra para medir resistencias.

Debido a que la técnica de van der Pauw permite determinar la resistividad eléctrica de una muestra de forma arbitraria, fue la escogida, en la pasantía de investigación, para llevar a cabo la caracterización de los materiales semiconductores presentes en CIMBIOS, el cual contaba con las condiciones y equipos –adquiridos con proyecto Colciencias, con código interno 8820– necesarios para llevar a cabo las mediciones, pero estos equipos funcionaban de manera independiente y el Software de control escrito en LabVIEW no estaba actualizado para integrar todos los equipos.

En consecuencia, se llevó a cabo la puesta a punto del montaje para medir propiedades eléctricas de láminas semiconductoras a temperatura ambiente, a partir de la técnica de van der Pauw: En primer lugar, se realizaron unas pruebas preliminares a las mediciones de resistividad eléctrica. Posteriormente, se realizó el montaje integrado de los equipos (sistema de interruptores, fuente de alimentación de corriente AC/DC, nanovoltímetro y picoamperímetro) y se configuró el software para establecer un protocolo de medición. A continuación,

se midió la resistencia eléctrica en un circuito de prueba y la resistividad eléctrica en láminas semiconductoras de GaSb:Nd a temperatura ambiente. Por último, se elaboró un manual de instrucciones que detalló el proceso de instalación de los equipos y las condiciones de medición.

El trabajo de investigación se desarrolló de la siguiente manera: Las *secciones 1.1 y 1.2*, en el *capítulo 1*, comprenden una revisión general de los aspectos teóricos en los que se fundamenta el comportamiento y las características de los materiales semiconductores, así como algunas propiedades eléctricas y la teoría de medición de dichas propiedades, desarrollada por van der Pauw. A su vez, la *sección 1.3* realiza una explicación del software y los equipos necesarios para realizar las mediciones.

El *capítulo 2* describe los detalles de las etapas experimentales desarrolladas para la medición de resistividad eléctrica en láminas semiconductoras de GaSb:Nd a temperatura ambiente, usando el método de van der Pauw (desde las pruebas preliminares con circuitos, pasando por la configuración del software y el montaje, hasta las mediciones en las láminas semiconductoras).

El *capítulo 3* presenta los resultados de las etapas experimentales llevadas a cabo: en la *sección 3.1* se muestran las pruebas preliminares a las mediciones; en la *sección 3.2* se detalla la configuración del Software LabVIEW; en las *secciones 3.3 y 3.4* se presenta el proceso de medición de resistencia eléctrica para un circuito de prueba y de resistividad eléctrica para láminas semiconductoras de GaSb:Nd a temperatura ambiente, respectivamente, usando el método de van der Pauw.

Finalmente, en el *capítulo 4*, se dan las conclusiones de la pasantía de investigación.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 MATERIALES SEMICONDUCTORES

Los materiales semiconductores generalmente son clasificados por su resistividad eléctrica a temperatura ambiente, con valores que se encuentran en el rango entre los correspondiente a los metales y a los aislantes (entre  $10^{-2}$  y  $10^9 \Omega \cdot cm$ ), y dependen fuertemente de la temperatura [11].

**1.1.1 Resistividad eléctrica:** Al aplicar un campo eléctrico  $E$  al semiconductor, las partículas se mueven en la misma dirección, pero en sentido opuesto a dicho campo, con velocidad promedio, denominada velocidad de deriva,  $v_d$ . Para los electrones, ésta viene dada por

$$v_d = \mu_n E$$

donde la movilidad de los electrones,  $\mu_n$ , caracteriza la facilidad que tiene el electrón para moverse a través del material semiconductor, cuando es aplicado el campo  $E$ .

Si  $n$  es la concentración de electrones, cada uno con masa  $m$  y carga  $q$ , moviéndose, con velocidad de deriva  $v_d$ , en un semiconductor de sección transversal constante, la densidad de corriente se puede expresar [3]

$$J_n = nqv_d = nq\mu_n E.$$

De manera similar, para los huecos, se tiene

$$J_p = pqv_d = pq\mu_p E,$$

donde  $\mu_p$  y  $p$  es la movilidad y la concentración de huecos, respectivamente. Por lo tanto, la densidad de corriente total es

$$J = J_n + J_p = (nq\mu_n + pq\mu_p)E.$$

El término en paréntesis es conocido como conductividad eléctrica  $\sigma$ . Su recíproco, la resistividad eléctrica, cuantifica qué tan fuerte un material cualquiera

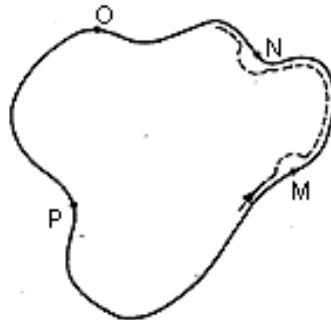
se opone al flujo de corriente eléctrica. Para un material semiconductor se define como [15]

$$\rho = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)}$$

## 1.2 MÉTODO DE VAN DER PAUW PARA LA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

La técnica de van der Pauw es un método para la determinación de resistividad eléctrica de muestras planas de un material conductor –o semiconductor– de forma arbitraria (*figura 1*), en el cual las mediciones requieren cuatro (4) electrodos conectados en sus bordes. Para usar esta técnica se deben satisfacer las siguientes condiciones: la muestra debe ser aproximadamente bidimensional (espesor mucho menor que el largo y el ancho de la muestra), homogénea y preferiblemente simétrica, debe estar libre de huecos, y los contactos deben estar arbitrariamente ubicados en la periferia de la muestra, deben ser los más pequeños posibles y deben presentar un comportamiento Óhmico [14].

Figura 1. Muestra de forma arbitraria de espesor homogéneo.



Fuente: Tomado y adaptado de A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape [16].

La *figura 1* representa una muestra de forma arbitraria con cuatro pequeños electrodos  $M$ ,  $N$ ,  $O$  y  $P$  conectados en los bordes de la muestra, de manera que las condiciones anteriormente mencionadas sean satisfechas. Si se aplica una corriente  $I_{MN}$  entre los contactos  $M$  y  $N$  –la corriente entra a la muestra a través del contacto  $M$  y la deja a través del contacto  $N$ – y se mide la diferencia de potencial  $V_{OP}$  ( $V_P - V_O$ ) entre los contactos  $O$  y  $P$ , se define la resistencia  $R_{MN,OP}$ , encontrada a partir de la ley de Ohm, como la diferencia de potencial  $V_{OP}$  por unidad de corriente  $I_{MN}$ . De manera similar, se define la resistencia  $R_{NO,PM}$ .

Van der Pauw demostró que existe una relación entre  $R_{MN,OP}$  y  $R_{NO,PM}$  [16, 17], que permite hacer las mediciones sin conocer el patrón de corriente en la muestra (ver *anexo A*)

$$e^{-\frac{\pi d}{\rho} R_{MN,OP}} + e^{-\frac{\pi d}{\rho} R_{NO,PM}} = 1, \quad (1)$$

donde  $d$  es el espesor y  $\rho$  es la resistividad del material. Si el espesor y las resistencias son conocidas, la solución de la *ecuación (1)* puede ser escrita en la forma

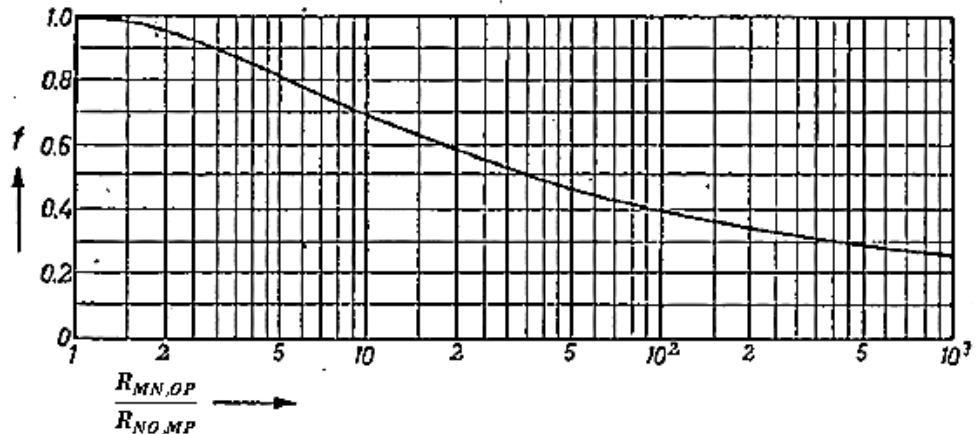
$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \frac{R_{MN,OP} + R_{NO,MP}}{2} f \left( \frac{R_{MN,OP}}{R_{NO,MP}} \right), \quad (2)$$

donde  $f$  es un factor de corrección, debido al grosor y a la asimetría de la muestra, que depende de la razón  $R_{AB,CD}/R_{BC,DA}$  y satisface la relación:

$$\frac{\frac{R_{MN,OP}}{R_{NO,MP}} - 1}{\frac{R_{MN,OP}}{R_{NO,MP}} + 1} = f \cosh^{-1} \left( \frac{e^{\frac{\ln 2}{2}}}{2} \right). \quad (3)$$

La *figura 2* representa gráficamente a  $f$  como función de  $R_{MN,OP}/R_{NO,MP}$  [16].

Figura 2. Factor de corrección  $f$  en función de  $R_{MN,OP}/R_{NO,MP}$ .



Fuente: Tomado y adaptado de A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape [16].



**1.3.3 Sistema de conmutación:** El sistema de conmutación (*figura 5*) es un dispositivo que permite la integración y automatización de sistemas de prueba en una sola caja. A su vez, establece un proceso de conmutación entre la fuente de corriente y los demás equipos de medición. Las capacidades de conmutación del modelo Keithley 7001 van desde los nanovoltios hasta **250 VCA** y **350 VCD** y desde los femtoamperios hasta **1 A** [9].

Figura 5. Sistema de conmutación Keithley 7001.



Fuente: Autores.

**1.3.4 Picoamperímetro:** El picoamperímetro es un instrumento que mide corrientes eléctricas muy bajas, usualmente desde el rango de picoamperios (en el límite inferior) hasta el rango de miliamperios (en el límite superior). En particular, el modelo Keithley 6485 (*figura 6*) puede medir corrientes desde **20 fA** hasta **21 mA** [5] y presenta ocho rangos de medición que van desde **20 mA** hasta **2 nA** [8]. Al igual que el nanovoltímetro, cuenta con un puerto de comunicación (IEEE488 o GPIB).

Figura 6. Picoamperímetro Keithley 6485.



Fuente: Autores.

**1.3.5 Fuente de corriente AC/DC:** Las fuentes de corriente AC/DC son generadores de corriente estática constante que tienen la posibilidad de entregar tanto AC como DC, proporcionando corrientes muy estables, con formas de onda sinusoidales o arbitrarias [18]. El modelo Keithley 6221 (figura 7) presenta nueve rangos de medición de corriente que van desde  $100 \text{ fA}$  hasta  $105 \text{ mA}$ , voltajes que van desde  $0.1 \text{ V}$  hasta  $105 \text{ V}$  con pasos de  $10 \text{ mV}$  y potencia de salida máxima de  $11 \text{ W}$  [7].

Figura 7. Fuente de corriente AC/DC Keithley 6221.

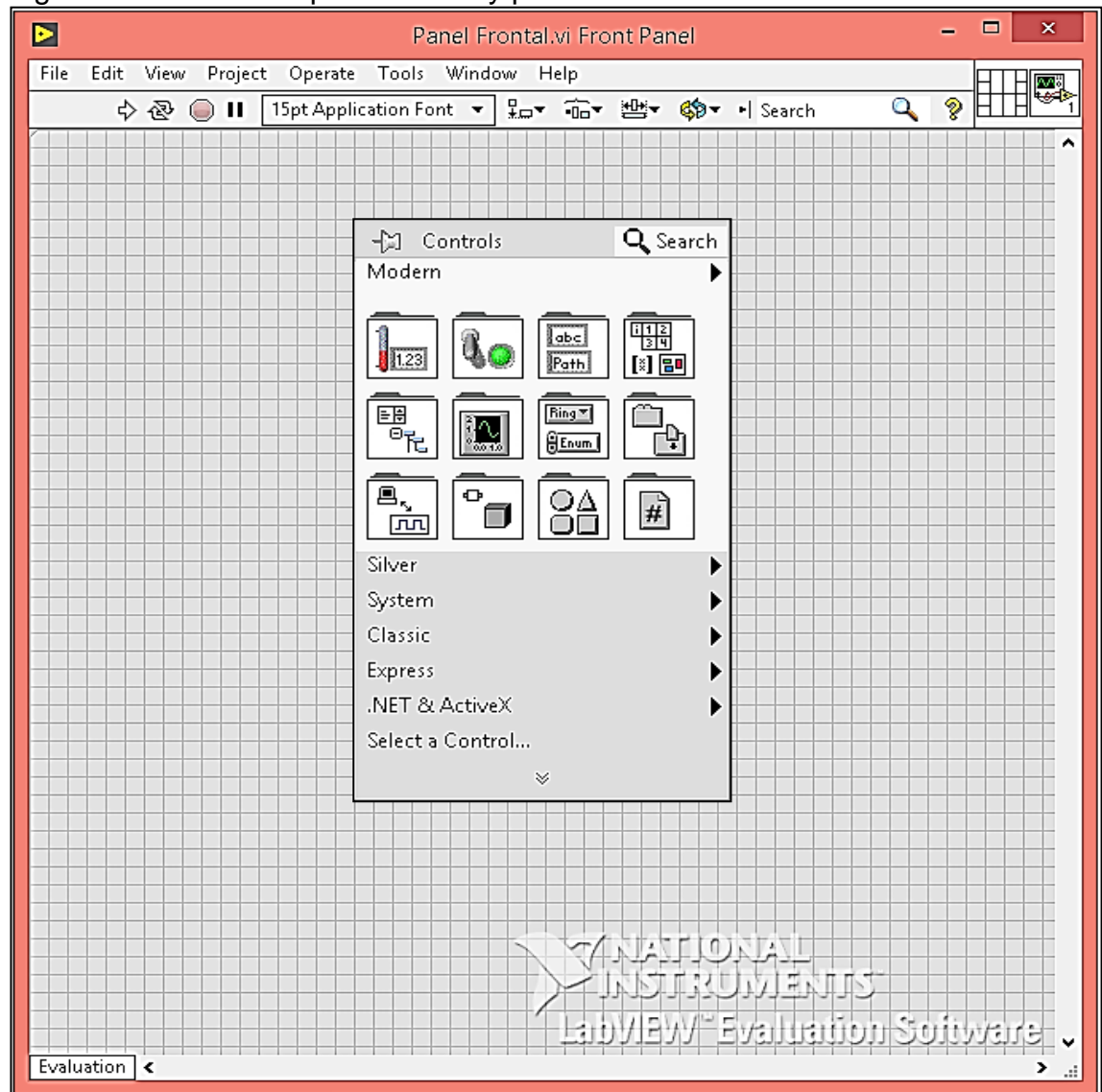


Fuente: Autores.

**1.3.6 Entorno de desarrollo:** *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabVIEW)* es un software con un lenguaje de programación gráfico desarrollado para diseñar sistemas con aplicaciones que requieren pruebas, medidas y control con acceso rápido a información de datos y hardware [2]. Los programas que se desarrollan con LabVIEW se llaman Instrumentos Virtuales (VI). Cada VI consta de dos ventanas: ventana del panel frontal y el diagrama de bloques.

**1.3.6.1 Panel frontal:** La ventana del panel frontal (figura 8) es la interfaz de usuario para el VI, utilizada para interactuar con el usuario cuando el programa se está ejecutando, es decir, esta interfaz recoge las entradas procedentes del usuario y representa las salidas proporcionadas por el programa [4]. En el panel frontal se encuentra la paleta de controles, que contiene los controles e indicadores, los cuales son los terminales interactivos de entrada y salida del VI, respectivamente, usados para crear el panel frontal. Los controles pueden ser perillas, botones, barras deslizantes y otros dispositivos de entrada, utilizados para introducir parámetros al VI; los indicadores son gráficas, LEDs y otras pantallas, empleados para mostrar los resultados. Cada uno de estos elementos tiene asignado un terminal en el diagrama de bloques. Esto es, los controles simulan dispositivos de entrada de instrumentos y suministran datos al diagrama de bloques del VI; los indicadores simulan dispositivos de salida de instrumentos y muestran los datos que el diagrama de bloques adquiere o genera [12].

Figura 8. Ventana del panel frontal y paleta de controles.



Fuente: Tomado y adaptado de National Instruments LabVIEW.

Los tipos de controles e indicadores (*figura 9*) utilizados con mayor frecuencia son: numéricos, los cuales representan números de varios tipos (como un entero o real); de valor booleano, los cuales simulan interruptores, botones y LEDs, y representan datos que solamente tienen dos estados posibles, como true y false u on y off; y de cadena de caracteres, los cuales se usan para ingresar y mostrar texto (como tablas y cuadros de texto).

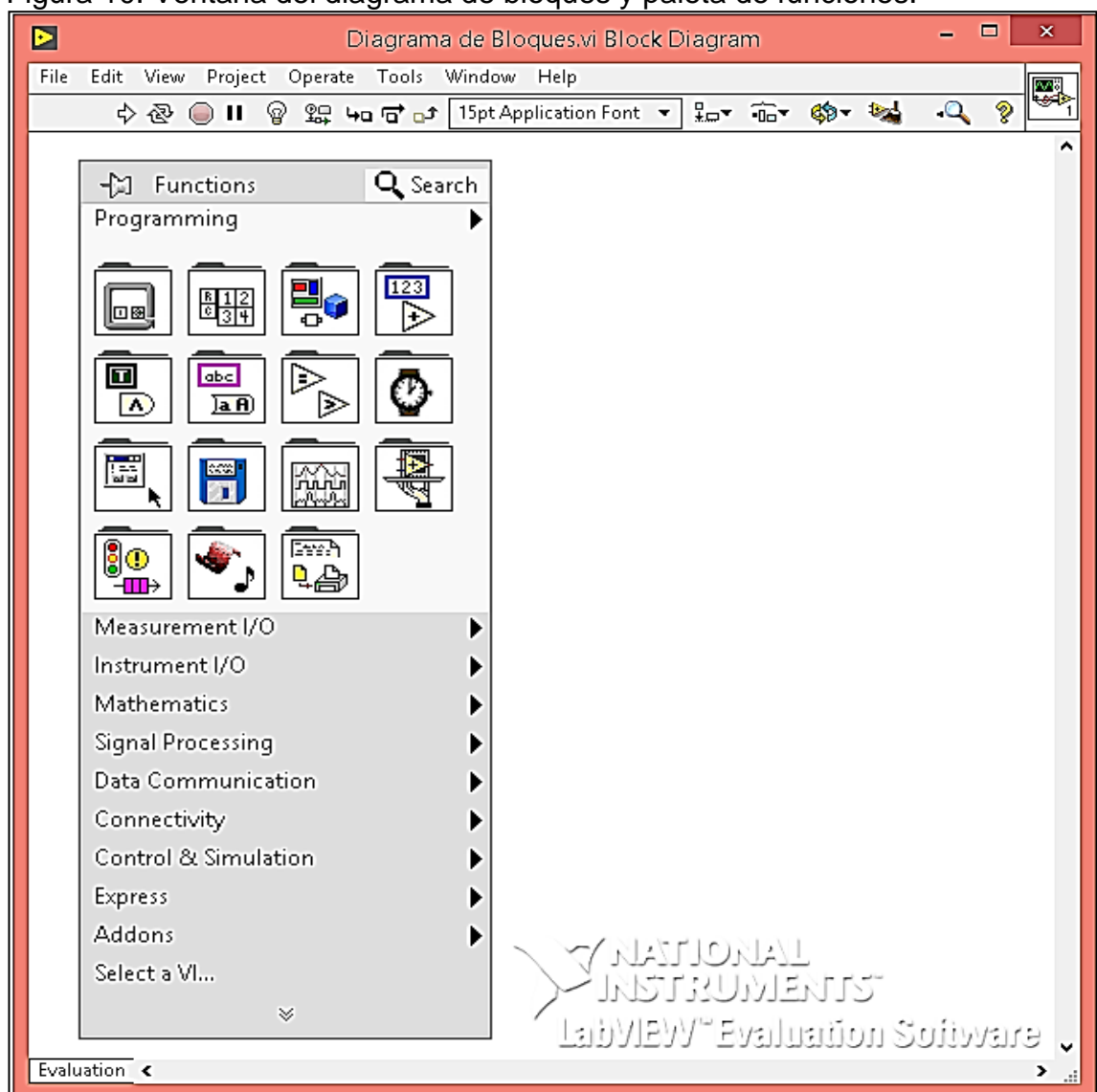
Figura 9. De izquierda a derecha: Controles e indicadores numéricos, booleanos y de cadena de caracteres.



Fuente: Tomado y adaptado de National Instruments LabVIEW.

**1.3.6.2 Diagrama de bloques:** Los objetos en la ventana del panel frontal aparecen como terminales en el diagrama de bloques. Los terminales son puertos de entrada y salida que intercambian información entre el panel frontal y el diagrama de bloques [12]. La ventana del diagrama de bloques (*figura 10*) constituye el código (de fuente gráfica) del VI que define la funcionalidad del programa. En el diagrama de bloques es donde se da la implementación del programa del VI para controlar cualquier proceso de las entradas y salidas que se crearon en el panel frontal [4]. En éste se encuentra la paleta de funciones, que contiene terminales, VIs, subVIs, funciones, constantes, estructuras, cables e íconos, los cuales se interconectan y transfieren datos junto con otros objetos del diagrama de bloques.

Figura 10. Ventana del diagrama de bloques y paleta de funciones.



Fuente: Tomado y adaptado de National Instruments LabVIEW.

Los tipos de terminales más comunes son: de control e indicador y de nodo. Los terminales de control e indicador pertenecen a los controles e indicadores del panel frontal. Los datos que se proporcionan en los controles del panel frontal pasan al diagrama de bloques a través de las terminales de control, es decir, los controles, indicadores y constantes se comportan como entradas y salidas del algoritmo del diagrama de bloques. Los terminales de nodo realizan operaciones cuando el VI se ejecuta. Los nodos pueden ser funciones, subVIs o estructuras (elementos de control de procesos como estructuras de casos, ciclos for o ciclos while).

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 PRUEBAS PRELIMINARES

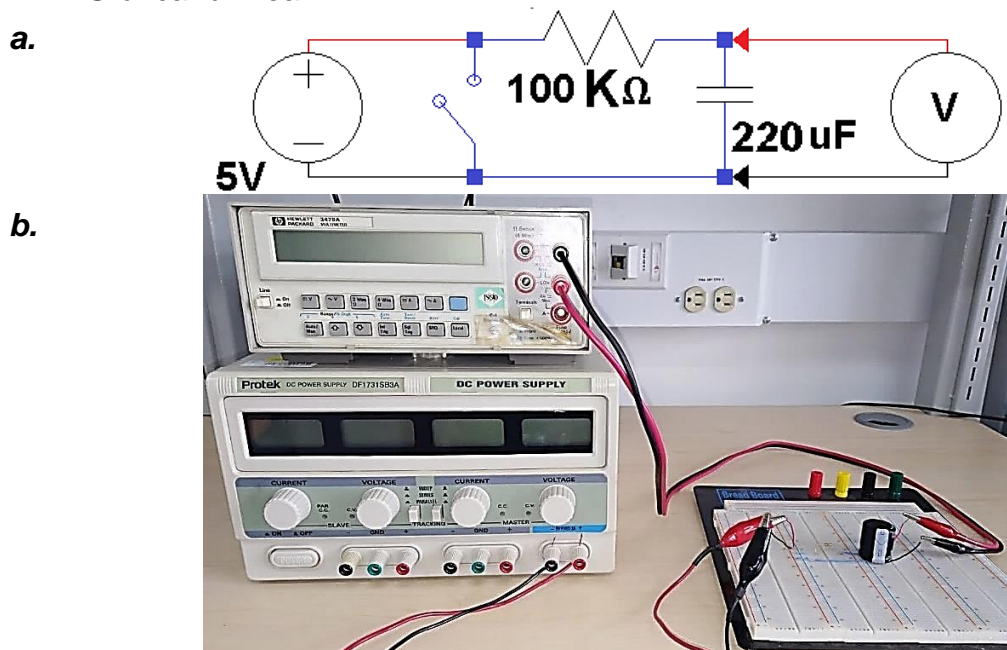
Se realizaron pruebas preliminares para aprender a programar en el lenguaje gráfico utilizado en el software LabVIEW y para corroborar el correcto funcionamiento de un multímetro Keithley 3478A y la fuente Protek DC Power Supply DF1731SB3A. Para esto, se conectó un circuito RC de prueba en una protoboard (figura 11), en el cual se utilizó la fuente para suministrar voltaje de  $5\text{ V}$  (o  $3\text{ A}$ ) y el multímetro para medir diferencia de potencial (figura 12). Se observó el proceso de carga y descarga del condensador a través de una resistencia (se tomaron 76 medidas en 150 segundos, aproximadamente, con un intervalo entre medidas de 2 segundos). El valor de la resistencia usada fue  $100\text{ K}\Omega$  (con una precisión de 5%) y del capacitor fue  $270\text{ }\mu\text{F}$ .

Figura 11. Circuito RC de prueba conectado en una protoboard.



Fuente: Autores.

Figura 12. Montaje para el proceso de carga y descarga de un condensador: a. Gráfica. b. Real.



Fuente: Autores.

El análisis se llevó a cabo a través de un Virtual Instrument –VI– desarrollado en LabVIEW, en el cual las funciones y rangos de medición del multímetro se controlan a través del PC. El código incluyó una función graficadora de diferencia de potencial  $V$  vs tiempo  $t$  y una función tabla de datos para adquirir los valores de las mediciones. El nombre del VI para el multímetro es Multímetro 3478A.vi.

Posteriormente, se realizaron pruebas para el nanovoltímetro Keithley 2182A y picoamperímetro Keithley 6485. Para esto, se tomaron las mediciones (de voltaje y corriente interna) que los equipos realizaban sin cables de salida –por la sensibilidad de los equipos, no se realizaron mediciones en circuitos conectados a la protoboard—. Además, se desarrollaron Virtual Instruments tanto para el nanovoltímetro como para el picoamperímetro, capaces de controlar rangos, funciones, tiempo entre medidas, número de medidas –entre otros—. Los códigos también incluyen funciones graficadoras y de almacenamiento de datos a través de tablas y archivos (se tomaron 100 medidas, con un tiempo entre lecturas de 1 segundo). Los nombres de los VIs son: Ke2182A.vi y Ke6485.vi, para el nanovoltímetro y picoamperímetro, respectivamente.

Para la manipulación de los equipos fue necesario realizar una lectura minuciosa de los manuales de funcionamiento de cada uno de ellos –valores máximos y mínimos de medición, funciones, rangos, fuentes de ruido, conexiones, entre otros– para evitar cualquier avería. Además, para la escritura de los códigos controladores fue indispensable investigar los comandos y lenguajes – Device Dependent Commands (DDC) y Standard Commands for Programmable Instruments (SCPI)– que permiten enviar y recibir órdenes del equipo con el PC.

Por lo tanto, para evitar daños por mal uso se diseñó el siguiente protocolo de medición, esencial para realizar las pruebas:

- Antes de conectar cualquier equipo, cerciorarse de que prendan y funcionen correctamente.
- Realizar una lectura detallada de los manuales para verificar los valores máximos y mínimos de medición, rangos, funciones y conexiones de cada equipo (ver *anexo B*).
- Conectar los equipos y de acuerdo con los valores de las medidas que se estén tomando, ir variando los rangos, de manera que, cuando las mediciones alcancen el fondo de la escala –o lo que es lo mismo, que no puedan realizarse medidas con el rango actual–, se cambie al siguiente rango que sea adecuado.
- Una vez finalizadas las mediciones, apagar los equipos y desconectarlos.

Estas pruebas preliminares se realizaron con el fin de adquirir experiencia en instrumentación científica y manejo del software.

## 2.2 MONTAJE DE EQUIPOS PARA MEDIR RESISTIVIDAD A PARTIR DEL MÉTODO DE VAN DER PAUW

Cada conexión para el montaje integrado de los equipos –fuente de corriente AC/DC, sistema de conmutación, nanovoltímetro y picoamperímetro– (*figura 13*) se realizó a partir de las indicaciones técnicas encontradas en los manuales (los detalles del montaje de los equipos para realizar las mediciones de resistividad eléctrica de láminas semiconductoras a temperatura ambiente, usando el método de van der Pauw, se desarrollan en el *anexo B*), proporcionados por Keithley Instruments, y su sincronización se realizó a través de LabVIEW.

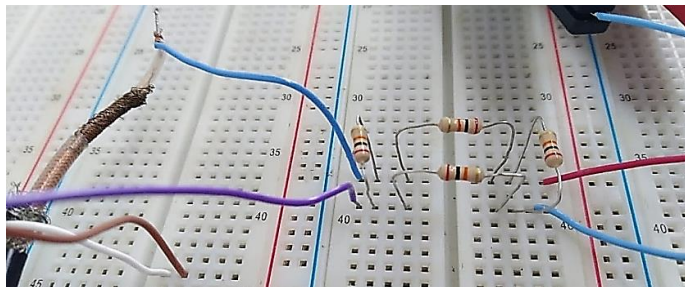
Figura 13. Montaje para medir resistividad eléctrica a partir del método de van der Pauw.



Fuente: Autores.

El montaje para la medición de resistividad eléctrica incluyó un circuito (*figura 14*), de modo que se pudieran realizar mediciones preliminares para comprobar el funcionamiento de las conexiones y de la configuración del software desarrollado para cada equipo y así se pudiera garantizar que las medidas tomadas posteriormente para las láminas semiconductoras correspondieran a valores reales (la metodología para la medición de resistencia eléctrica, utilizando el método de van der Pauw, se presenta en la *sección 2.4*).

Figura 14. Circuito de prueba, conectado en una protoboard, para verificar el correcto funcionamiento del sistema desarrollado.



Fuente: Autores.

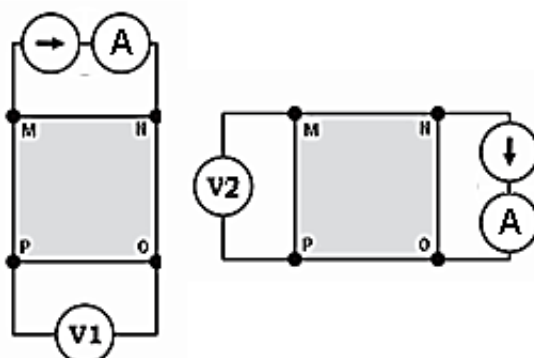
## 2.3 CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE LABVIEW

El código, para controlar los equipos en conjunto, fue configurado en LabVIEW integrando los VIs desarrollados en las pruebas preliminares (los detalles de configuración, control, funcionamiento y toma de datos del software escrito se encuentran en la *sección 3.2*).

El proceso de adquisición de datos inicia con la ejecución del Virtual Instrument ResisUIScnt\_2019.vi, el cual permite la variación de las condiciones experimentales –espesor de la muestra, intervalos de medida de temperatura, tiempo máximo de medidas, intervalos de tiempos entre medidas, equipos a utilizar (despliega una opción para escoger entre el nanovoltímetro Keithley 2182A y el multímetro HP 3478A usado como voltímetro, y entre el picoamperímetro Keithley 6485 y el multímetro Keithley 196 usado como amperímetro), voltajes, corrientes, entre otras–.

A continuación, se procede a tomar las medidas según los requerimientos del método de van der Pauw para determinar la resistividad eléctrica –la toma de datos se inicia con una verificación de los equipos conectados a la tarjeta GPIB y se termina cuando se supera el tiempo máximo de medidas ingresado en un principio–. Para este fin, el software fue configurado de manera tal que las mediciones de corriente y voltaje, para la lámina semiconductora o el circuito de prueba, se realicen cíclicamente (*figura 15*), garantizando que los valores correspondan a un par de contactos diferentes en cada medición. Esto es, se suministró y midió corriente a través de los contactos *M* y *N* y se midió la diferencia de potencial entre los contactos *O* y *P*. Posteriormente, se suministró y midió corriente a través de los contactos *N* y *O* y se midió la diferencia de potencial entre los contactos *P* y *M*. De manera análoga se realizaron las mediciones posteriores. El sistema de conmutación Keithley 7001 fue programado para que realice este proceso automáticamente.

Figura 15. Esquema de las configuraciones de medición por el método de van der Pauw.



Fuente: Tomado y adaptado de Resistividad eléctrica y Efecto Hall en películas delgadas de ZnO depositadas por evaporación reactiva [1].

Los datos requeridos al iniciar el programa son obligatorios y si no son ingresados, no es posible que el programa comience su operación. Además, se configuró para que los datos fueran almacenados en un archivo, cuyo nombre se escoge al correr el VI.

## 2.4 MEDICIÓN DE RESISTENCIA ELÉCTRICA PARA UN CIRCUITO DE PRUEBA USANDO EL MÉTODO DE VAN DER PAUW

Las medidas se realizaron aplicando el método de van der Pauw (usando el montaje mostrado en la *figura 16*) al circuito de prueba mostrado en la *figura 14* –en el cual las resistencias son de  $20\text{ K}\Omega$  cada una, con una precisión de  $5\%$  –, como si fuera una lámina semiconductor a la que se le midiera resistividad eléctrica, donde se tomaron  $M$ ,  $N$ ,  $O$  y  $P$  como puntos de contacto, según las condiciones requeridas para esta técnica (tal como se explicó en la *sección 2.3*: se suministró y midió corriente a través de los contactos  $M$  y  $N$  y se midió la diferencia de potencial entre los contactos  $O$  y  $P$ ). A través del VI se tomaron 100 medidas en aproximadamente 9.5 minutos (los detalles del desarrollo y cálculo se presentan en la *sección 3.3* de resultados).

Figura 16. Montaje para medir resistencia eléctrica a un circuito de prueba a partir del método de van der Pauw.



Fuente: Autores.

## 2.5 MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LÁMINAS SEMICONDUCTORAS DE GaSb:Nd A TEMPERATURA AMBIENTE USANDO EL MÉTODO DE VAN DER PAUW

Una vez realizada la medición de resistencia eléctrica para comprobar el funcionamiento de las conexiones, comienza el proceso de medición de resistividad eléctrica en láminas semiconductoras de GaSb:Nd. Para esto se reemplazó el circuito de prueba usado en la medición anterior, por las láminas semiconductoras (aproximadamente bidimensionales, homogéneas y de forma cuadrada), preparadas previamente por investigadores del grupo CIMBIOS. Para esto, se siguió el siguiente proceso: ensamble de la muestra al montaje, verificación de muestra óhmica y medición de resistividad eléctrica.

**2.5.1 Ensamble de la lámina semiconductor al montaje:** Para integrar las láminas semiconductoras al montaje de los equipos, se siguió el siguiente procedimiento:

- Cada lámina se ubicó sobre una superficie eléctricamente aislante de alta resistividad, sobre la cual previamente se pegó adhesivo transparente doble cara a base de celulosa, para fijar la muestra al soporte (*figura 17*).

Figura 17. Ubicación de las láminas semiconductoras de GaSb sobre un soporte de madera



Fuente: Autores.

- Sobre el soporte se fijaron cuatro alambres de cobre (lo más delgados posible) con cinta, de manera que los extremos quedaran ubicados en los vértices de la lámina, cumpliendo con las condiciones de medición de van der Pauw presentadas en la *sección 1.2* (*figura 18*).

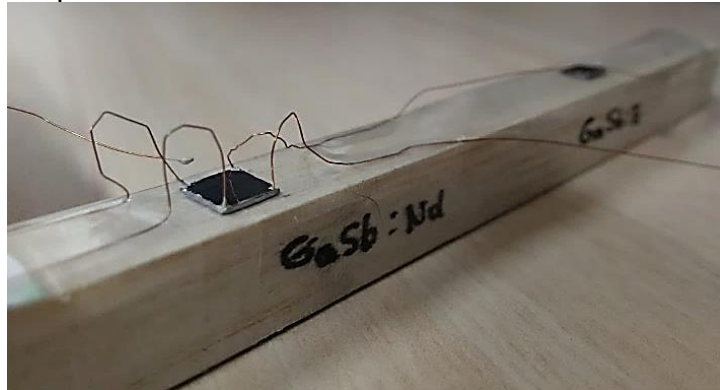
Figura 18. Ubicación de los extremos de los alambres sobre la lámina.



Fuente: Autores.

- Los extremos de los alambres fueron acoplados a la muestra aplicando tintura de plata entre ellos (la tintura se aplicó con un alambre igual al usado en las conexiones), de modo que sirvieran como conexión entre los equipos y la muestra (*figura 19*).

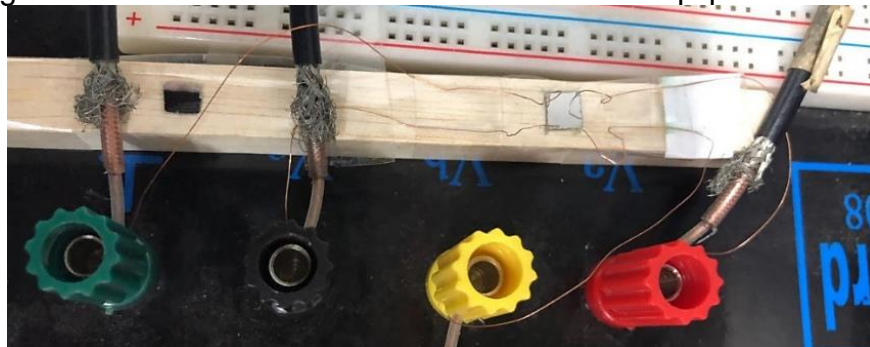
Figura 19. Acoplamiento de los alambres a la lámina.



Fuente: Autores.

- Por último, los extremos libres de los cuatro alambres se conectaron al sistema de conmutación, al cual se conectaron previamente la fuente, el picoamperímetro y nanovoltímetro (*figura 20*).

Figura 20. Conexiones de los alambres con los equipos.



Fuente: Autores.

**2.5.2 Verificación del comportamiento óhmico de la muestra:** El comportamiento óhmico de la muestra se verificó realizando el siguiente proceso: se aplicaron diferentes valores de corriente eléctrica a largo de la lámina semiconductor por medio de dos contactos y se midió la diferencia de potencial en los dos contactos restantes –se realizaron 50 medidas para cada corriente aplicada (un total de 1000 medidas)– siguiendo la secuencia mostrada en la *figura 16* (tal como se explicó en la *sección 2.3*).

Los resultados fueron analizados a partir de la ley de Ohm, donde se tuvo en cuenta que la intensidad de corriente suministrada por la fuente debía ser directamente proporcional a la diferencia de potencial medida en los bordes del material semiconductor (el análisis para determinar si los contactos presentan un comportamiento óhmico se muestra con detalle en la *sección 3.4* de resultados).

**2.5.3 Medición de resistividad eléctrica:** Una vez integradas las láminas semiconductoras al montaje y verificado el comportamiento óhmico de la muestra, se procedió a tomar las medidas para determinar la resistividad eléctrica de dichas láminas, usando el método de van der Pauw. A partir de las mediciones realizadas en la verificación del comportamiento óhmico de la muestra, el software calculó automáticamente los valores de resistencia en las láminas semiconductoras y los relacionó con la resistividad eléctrica por medio de la ecuación de van der Pauw (*ecuación 2*). Como resultado de las mediciones tomadas se presenta el valor de resistividad  $\rho$  y una gráfica de  $\rho$  en función de la corriente  $I$ .

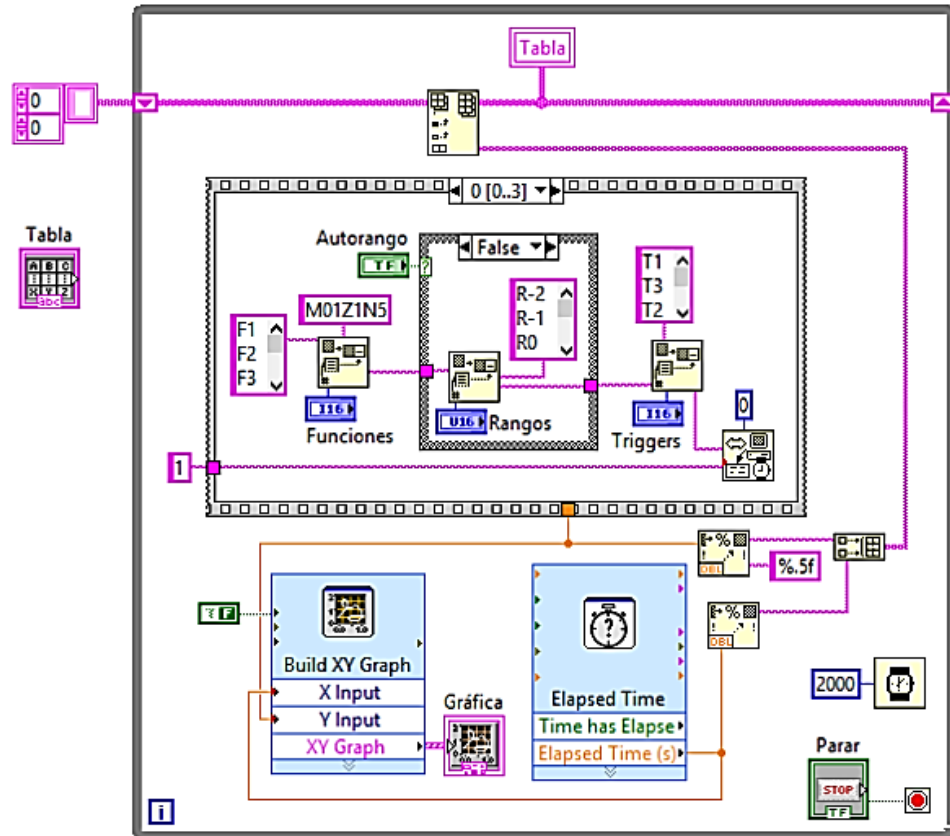
El tiempo empleado para la toma de medidas de resistividad eléctrica fue de aproximadamente 1 hora –se realizaron 50 medidas de resistividad para cada corriente aplicada (un total de 1000 medidas), siguiendo las indicaciones expuestas en la *sección 2.1*–.

## **2.6 DOCUMENTACIÓN DEL PROCESO DE MONTAJE DE LOS EQUIPOS**

Se dejó registro escrito detallado del proceso de construcción del montaje experimental para la medición de resistividad eléctrica, en forma de manual de instrucciones. Utilizando la documentación de cada equipo, se describieron las conexiones establecidas entre los mismos, los límites de medición, las precauciones, especificaciones y recomendaciones para tener en cuenta (los detalles del montaje de los equipos para realizar las mediciones de resistividad eléctrica se presentan en el *anexo B*). Además, se anexaron gráficas de algunas mediciones de resistividad (ver *sección 3.4*).



b.



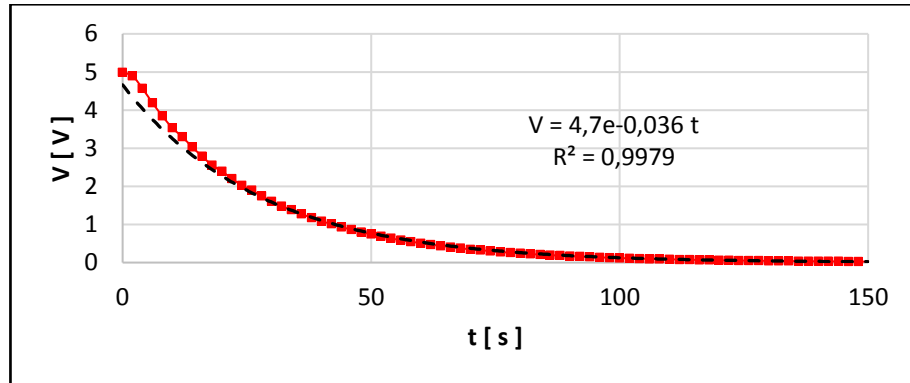
Fuente: Autores.

Para determinar la capacitancia  $C$  del circuito usado en las pruebas preliminares, se relaciona la diferencia de potencial con el tiempo que tarda dicho potencial en volverse cero, es decir, en descargarse el capacitor, a partir de la expresión  $V(t) = V_0 e^{-\frac{t}{RC}}$ .

La *figura 22* permite determinar que, a medida que transcurre el tiempo, la diferencia de potencial decae exponencialmente (se descarga el condensador), cumpliendo con la ecuación  $V = 4.7e^{-0.036t}$ . Al comparar esta expresión con la expresión dada para la descarga del condensador, se puede notar que  $4.7 V$  corresponde al valor del voltaje inicial  $V_0$  suministrado por la fuente (el cual teóricamente es  $5 V$ ) y que  $0.036 = 1/\tau = 1/RC$ . Al despejar la capacitancia se obtiene  $C = 277.7 \mu F$ .

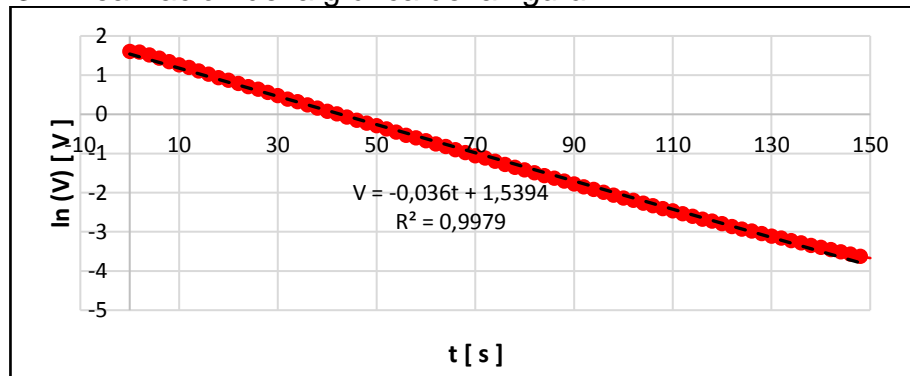
Al realizar la linealización a la *figura 22* se obtiene la *figura 23*, de la cual también se puede calcular la capacitancia, así: volviendo a la expresión dada para la descarga del condensador y comparándola con la ecuación de la recta en la gráfica, se puede ver que la pendiente de la recta corresponde a  $0.036 = 1/\tau = 1/RC$ . Al despejar el valor de la capacitancia se obtiene que  $C = 277.7 \mu F$ . Además, el valor  $1.5394$  corresponde a  $\ln 4.7$ , donde  $4.7$  es el voltaje inicial experimental.

Figura 22. Gráfica de diferencia de potencial  $V$  vs. tiempo de descarga  $t$  del capacitor.



Fuente: Autores.

Figura 23. Linealización de la gráfica de la figura 22.



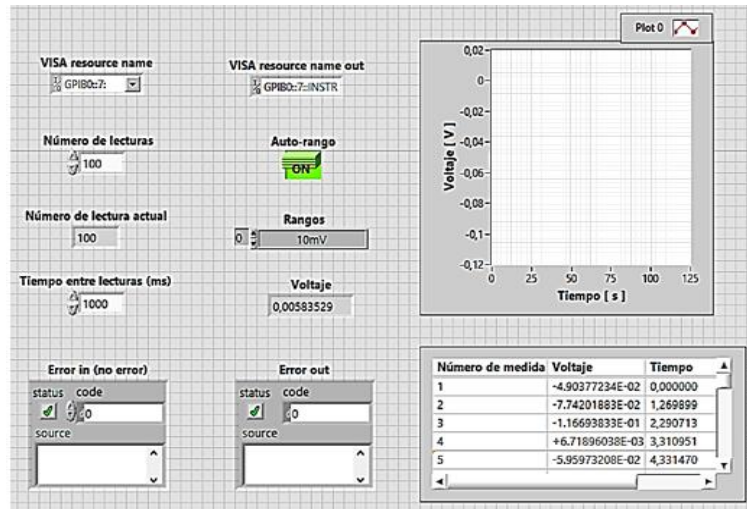
Fuente: Autores.

Por lo cual, al relacionar el valor de  $C$  obtenido, con su respectivo valor teórico ( $C = 270 \mu F$ ) se tiene un error relativo de 2.85%. De acuerdo con el valor tan bajo para el error relativo de la medición, se puede concluir que los equipos, las conexiones entre ellos y los VIs, desarrollados para controlar dichos equipos, operan correctamente, de manera tal que los resultados de las mediciones se ajustan a lo esperado teóricamente.

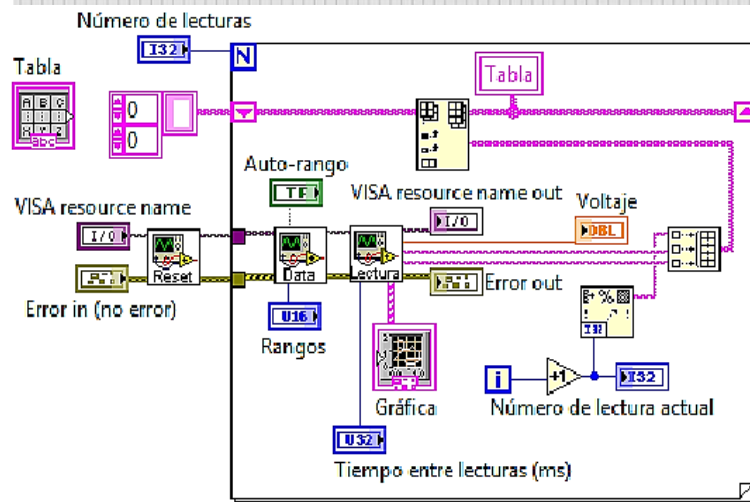
A su vez, los VIs asociados al nanovoltímetro y al picoamperímetro –Ke2182A.vi y Ke6485.vi, respectivamente– se desarrollaron para controlar las funciones, del panel frontal de los equipos, desde el PC. Estos VIs cuentan con controles que permiten modificar parámetros experimentales (como el número de lecturas y el tiempo entre lecturas). Además, al igual que el VI desarrollado para el multímetro, cuentan con un control para escoger los rangos de medición (que se usa cuando la función auto-rango está desactivada), y con funciones de almacenamiento de datos y graficadoras de dichos datos adquiridos (las figuras 24 a y b y 25 a y b muestran el panel frontal y el diagrama de bloques del VI asociado al nanovoltímetro y al picoamperímetro, respectivamente).

Figura 24. VI asociado al nanovoltímetro a. Panel frontal. b. Diagrama de bloques.

a.



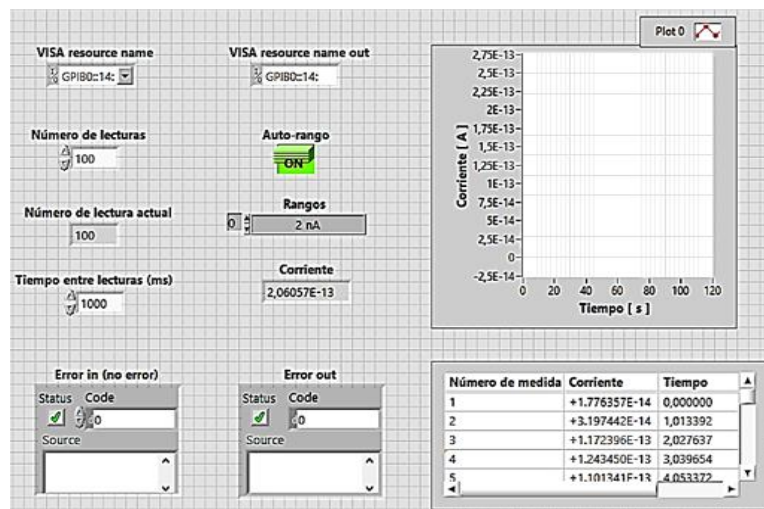
b.

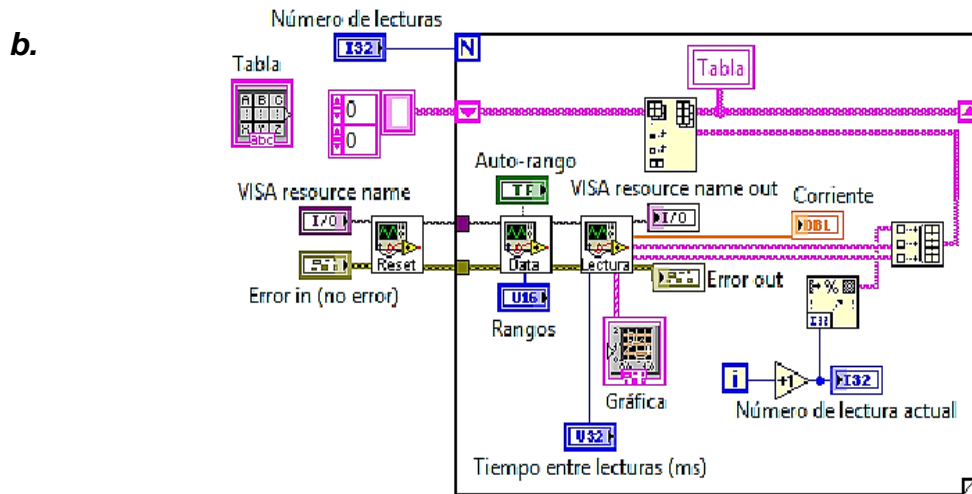


Fuente: Autores.

Figura 25. VI asociado al picoamperímetro a. Panel frontal. b. Diagrama de bloques.

a.





Fuente: Autores.

### 3.2 CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE LABVIEW

ResisUIScnt\_2019.vi fue el VI desarrollado para realizar el proceso de medición de resistividad eléctrica usando el método de van der Pauw. Los requerimientos mínimos para instalar y ejecutar el software LabVIEW 9.0 en Windows son:

- Sistema operativo: Windows Vista/XP/2000.
- Procesador: Pentium III/Celeron 866 MHz o su equivalente.
- RAM: 256 MB (la recomendada es 1 GB).
- Espacio en disco: 1.6 GB (incluye drivers en el CD NI Device Drivers).
- Resolución de pantalla: 1024 x 768 pixeles.

El código del programa fue configurado integrando los VIs desarrollados en las pruebas preliminares y se ejecuta dando doble clic en el icono del programa (figura 26).

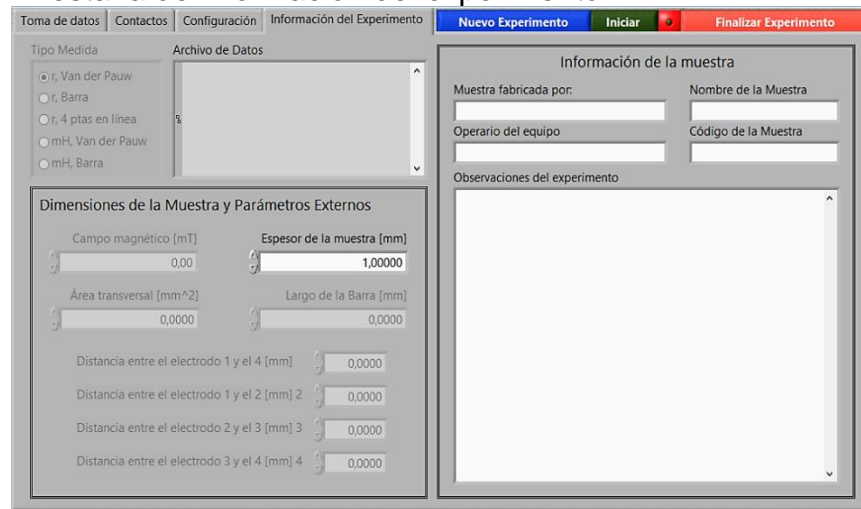
Figura 26. Icono de LabVIEW.



Fuente: Autores.

Este VI cuenta con tres (3) pestañas: La primera de ellas, una pestaña de información relacionada con la muestra, en la cual se escoge el tipo de medida que se va a realizar (resistividad eléctrica) y se ingresan detalles como nombre, código y dimensiones de la muestra, distancia entre los contactos utilizados e información acerca del operario que realiza las mediciones, así como el archivo en el cual se almacenarán los datos tomados (figura 27).

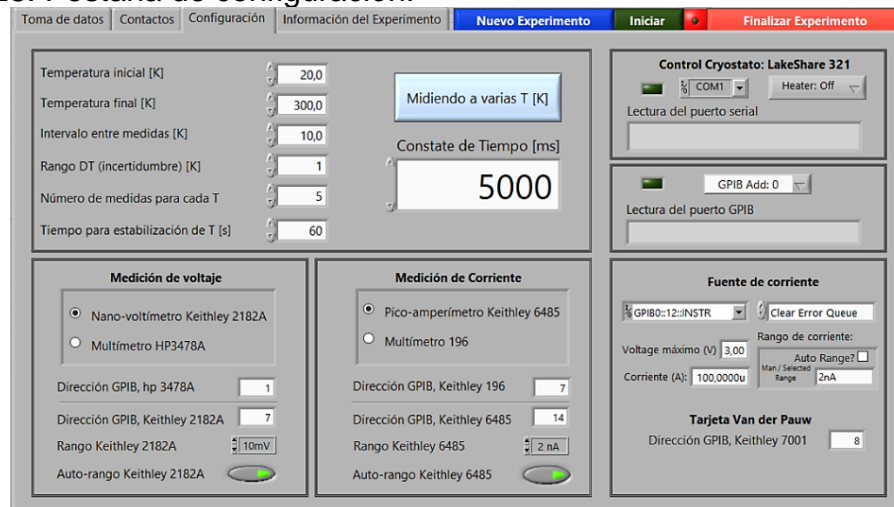
Figura 27. Pestaña de información del experimento.



Fuente: Autores.

La segunda, una pestaña de configuración, en la cual se escogen los equipos a utilizar (permite elegir entre el nanovoltímetro y el multímetro usado como voltímetro, y entre el picoamperímetro y el multímetro usado como amperímetro, así como los rangos de medición de cada uno de ellos) y se ingresan los valores requeridos para que cada equipo funcione (rangos, voltaje y corriente, en el caso de la fuente, y direcciones GPIB para comunicar todos los equipos con el PC). En esta pestaña también se modifican parámetros experimentales relacionados al control de temperatura y tiempo –temperatura inicial, temperatura final (temperatura a la cual el VI finaliza la toma de datos), intervalo entre medidas de temperatura, número de medidas para cada temperatura (ayuda a finalizar las mediciones realizadas por el VI, es decir, evita que se quede en bucle tomando medidas), intervalo de tiempo entre medidas (introduce un retardo en la toma de medidas. Por defecto es de cinco segundos), entre otros– (figura 28).

Figura 28. Pestaña de configuración.

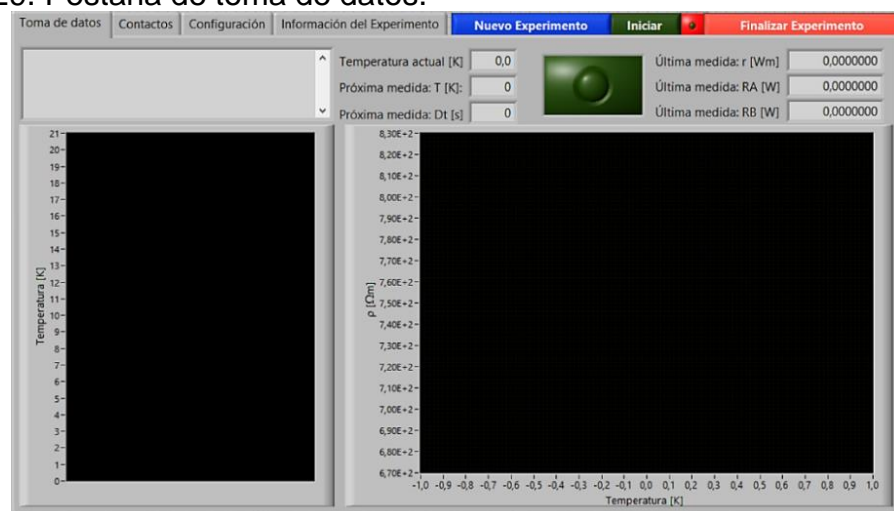


Fuente: Autores.

El VI se desarrolló de manera que, una vez suministrada la información necesaria y configurados los parámetros de medición, un control permita iniciar la toma de mediciones y finalizarla en el momento que se desee (o cuando se alcancen los valores máximos establecidos), para iniciar un nuevo experimento.

Por último, cuenta con un panel de toma de datos, en el cual se muestran los resultados de las mediciones de resistividad eléctrica realizadas (figura 29). Si los equipos están correctamente conectados al sistema de control (GPIB), las mediciones se pueden realizar, de lo contrario, se despliega un mensaje de error que alerta al usuario para revisar las conexiones.

Figura 29. Pestaña de toma de datos.



Fuente: Autores.

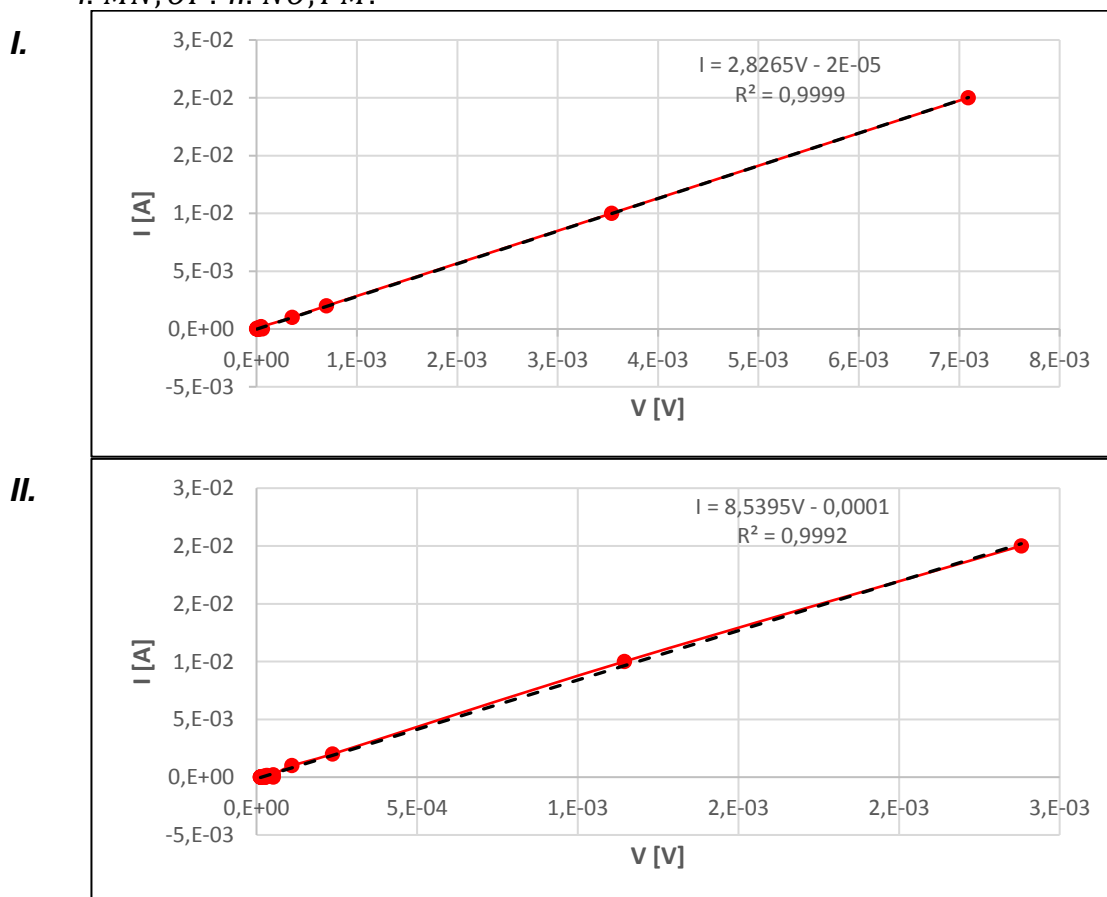
### 3.3 MEDICIÓN DE RESISTENCIA ELÉCTRICA PARA UN CIRCUITO DE PRUEBA USANDO EL MÉTODO DE VAN DER PAUW

Las mediciones se llevaron a cabo aplicando el método de van der Pauw al circuito, como si fuera una lámina a la que se le mide la resistividad eléctrica. El valor medio de  $V_{OP}/I_{MN}$  medido fue  $(\overline{V_{OP}/I_{MN}}) = 4989.3 \Omega$  y de  $V_{PM}/I_{NO}$  fue  $(\overline{V_{PM}/I_{NO}}) = 4989.3 \Omega$ , de los cuales se obtuvo el valor de la resistencia utilizada en el circuito:  $R = 19957.2 \Omega$  tanto para los contactos  $MN, OP$  como para los contactos  $NO, PM$  —la igualdad en el valor de las resistencias se debe a la simetría en el circuito utilizado—, de acuerdo con la expresión  $R = 4 (V/I)$ . El error relativo para estas mediciones fue 0.21 %, tanto para los contactos  $MN, OP$  como para los contactos  $NO, PM$ , respecto al valor teórico ( $20 K\Omega$ ). Ya que el error relativo es tan bajo para los dos resultados, se puede inferir que hay una buena correspondencia entre las mediciones realizadas por este sistema y el valor teórico reportado para la resistencia usada en el circuito. Esto indica que el sistema desarrollado permite obtener mediciones de resistividad coherentes con los valores reales.

### 3.4 MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LÁMINAS SEMICONDUCTORAS DE GaSb:Nd A TEMPERATURA AMBIENTE USANDO EL MÉTODO DE VAN DER PAUW

Una vez ensamblada la lámina semiconductor de GaSb:Nd al montaje, se verifica el comportamiento óhmico de la muestra: el teorema de van der Pauw está basado en la condición de que la lámina debe comportarse como un material óhmico. Esto implica que para una curva de corriente  $I$  vs. diferencia de potencial  $V$  debe existir una relación lineal (lo cual permite verificar la relación de Ohm). Las figuras 30 I-II son gráficas de corriente  $I$  vs diferencia de potencial  $V$  para las distintas configuraciones entre cada par de contactos.

Figura 30. Gráfica de corriente  $I$  vs. diferencia de potencial  $V$  para los contactos: I. MN,OP. II. NO,PM.

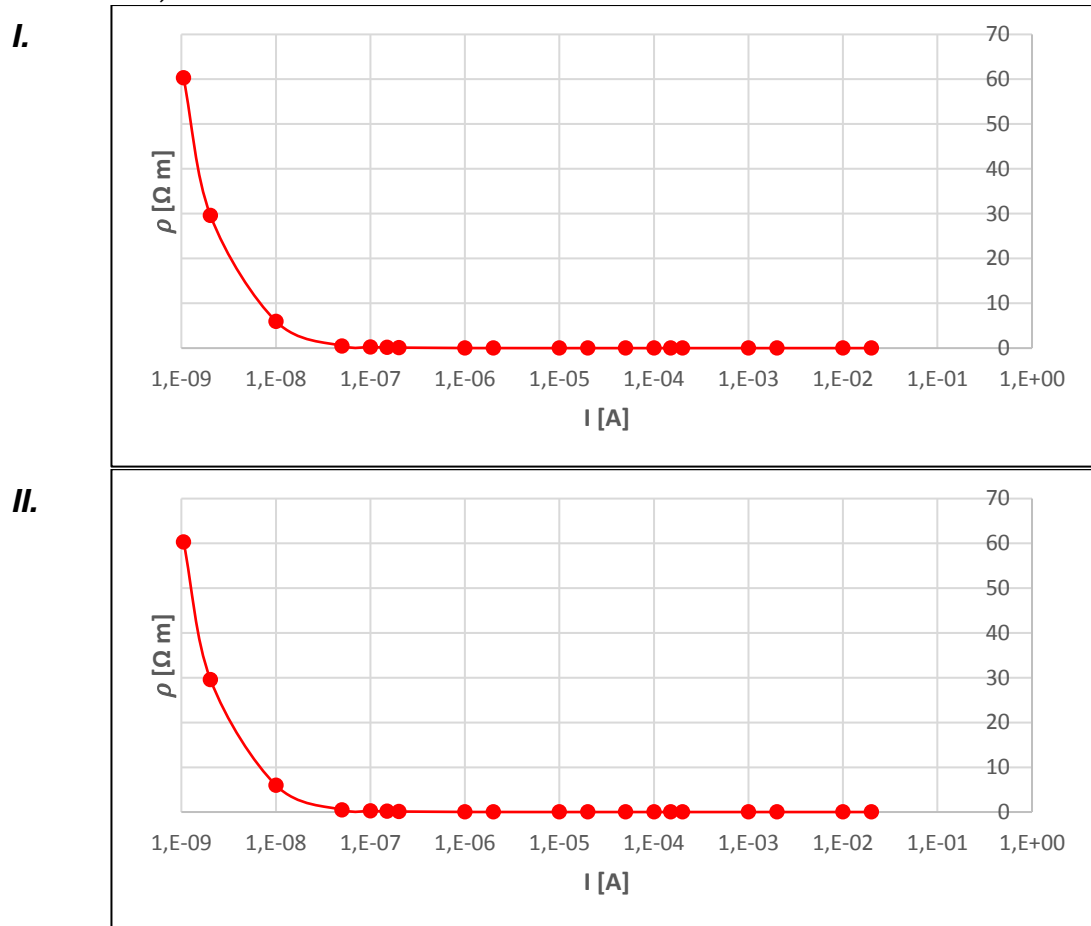


Fuente: Autores.

Ya que se obtuvo una relación lineal, correspondiente a la ley de Ohm, entre las variables medidas (la pendiente de la recta de cada una corresponde a la conductancia de la lámina, medida entre los contactos  $MN,OP$  y  $MN,OP$ , respectivamente), se puede concluir que la muestra presenta un comportamiento óhmico y el ensamble de la muestra al montaje fue realizado correctamente.

Ahora bien, como la muestra presenta un comportamiento óhmico, se satisfacen las condiciones para realizar las mediciones. Las *figuras 31 I-II* muestra los valores de resistividad  $\rho$  en función de la corriente  $I$  aplicada a una lámina semiconductora de GaSb:Nd de espesor  $d = 500 \mu m$  (en este caso a  $24^\circ C$ ), para cada configuración de contactos.

Figura 31. Gráfica de resistividad  $\rho$  vs. corriente  $I$  para los contactos: *I. MN, OP.*  
*II. NO, PM.*



Fuente: Autores.

El valor mínimo y máximo de resistividad fue  $\rho_{min} = 4.87 \times 10^{-4} \Omega \cdot m$  y  $\rho_{max} = 60.32 \Omega \cdot m$ , respectivamente. Estos valores se encuentran dentro del intervalo teórico de  $10^{-2}$  y  $10^9 \Omega \cdot cm$  para materiales semiconductores [11].

## 4. CONCLUSIONES

En la presente pasantía de investigación se actualizó, complementó e implementó un sistema de caracterización de propiedades eléctricas en láminas semiconductoras, usando el método de Van der Paw, a través de un software, diseñado en LabVIEW, que permitió el manejo remoto de los equipos utilizados en el montaje. Como resultado del trabajo realizado, se puede concluir:

El VI Multímetro 3478A.vi desarrollado para el multímetro Hp 3478A permite el manejo remoto del equipo. El VI puede ser implementado para realizar mediciones de resistencia, voltaje y corriente CA y CD. Lo anterior pudo ser evidenciado al analizar el proceso de carga y descarga de un condensador, debido a que el resultado de medición fue cercano al valor teórico (error relativo de 2.85%).

El experimento donde se aplicó el método de van der Pauw (usando el sistema actualizado y complementado en esta pasantía) para medir la resistividad eléctrica en láminas semiconductoras, arrojó resultados acordes con los valores esperados de resistividad eléctrica (entre  $10^{-2}$  y  $10^9 \Omega \cdot cm$ ). Estos resultados permitieron inferir lo siguiente:

- Los VIs Ke2182A.vi y Ke6485.vi desarrollados para el nanovoltímetro Keithley 2182A y picoamperímetro Keithley 6485, respectivamente, permiten el manejo remoto de los equipos. Estos VIs pueden ser implementados para medir y controlar los diferentes rangos de medición de corriente y voltaje, respectivamente.
- La actualización de los VIs desarrollados para la fuente de corriente Keithley 6221 permite controlar los diferentes rangos de suministro de corriente y voltaje.
- Los Ke2182A.vi y VI Ke6485.vi desarrollados para el nanovoltímetro y picoamperímetro, respectivamente, fueron incorporados correctamente al VI ResisUIScnt\_2019.
- El VI asociado al picoamperímetro se sincroniza con el VI asociado a la fuente para medir la corriente suministrada. A su vez, el VI asociado al nanovoltímetro se sincroniza con el VI asociado a la fuente para medir el voltaje suministrado.

El montaje integrado de los equipos Keithley 6485, Keithley 2182A, Keithley 7001, Keithley 6221, Keithley 196 y Hp 3478A, constituye un sistema funcional para la medición de resistividad eléctrica en láminas semiconductoras.

El manual de instrucciones detalla el proceso que se debe seguir para medir resistividad eléctrica. Este representa una herramienta de uso fácil y rápido.

## BIBLIOGRAFÍA

ARREDONDO OROZCO, Carlos Andrés y MESA RODRÍGUEZ, Fredy Giovanni. (2011). Resistividad eléctrica y Efecto Hall en películas delgadas de ZnO depositadas por evaporación reactiva. En: AVANCES: Investigación en Ingeniería. Vol. 1; No. 13 (Dic. 2010); p. 15-19.

BITTER, Rick, MOHIUDDIN, Taqi, y NAWROCKI, Matt. *Introduction to LabVIEW. LabVIEW Advanced Programming Techniques*. Boca Ratón, US: CRC Press, 2001.

GRIFFITS, David Jeffrey. *Introduction to Electrodynamics. Ohm's Law*. 3ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999, 289p.

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES EN METROLOGÍA. Software para la Automatización del Proceso de Mediciones con los Multímetros FLUKE de 6 ½ dígitos. [En línea]. [2018]. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/2230/223029286004.pdf>.

KEITHLEY. *Datasheet 6485, Keithley Series 6400 Picoammeters*. Ohio: Keithley.

KEITHLEY. *Low Level Measurements Handbook Precision: DC Current, Voltage, and Resistance Measurements. Instrument Definitions*. 6ed. Ohio: Keithley, 1-5 - 1-9p.

KEITHLEY. *Model 6220 DC Current Source Model 6221 AC and DC Current Source User's Manual Primary User. DC Current Source Operation*. Ohio: Keithley, 2008, 51p.

KEITHLEY. *Model 6485 & Model 6487 User's Manual Manual. Getting Started*. Ohio: Keithley, 2003, 14p.

KEITHLEY. *Model 7001 Switch System Instruction Manual Rev. H Manual. 7001 High Density Switch System Specifications*. Ohio: Keithley, 2001, 7p.

KEITHLEY. *Models 2182 and 2182A Nanovoltmeter User's Manual 2182A User's Manual Rev.B User Manual. Voltage and Temperature Measurements*. Ohio: Keithley, 2004, 43p.

KITTEL, Charles. *Introduction to solid state physics. Semiconductor crystals*. 8ed. New York: J. Wiley & Sons, 1996, 185-219p.

NATIONAL INSTRUMENTS. Fundamentos del Entorno de LabVIEW. [En línea]. [2018]. Disponible en <http://www.ni.com/getting-started/labview-basics/esa/environment>.

CAPPER, Peter y KASAP, Safa. *Electrical characterization of semiconductor materials and devices. Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials*. New York, US: Springer US, 2017, 409-438p.

RUNYAN, W. R. *Semiconductor measurements and instrumentation. Resistivity and Carrier-Concentration Measurements*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1975, 65-103p.

SZE, Simon Min y LEE, Ming-Kwei. *Semiconductor devices: physics and technology. Carrier transport phenomena*. 3ed. New York: J. Wiley & Sons, 2010, 43-81p.

VAN DER PAUW, L.J. A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape. En: Philips Research Reports. Vol. 13; No. 1 (1958); p. 1-9.

VAN DER PAUW, L.J. A method of measuring the resistivity and Hall coefficient on lamellae of arbitrary shape. En: Philips Technical Review. Vol. 20; No. 8 (1958-1959); p. 220-224.

ZENONE. *AC and DC current sources GIS1K series*. [En línea]. [2018]. Disponible en [https://www.zenoneelettronica.it/datasheet/spec\\_gise.pdf](https://www.zenoneelettronica.it/datasheet/spec_gise.pdf).

## ANEXOS

### ANEXO A. TEOREMA DE VAN DER PAUW

#### 1. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

Se presenta la demostración generalizada del teorema de van der Pauw aplicado a láminas de forma arbitraria: si se aplica una corriente  $I_{MN}$  entre los contactos  $M$  y  $N$  –la corriente entra a la muestra a través del contacto  $M$  y la deja a través del contacto  $N$ – y se mide la diferencia de potencial  $V_{OP}$  ( $V_P - V_O$ ) entre los contactos  $O$  y  $P$  (figura 1), se define la resistencia  $R_{MN,OP}$ , encontrada a partir de la ley de Ohm, como la diferencia de potencial  $V_{OP}$  por unidad de corriente  $I_{MN}$ , es decir:

$$R_{MN,OP} = \frac{V_P - V_O}{I_{MN}} = \frac{V_{OP}}{I_{MN}}.$$

De manera similar, se define la resistencia  $R_{NO,PM}$ :

$$R_{NO,PM} = \frac{V_M - V_P}{I_{NO}} = \frac{V_{PM}}{I_{NO}}.$$

Ahora bien, consideremos que la muestra es una lámina, de espesor  $d$  y resistividad  $\rho$ , que se extiende al infinito en todas las direcciones. Si a un punto  $M$  se le aplica una corriente  $2I$ , que fluye desde  $M$  con simetría radial hasta el infinito, la densidad de corriente  $J$  a una distancia  $r$  de  $M$  es:

$$J = \frac{2I}{2\pi r d}.$$

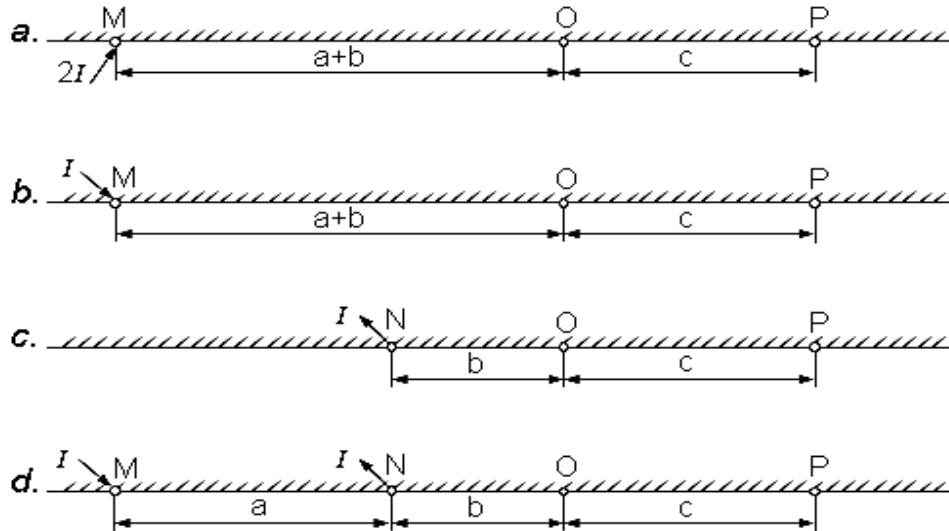
El campo eléctrico está radialmente orientado y, de acuerdo con la ley de Ohm, es:

$$E = \rho J = \frac{\rho I}{\pi r d}.$$

La diferencia de potencial entre dos (2) puntos  $O$  y  $P$  que están sobre la misma línea recta que  $M$  (figura 32a) es:

$$V_P - V_O = \int_P^O E dr = \frac{\rho I}{\pi d} \int_P^O \frac{dr}{r} = \frac{\rho I}{\pi d} \ln \frac{a+b}{a+b+c}.$$

Figura 32. Lámina con forma de semiplano infinito.



Fuente: Tomado y adaptado de A method of measuring the resistivity and Hall coefficient on lamellae of arbitrary shape [16].

Ya que no fluye corriente en dirección perpendicular a la línea recta que pasa por  $M$ ,  $O$  y  $P$ , el resultado obtenido sigue siendo válido si se omite la parte de la parte de la lámina a un lado de esta línea –convirtiendo la lámina infinita en un plano semi-infinito– y si al mismo tiempo se reduce la corriente a la mitad (*figura 32b*), es decir, si se toma una corriente  $I$  en lugar de  $2I$ , pero aplicada a medio plano infinito, se obtendrá el mismo resultado.

Si ahora una corriente  $I$  fluye hacia afuera desde un punto  $N$ , que de nuevo está sobre la misma línea recta en la que están  $O$  y  $P$ , es decir, en el borde del plano semi-infinito (*figura 32c*), la diferencia de potencial entre los puntos  $O$  y  $P$  es:

$$V_P - V_O = \frac{\rho I}{\pi d} \ln \frac{b+c}{b}.$$

La superposición de los casos  $b$  y  $c$  en la *figura 32* conduce al  $d$ , donde la corriente  $I$  se aplica en el punto  $M$  y fluye hacia afuera por el punto  $N$ . La diferencia de potencial entre los puntos  $O$  y  $P$  para este caso se encuentra sumando los dos (2) resultados anteriores:

$$V_P - V_O = \frac{\rho I_{MN}}{\pi d} \ln \frac{a+b}{a+b+c} + \frac{\rho I_{MN}}{\pi d} \ln \frac{b+c}{b}.$$

Después de dividir por  $I_{MN}$  se tiene la resistencia  $R_{MN,OP}$ :

$$R_{MN,OP} = \frac{\rho}{\pi d} \ln \frac{(a+b)(b+c)}{b(a+b+c)}.$$

o

$$e^{-\frac{\pi d}{\rho} R_{MN,OP}} = \frac{b(a+b+c)}{(a+b)(b+c)}. \quad (4)$$

De manera similar, se define la resistencia  $R_{NO,PM}$ :

$$R_{NO,PM} = \frac{\rho}{\pi d} \ln \frac{(a+b)(b+c)}{ac}.$$

o

$$e^{-\frac{\pi d}{\rho} R_{NO,PM}} = \frac{ac}{(a+b)(b+c)}. \quad (5)$$

Por lo tanto, sumando las *ecuaciones 4 y 5*, van der Pauw demostró que existe una relación entre  $R_{MN,OP}$  y  $R_{NO,PM}$  [16,17], que permite hacer las mediciones sin conocer el patrón de corriente en la muestra:



$$e^{-\frac{\pi d}{\rho} R_{MN,OP}} + e^{-\frac{\pi d}{\rho} R_{NO,PM}} = 1. \quad (6)$$

Esta demostración es parcial. Para más detalles sobre la demostración de la validez de la técnica para cualquier material con forma arbitraria, remitirse al artículo de van der Pauw [16, 17].

## ANEXO B. MANUAL

### 1. INFORMACIÓN GENERAL

**Símbolos y términos de seguridad:** Los siguientes símbolos y términos se pueden encontrar en el instrumento o se pueden usar en el manual:

- El símbolo  indica que el usuario debe consultar las instrucciones de funcionamiento que se encuentran en el manual.
- El símbolo  muestra que puede haber alto voltaje en el (los) terminal (es). Use las precauciones de seguridad estándar para evitar el contacto del personal con estos voltajes.
- La palabra ADVERTENCIA explica los peligros que pueden provocar lesiones personales o la muerte. Siempre lea la información asociada a cada instrumento con mucho cuidado antes de realizar el procedimiento indicado.
- La palabra PRECAUCIÓN explica los peligros que podrían dañar los instrumentos.

**Mantenimiento y limpieza de equipos:** El polvo, el aceite corporal, el flujo de soldadura y otros contaminantes en el conector y los aislantes de los terminales pueden disminuir significativamente la resistencia a las fugas, lo que resulta en corrientes de fuga excesivas. Los contaminantes en el DUT (*Device Under Test*) y los componentes del circuito de prueba pueden crear una ruta de fuga. Las corrientes de fuga pueden ser lo suficientemente grandes como para distorsionar las mediciones de bajo nivel.

#### Recomendaciones de limpieza:

- Use gas nitrógeno seco para limpiar el polvo del tablero, del conector y los aislantes de los terminales, DUT y otros componentes del circuito de prueba.
- Si acaba de reparar un dispositivo de prueba, elimine el flujo de soldadura con agua pura junto con hisopos con punta de espuma o un cepillo suave y limpio. No permita que entre agua en el interior del instrumento.
- Para limpiar contactos de cobre aplique una gota de DeoxIT a cada uno de los contactos de los conectores. Limpie cualquier exceso de DeoxIT con un paño limpio. No utilice limpiadores abrasivos, especialmente en la pantalla.
- Para limpiar el área del terminal de entrada use un algodón empapado en alcohol isopropílico.

- Para limpiar áreas contaminadas, use metanol y limpie con hisopos con punta de espuma, luego seque con gas nitrógeno seco.
- Después de la limpieza, el accesorio de prueba (y cualquier otro dispositivo o circuito de prueba limpiado) debe dejarse secar en un ambiente de baja humedad de 50 ° C (122 ° F) durante varias horas.

**Consideraciones:** Los equipos se pueden usar dentro de un minuto después de encenderlos. Sin embargo, se recomienda encender y dejar calentar durante al menos 2 1/2 horas antes de realizar las calibraciones. Si los instrumentos han sido sometidos a temperaturas extremas (fuera de los rangos indicados posteriormente), permita que se estabilicen sus temperaturas internas. Espere una hora adicional para estabilizar una unidad que se encuentre a 10 ° C (18 ° F) fuera del rango de temperatura especificado. Lleve a cabo los procedimientos de calibración en un entorno de prueba que tenga una temperatura ambiente de 18 ° a 28 ° C (65 ° a 82 ° F) y una humedad relativa de menos del 70%.

**Precauciones:**

Manipulación:

- SIEMPRE manipule los equipos por las cubiertas.
- NUNCA coloque un recipiente con líquido en la cubierta superior. Si se derrama, el líquido entrará en la caja a través de las rejillas de ventilación y causará daños graves.
- NUNCA toque el disipador de calor ubicado en el lado derecho de la caja. Este disipador de calor podría estar lo suficientemente caliente como para causar quemaduras.
- EVITE caídas o choques de los equipos.
- NO toque ningún conector o aislante del terminal.
- NO toque las áreas adyacentes a los cuerpos del DUT ni los componentes eléctricos del circuito de prueba. Si no puede manejarlos por sus cables, use guantes de algodón limpios para instalarlos en el dispositivo de prueba.
- Para evitar la contaminación de alguna tarjeta (en especial las del sistema de conmutación) que podría degradar el rendimiento, solo maneje el conjunto de la tarjeta por los bordes y los protectores. Si se produce contaminación, limpie la tarjeta como se explica en el manual.
- Para evitar lesiones personales al manipular baterías de Litio, respete las siguientes precauciones:
  - Use gafas de seguridad cuando trabaje con baterías de litio.
  - Mantenga las baterías de litio alejadas de todos los líquidos.
  - NO intente recargar las baterías de litio.

- Observe la polaridad adecuada cuando inserte la batería en su soporte.
- NO exponga la batería a un calor excesivo ( $> 60^{\circ} C$ ).

### Eléctricas:

- SIEMPRE use el cable más corto posible para realizar las mediciones.
- Para minimizar la interferencia causada por la radiación electromagnética, use solo cables IEEE-488 blindados.
- Asegúrese de que el voltaje de la línea de alimentación coincida con el rango indicado en el panel posterior de cada equipo. Operarlos en un voltaje de línea incorrecto puede causar daños a los mismos.
- Antes de conectar un equipo a una fuente de alimentación CA, verifique que la fuente coincida con los requisitos de alimentación indicados en el panel posterior de cada equipo.
- NUNCA exceda los límites de medición especificados. Puede causar daños a los equipos.
- Algunos procedimientos requieren el uso de alto voltaje. Para evitar una descarga eléctrica que podría provocar lesiones o la muerte, NUNCA realice o rompa las conexiones mientras haya un voltaje peligroso. SIEMPRE apague los equipos y desconecte los cables de la línea de alimentación de la toma de CA.

### Funcionamiento:

- Use SOLAMENTE el manual de operación que viene con cada equipo.
- Para evitar la acumulación de calor perjudicial y, por lo tanto, garantizar un rendimiento adecuado, respete las siguientes precauciones:
  - El disipador de calor debe mantenerse libre de polvo y suciedad ya que su capacidad para disipar el calor podría deteriorarse.
  - NO coloque ningún dispositivo adyacente a los equipos que fuerce el aire en sus respiraderos o superficies de enfriamiento. Este flujo de aire adicional podría comprometer el rendimiento de precisión.
  - Las rejillas de ventilación deben mantenerse libres de obstrucciones. NO coloque ningún objeto sobre la cubierta superior. Incluso un bloqueo parcial podría perjudicar el enfriamiento adecuado.
  - Para uso en la mesa, los equipos pueden colocarse sobre una superficie dura a temperatura ambiente. Las patas de cada uno de estos los levantarán de la superficie para permitir una ventilación adecuada debajo de las unidades. NO use los equipos en una superficie suave.

- Un equipo se puede colocar encima de otro que está disipando el calor, pero se requiere espacio adicional. Para mantener la capacidad de potencia total, se requieren 1.75 *in* de espacio.
- Asegúrese de que haya un flujo de aire adecuado alrededor de los lados y la parte superior de los equipos para garantizar un enfriamiento adecuado.

**Accesorios:** Los siguientes son cables de entrada, conectores y adaptadores:

- Cable de alimentación: cable con extremo hembra que entra a la línea de CA del equipo y extremo macho que entra a una toma regulada de 110 *VCA* con conexión a tierra.
- Cables protegidos GPIB modelos 7007-1 y 7007-2: cables y conectores protegidos, con un extremo IEEE-488 macho y otro hembra, para reducir la interferencia electromagnética (EMI). El modelo 7007-1 tiene 1 *m* de longitud; el modelo 7007-2 tiene 2 *m* de longitud.
- Modelo 4802-10: coaxial de bajo ruido de 3 *m* (10 *ft*) terminado en un extremo con un conector BNC macho y en otro extremo con dos conectores tipo banana.
- CA-186-1B: adaptador de doble conector tipo banana a conector BNC macho.
- Adaptador modelo 237-TRX-T: adaptador triaxial macho de 3 ranuras a triaxial hembra doble de 3 clavijas.
- Adaptador de guarda modelo 6167: adaptador triaxial macho de 2 ranuras a triaxial hembra de 2 ranuras, con un cable fijo en un extremo a la salida Guard output del adaptador y en el otro extremo en un conector tipo banana.
- Cable triaxial modelo 7024-3: cable triaxial de bajo ruido terminado en ambos extremos con conectores triaxiales macho de 3 ranuras.
- Interruptor de bloqueo: interruptor con dos terminales tipo tornillo para bloquear o desbloquear el encendido del modelo 6221.
- Cable triaxial modelo 7025-10: cable triaxial terminado en un extremo con un conector triaxial macho de 2 ranuras y en el otro no tiene conector (pelado).
- Cable de entrada modelo 2187-4: cable de entrada de baja temperatura terminado con un conector LEMO en un extremo y dos conectores tipo banana en el otro. El cable es de 1.2 *m* (4 *ft*) de longitud.

## 2. EQUIPOS

### 2.1. Multímetro HP 3478A

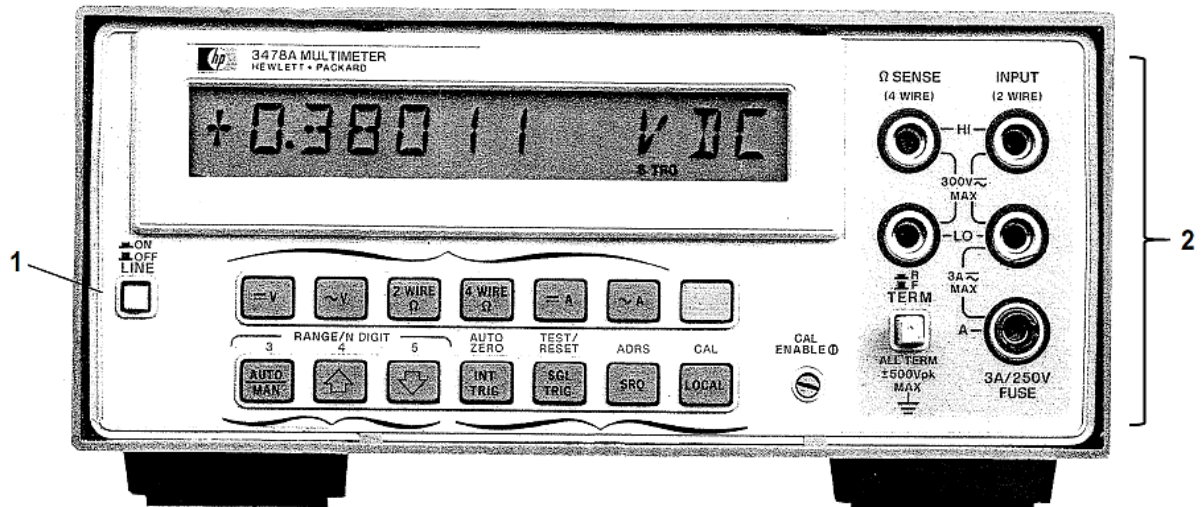
**Información general:** El multímetro Keithley 196 es un multímetro digital de sobremesa, programable a través del bus IEEE-488, con resolución seleccionable de 3½ a 5½ dígitos, 5 funciones de rango automático y máxima

entrada permitida de 3 A y 250 V. El modelo 3478A puede medir VCD, VCA, ohmios de 2 y 4 cables, y corriente de CD y CA. Además, presenta una condición de voltaje peligroso en o por encima del pico de 30 V.

<b>Especificaciones</b>	
<b>Fuente de alimentación:</b>	86 a 250 V
<b>Frecuencia de línea:</b>	48 a 440 Hz, detectados automáticamente en el encendido.
<b>Consumo de energía:</b>	25 W
<b>Entorno de funcionamiento:</b>	especificado para 0 a 55 °C. Especificado a 95% de humedad a 40 °C.
<b>Ambiente de almacenamiento:</b>	-40 a 75 °C.
<b>Calentamiento:</b>	1 hora.
<b>Dimensiones:</b>	102 mm de alto x 205 mm de ancho x 356 mm de profundidad.
<b>Peso:</b>	3 kg.

### Panel frontal

Figura 33. Panel frontal del multímetro HP 3478A.

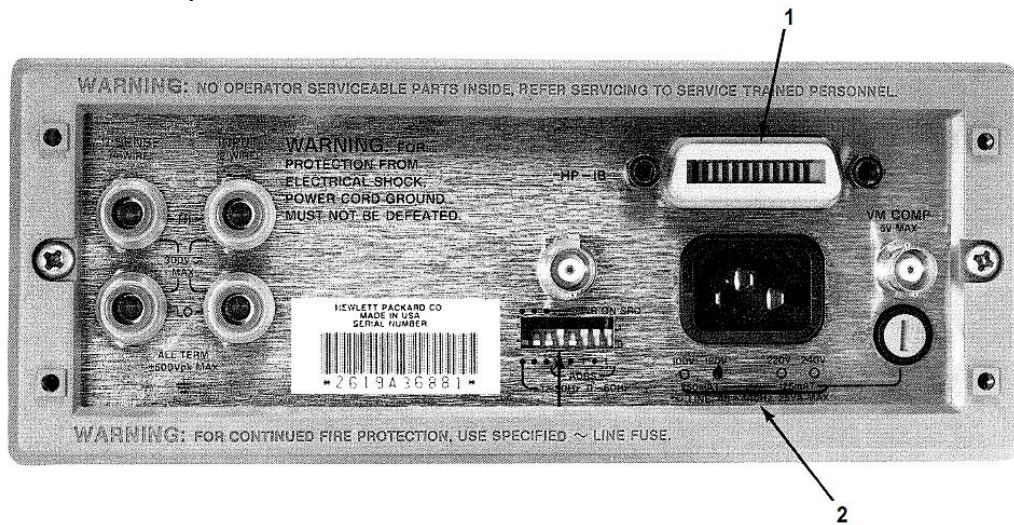


Fuente: Tomado y adaptado de 3478A Multimeter Operator's Manual.

1 – INTERRUPTOR DE ENCENDIDO: en ON enciende el modelo 3478A y en OFF lo apaga.

2 – INPUT: terminales usados para realizar mediciones de voltaje CD y CA.

Figura 34. Panel posterior del multímetro HP 3478A.



Fuente: Tomado y adaptado de 3478A Multimeter Operator's Manual.

1 – IEEE-488: conector para el funcionamiento de la tarjeta IEEE-488 (GPIB).

2 – MÓDULO DE PODER: contiene el puerto de entrada de la línea de CA al equipo y el fusible de la línea de alimentación. El instrumento se puede configurar para voltajes de línea de 86 V a 250 V y a frecuencias de línea de 48 o 440 Hz.

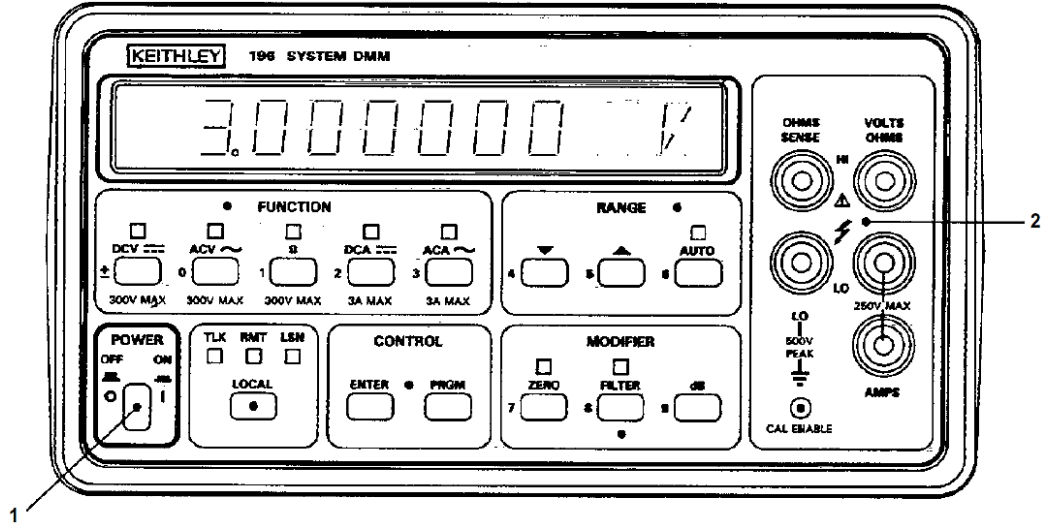
## 2.2. Multímetro Keithley 196

**Información general:** El multímetro Keithley 196 es un multímetro digital de rango automático, programable a través del bus IEEE-488, con resolución seleccionable de 6½ dígitos, 5 rangos ACD: 300  $\mu$ A, 3 mA, 30 mA, 300 mA, 3 A, 4 rangos VCD: 300 mV, 3 V, 30 V, 300 V y máxima entrada permitida de 3 A y 250 V. El modelo 196 puede medir VCD, VCA, y corriente CD y CA. Además, presenta una condición de voltaje peligroso en o por encima del pico de 30 V.

<b>Especificaciones</b>	
<b>Fuente de alimentación:</b>	105 V/ 125 V/ 210 V/ 250 V
<b>Frecuencia de línea:</b>	50 y 60 Hz, detectados automáticamente en el encendido.
<b>Tamaño de la memoria:</b>	3029999 lecturas.
<b>Consumo de energía:</b>	30 VA.
<b>Entorno de funcionamiento:</b>	especificado para 0 a 50 °C. Especificado a 80% de humedad a 35 °C.
<b>Ambiente de almacenamiento:</b>	–25 a 65 °C.
<b>Calentamiento:</b>	2 horas.
<b>Dimensiones:</b>	127 mm de alto x 216 mm de ancho x 359 mm de profundidad.
<b>Peso:</b>	3.7 kg.

## Panel frontal

Figura 35. Panel frontal del multímetro Keithley 196.



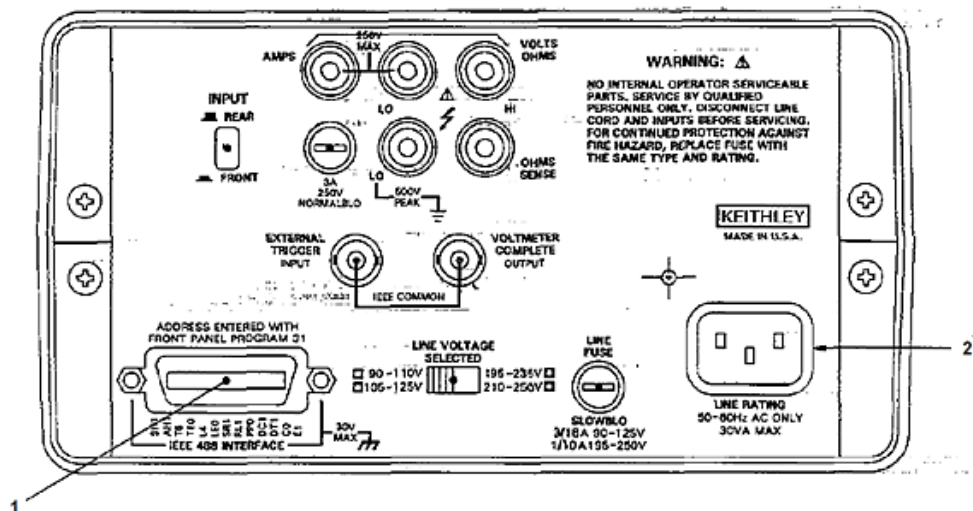
Fuente: Tomado y adaptado de Model 196 System DMM Instruction Manual.

1 – INTERRUPTOR DE ENCENDIDO: en ON enciende el modelo 196 y en OFF lo apaga.

2 – AMPS and LO: terminales usados para realizar mediciones de corriente CD y CA.

## Panel posterior

Figura 36. Panel posterior del multímetro Keithley 196.



Fuente: Tomado y adaptado de Model 196 System DMM Instruction Manual.

1 – IEEE-488: conector para el funcionamiento de la tarjeta IEEE-488 (GPIB).

2 – MÓDULO DE PODER: contiene el puerto de entrada de la línea de CA al equipo y el fusible de la línea de alimentación. El instrumento se puede configurar para voltajes de línea de 105 V a 250 V y a frecuencias de línea de 50 o 60 Hz.

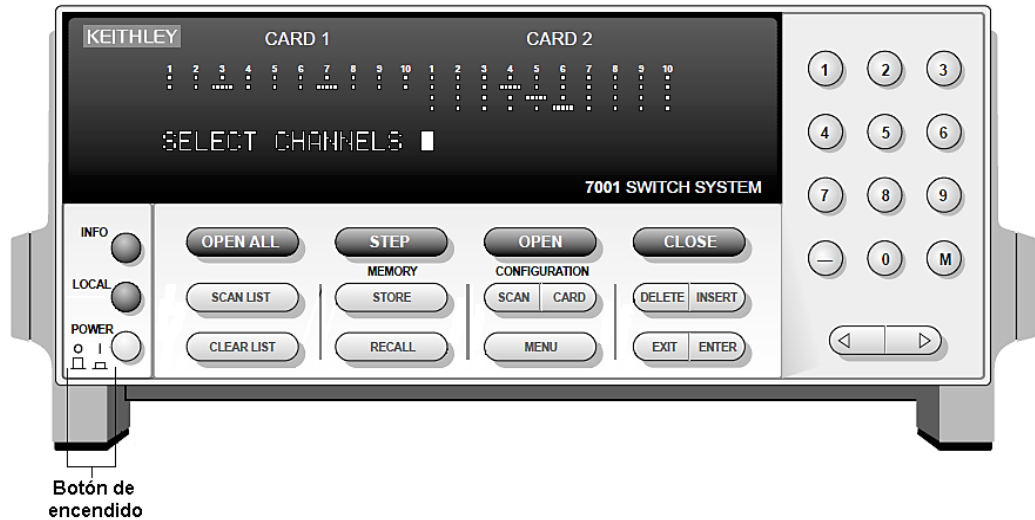
### 2.3. Sistema de conmutación Keithley 7001

**Información general:** El sistema de conmutación Keithley 7001 es un dispositivo que permite la integración y automatización de sistemas de prueba en una sola caja. A su vez, establece un proceso de conmutación entre la fuente de corriente y los demás equipos de medición. Las capacidades de conmutación de este modelo van desde los nanovoltios hasta un voltaje máximo de 250 VCA y 350 VCD y desde los femtoamperios hasta una corriente máxima de 1 A [9]. Además, cuenta con una tarjeta modelo 7065 (cuyo voltaje máximo es 3 V) con cuatro extremos triaxiales hembra, un conector tipo BNC hembra y un conector tipo banana.

Especificaciones	
<b>Conector de entrada:</b>	BNC en el panel trasero.
<b>Fuente de alimentación:</b>	100 V / 120 V / 220 V / 240 V.
<b>Frecuencia de línea:</b>	50 y 60 Hz, detectados automáticamente en el encendido.
<b>Capacitancia máxima de entrada:</b>	10 nF en todos los rangos de nA y en el rango de 2 µA; 1 µF en rangos de 20 µA y 200 µA y en rangos de mA.
<b>Voltaje máximo del modo común:</b>	42 V.
<b>Tamaño de la memoria:</b>	2500 lecturas.
<b>Consumo de energía:</b>	50 VA.
<b>Entorno de funcionamiento:</b>	especificado para 0 a 50 °C. Especificado a 80% de humedad a 35 °C.
<b>Ambiente de almacenamiento:</b>	-25 a 65 °C.
<b>Calentamiento:</b>	1 hora.
<b>Dimensiones:</b>	90 mm de alto x 214 mm de ancho x 369 mm de profundidad. Con asas y patas: 105 mm de alto x 239 mm de ancho x 369 mm de profundidad.
<b>Peso:</b>	2.8 kg.
<b>Garantía:</b>	3 años.

## Panel frontal

Figura 37. Panel frontal del sistema de conmutación Keithley 7001.

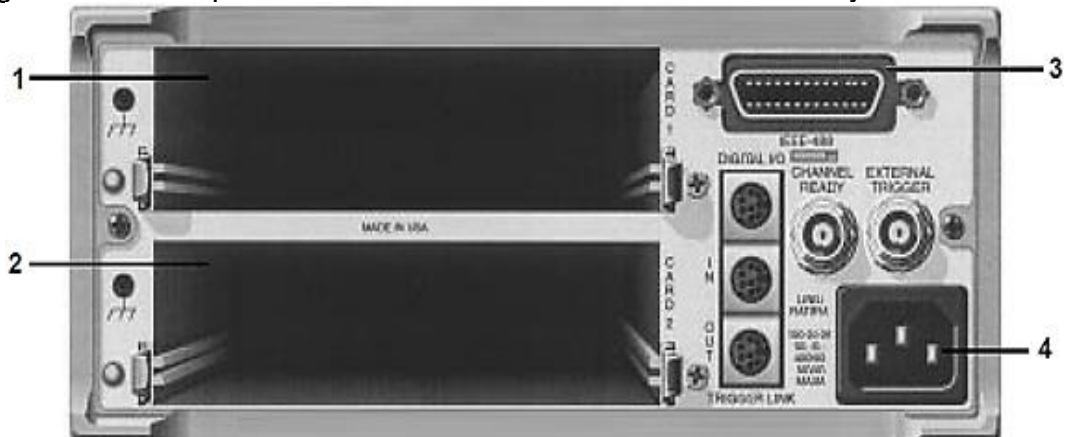


Fuente: Tomado y adaptado de Model 7001 Switch System Instruction Manual.

INTERRUPTOR DE ENCENDIDO: En la posición (I) enciende el modelo 7001 y en la posición (O) lo apaga.

## Panel posterior

Figura 38. Panel posterior del sistema de conmutación Keithley 7001.



Fuente: Tomado y adaptado de Model 7001 Switch System Instruction Manual.

1 – TARJETA 1: Ranura 1 para cambiar de tarjeta. Corresponde a los canales de la tarjeta 1 (tarjeta modelo 7065).

2 – TARJETA 2: Ranura 2 para cambiar de tarjeta. Corresponde a la tarjeta 2 de la pantalla de estado del canal.

3 – IEEE-488: Conector para el funcionamiento de la tarjeta IEEE-488 (GPIB).

4 – MÓDULO DE PODER: Contiene el puerto de entrada de la línea de CA al equipo y el fusible de la línea de alimentación. El instrumento se puede configurar para voltajes de línea de 100 V a 240 VCA a frecuencias de línea de 50 o 60 Hz.

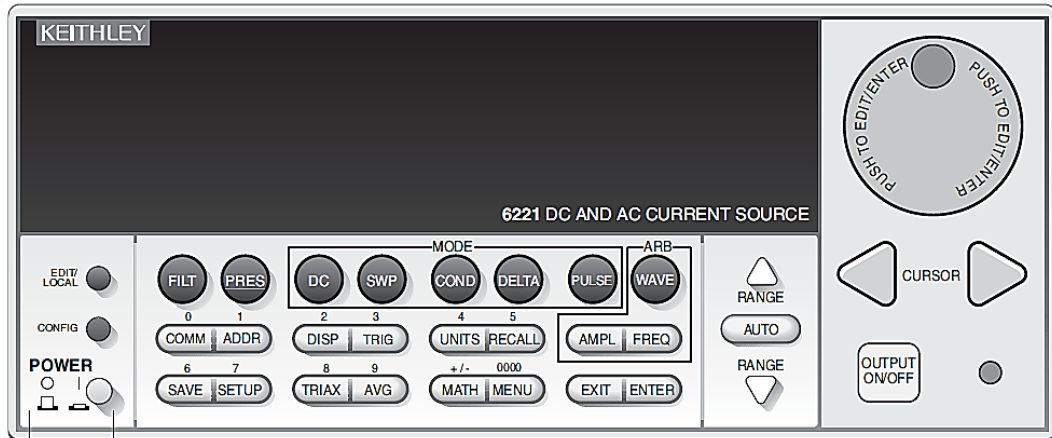
#### 2.4. Fuente de corriente AC/DC Keithley 6221

**Información general:** La fuente de corriente AC/DC Keithley 6221 es un equipo generador de corriente estática constante que tienen la posibilidad de entregar tanto CA como CD, proporcionando corrientes muy estables, con formas de onda sinusoidales o arbitrarias [18]. Este modelo presenta nueve rangos de suministro de corriente que van desde 100 fA hasta 105 mA, voltajes que van desde 0.1 V hasta 105 V con pasos de 10 mV y potencia de salida máxima de 11 W [7].

Especificaciones	
<b>Fuente de alimentación:</b>	100 V / 120 V / 220 V / 240 V.
<b>Frecuencia de línea:</b>	50 Hz y 60 Hz, detectados automáticamente en el encendido.
<b>Precisión:</b>	$\pm 1$ mV.
<b>Salida de guardia:</b>	Capacitancia máxima de carga: 10 nF. Corriente máxima de carga: 1 mA.
<b>Voltaje máximo del modo común:</b>	250 V <sub>rms</sub> .
<b>Resistencia de salida:</b>	$10^{14}$ Ω.
<b>Capacitancia de salida:</b>	10 pF.
<b>Tamaño de la memoria:</b>	65536 lecturas.
<b>Consumo de energía:</b>	120 VA.
<b>Entorno de funcionamiento:</b>	especificado para 0 a 50 °C. Especificado a 80% de humedad a 35 °C.
<b>Ambiente de almacenamiento:</b>	-25 a 65 °C.
<b>Calentamiento:</b>	1 hora.
<b>Dimensiones:</b>	89 mm de alto x 213 mm de ancho x 370 mm de profundidad.
<b>Peso de envío:</b>	2.5 Kg.
<b>Garantía:</b>	1 año.

## Panel frontal

Figura 39. Panel frontal de la fuente de corriente AC/DC Keithley 6221.



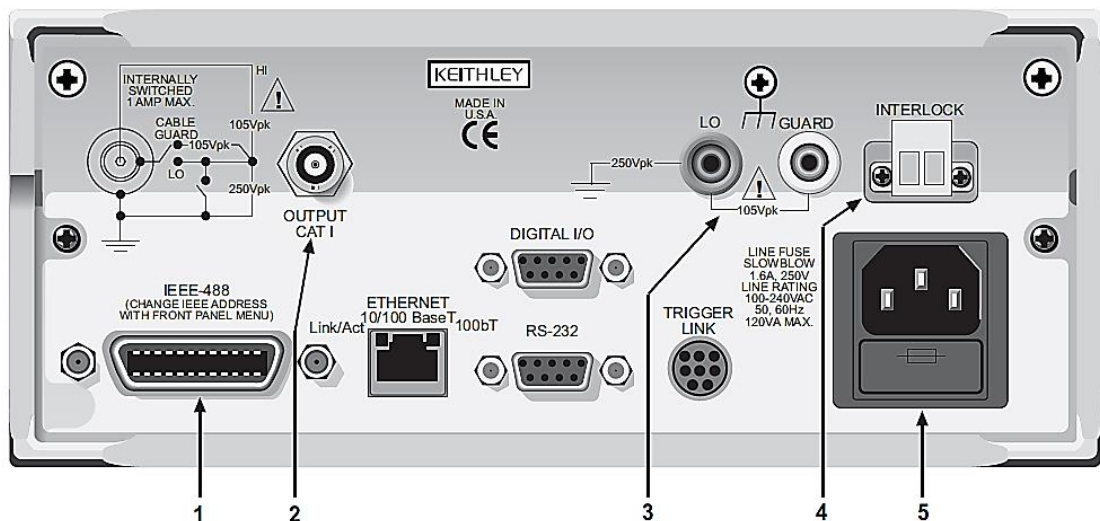
Botón de encendido

Fuente: Tomado y adaptado de Model 6220 DC Current Source. Model 6221 AC and DC Current Source. Reference Manual.

**INTERRUPTOR DE ENCENDIDO:** En la posición (I) enciende el 6221 y en la posición (O) lo apaga.

## Panel posterior

Figura 40. Panel posterior de la fuente de corriente AC/DC Keithley 6221.



Fuente: Tomado y adaptado de Model 6220 DC Current Source. Model 6221 AC and DC Current Source. Reference Manual.

1 – IEEE-488: Conector para el funcionamiento de la tarjeta IEEE-488 (GPIB). Use un cable blindado, como los modelos 7006, 7007 o 7008.

2 – SALIDA: Conector triaxial hembra de 3 terminales para salida de fuente de corriente.

3 – LO y GUARDA: Conectores de seguridad tipo banana para salida baja y conector Guarda tipo banana.

4 – BLOQUEO: Conector de bloqueo: proporciona dos terminales tipo tornillo para la conexión a un interruptor de bloqueo. Cuando el interruptor de bloqueo está cerrado, la SALIDA del 6221 está habilitada, lo que permite que se encienda. Cuando se abre el interruptor de bloqueo, la SALIDA se deshabilita (la SALIDA no se puede encender y se apagará si estaba encendida).

5 – MÓDULO DE PODER: Contiene el puerto de entrada de la línea de CA al equipo y el fusible de la línea de alimentación. El instrumento se puede configurar para voltajes de línea de 100 V a 240 VCA a frecuencias de línea de 50 o 60 Hz.

## 2.5. Nanovoltímetro Keithley 2182A

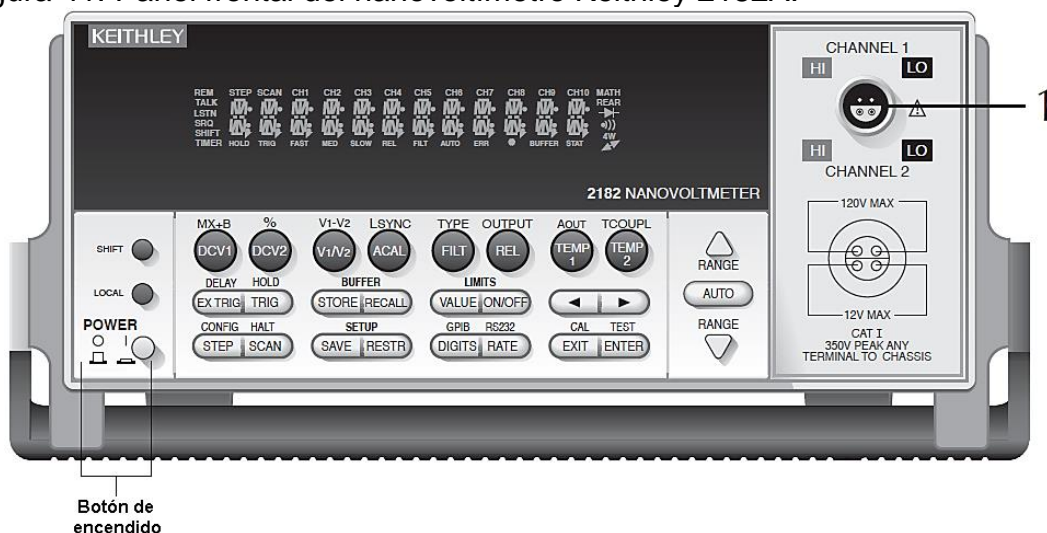
**Información general:** El nanovoltímetro Keithley 2182A es un equipo que mide voltajes muy bajos. Su característica distintiva es su sensibilidad al voltaje, la cual puede ser tan buena como  $1\text{ pV}$  [6]. Este modelo tiene dos canales de entrada y dos funciones para medir voltaje: DCV1, disponible para el canal de entrada 1, y DCV2, disponible para el canal de entrada 2. DCV1 tiene cinco rangos de medición ( $10\text{ mV}$ ,  $100\text{ mV}$ ,  $1\text{ V}$ ,  $10\text{ V}$  y  $100\text{ V}$ ) y puede medir voltajes desde  $1\text{ nV}$  hasta  $120\text{ V}$ . DCV2 tiene tres rangos de medición ( $100\text{ mV}$ ,  $1\text{ V}$  y  $10\text{ V}$ ) y puede medir voltajes desde  $10\text{ nV}$  hasta  $12\text{ V}$  [10]. Las entradas HI y LO del canal 1 tienen una capacidad de medición máxima de  $120\text{ V}$  (use el canal 1 SIEMPRE que sea posible para medir voltaje por debajo de  $1\text{ V}$ ). Las entradas HI y LO del canal 2 tienen una capacidad de medición máxima de  $12\text{ V}$ . Además, existe una condición de voltaje peligroso en o por encima del pico de  $42\text{ V}$ .

Especificaciones	
<b>Fuente de alimentación:</b>	$100\text{ V} / 120\text{ V} / 220\text{ V} / 240\text{ V}$ .
<b>Frecuencia de línea:</b>	$50\text{ Hz}$ , $60\text{ Hz}$ , y $400\text{ Hz}$ , detectados automáticamente en el encendido.
<b>Precisión:</b>	$\pm (0.1\% \text{ de salida} + 1\text{ mV})$ .
<b>Salida máxima:</b>	$\pm 1.2\text{ V}$ .
<b>Corriente máxima del modo común:</b>	$50\text{ nA}$ .
<b>Resistencia de salida:</b>	$1\text{ K}\Omega \pm 5\%$ .

<b>Tamaño de la memoria:</b> 1024 lecturas.
<b>Consumo de energía:</b> 22 VA.
<b>Entorno de funcionamiento:</b> especificado para 0 a 50 °C. Especificado a 80% de humedad a 35 °C.
<b>Ambiente de almacenamiento:</b> -40 a 70 °C.
<b>Calentamiento:</b> 2.5 horas.
<b>Dimensiones:</b> 89 mm de alto x 213 mm de ancho x 370 mm de profundidad.
<b>Peso de envío:</b> 2.8 Kg.
<b>Garantía:</b> 3 años.

## Panel frontal

Figura 41. Panel frontal del nanovoltímetro Keithley 2182A.



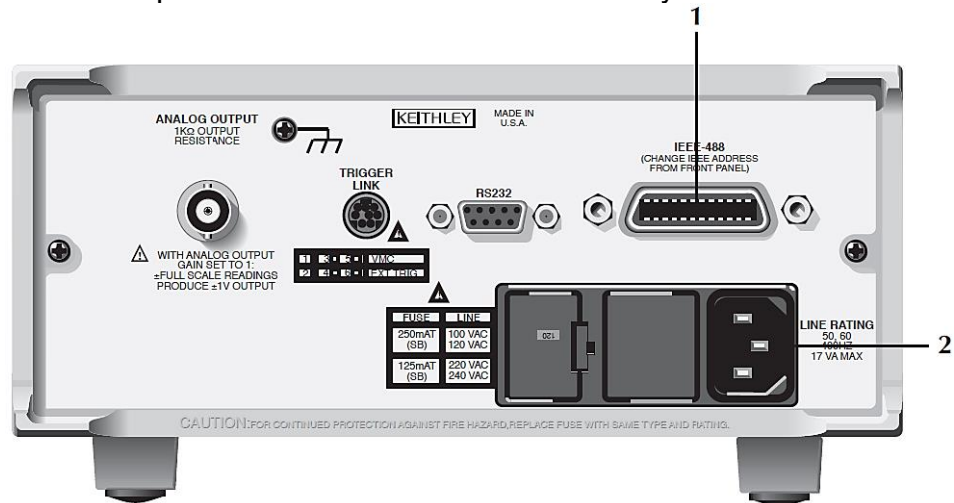
Fuente: Tomado y adaptado de Model 2182A Nanovoltmeter. User's Manual.

**INTERRUPTOR DE ENCENDIDO:** En la posición (I) enciende el 2182A y en la posición (O) lo apaga.

**1 – CONECTOR DE ENTRADA:** Los canales 1 y 2 miden voltaje o temperatura.

## Panel posterior

Figura 42. Panel posterior del nanovoltímetro Keithley 2182A.



Fuente: Tomado y adaptado de Model 2182A Nanovoltmeter. User's Manual.

1 – IEEE-488: Conector para el funcionamiento de la tarjeta IEEE-488 (GPIB). Use un cable blindado, como los modelos 7007-1 y 7007-2.

2 – MÓDULO DE PODER: Contiene el puerto de entrada de la línea de CA al equipo y el fusible de la línea de alimentación. El instrumento se puede configurar para voltajes de línea de 100 V / 120 V / 220 V / 240 VCA a frecuencias de línea de 45 Hz a 66 Hz a 66 Hz o de 360 Hz a 440 Hz.

### 2.6. Picoamperímetro Keithley 6485

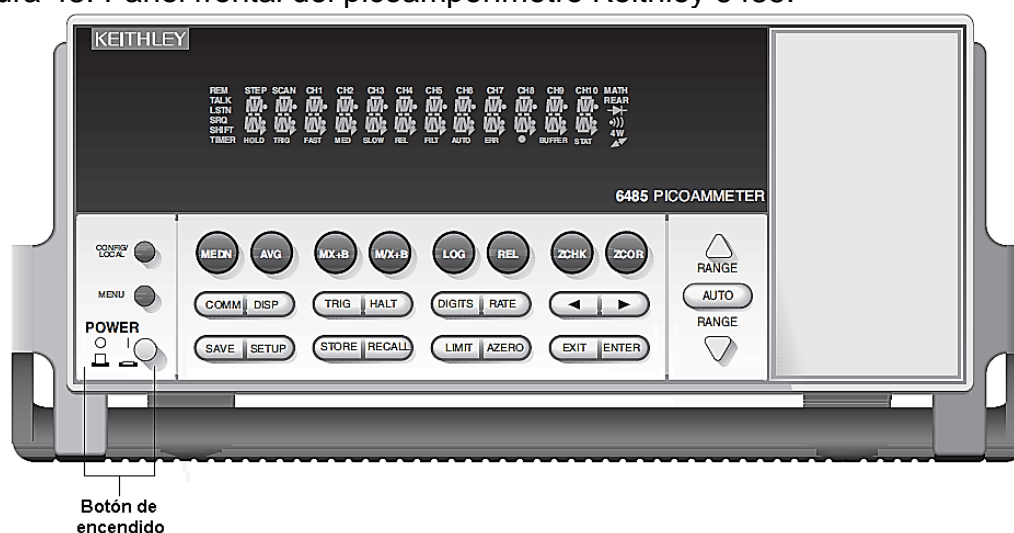
**Información general:** El picoamperímetro Keithley 6485 es un equipo que mide corrientes eléctricas muy bajas, usualmente desde 20 fA hasta 21 mA [5] y presenta ocho rangos de medición que van desde 20 mA hasta 2 nA [8]. El máximo voltaje de entrada es 220 V y la máxima corriente de entrada 21 mA, respectivamente. Además, existe una condición de voltaje peligroso en o por encima del pico de 42 V.

Especificaciones	
<b>Fuente de alimentación:</b>	100 V / 120 V / 220 V / 240 V.
<b>Frecuencia de línea:</b>	50 Hz, 60 Hz, y 400 Hz, detectados automáticamente en el encendido.
<b>Capacitancia máxima de entrada:</b>	10 nF en todos los rangos de nA y en el rango de 2 μA; 1 μF en rangos de 20 μA y 200 μA y en rangos de mA.
<b>Voltaje máximo del modo común:</b>	42 V.
<b>Tamaño de la memoria:</b>	2500 lecturas.

<b>Consumo de energía:</b> 30 VA.
<b>Entorno de funcionamiento:</b> especificado para 0 a 50 ° C. Especificado a 70% de humedad a 35 ° C.
<b>Ambiente de almacenamiento:</b> –25 a 65 ° C.
<b>Calentamiento:</b> 1 hora.
<b>Dimensiones:</b> 90 mm de alto x 214 mm de ancho x 369 mm de profundidad.
<b>Peso:</b> 2.8 Kg.

## Panel frontal

Figura 43. Panel frontal del picoamperímetro Keithley 6485.

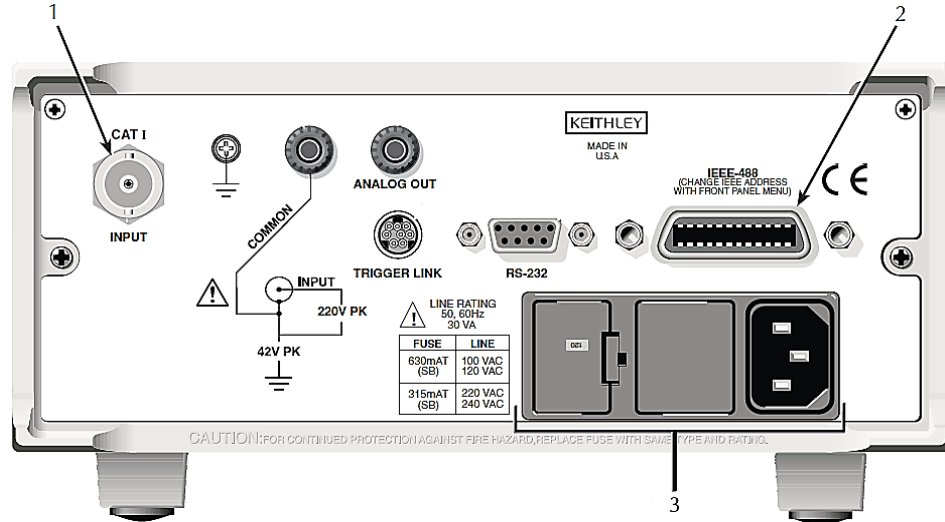


Fuente: Tomado y adaptado de Model 6485 Picoammeter. Instruction Manual.

**INTERRUPTOR DE ENCENDIDO:** En la posición (I) enciende el 6485 y en la posición (O) lo apaga.

## Panel posterior

Figura 44. Panel posterior del picoamperímetro Keithley 6485.



Fuente: Tomado y adaptado de Model 6485 Picoammeter. Instruction Manual.

1 – ENTRADA: Este conector BNC (*Bayonet Neill-Concelman*) hembra estándar se usa para conectar la señal que se medirá a la entrada del modelo 6485. Se acopla a un cable BNC.

2 – IEEE-488: Conector para el funcionamiento de la tarjeta IEEE-488 (GPIB). Use un cable blindado, como los modelos 7007-1 y 7007-2.

3 – MÓDULO DE PODER: Contiene el puerto de entrada de la línea de CA al equipo y el fusible de la línea de alimentación. El instrumento se puede configurar para voltajes de línea de 115 V y 230 VCA a frecuencias de línea de 50 o 60 Hz.

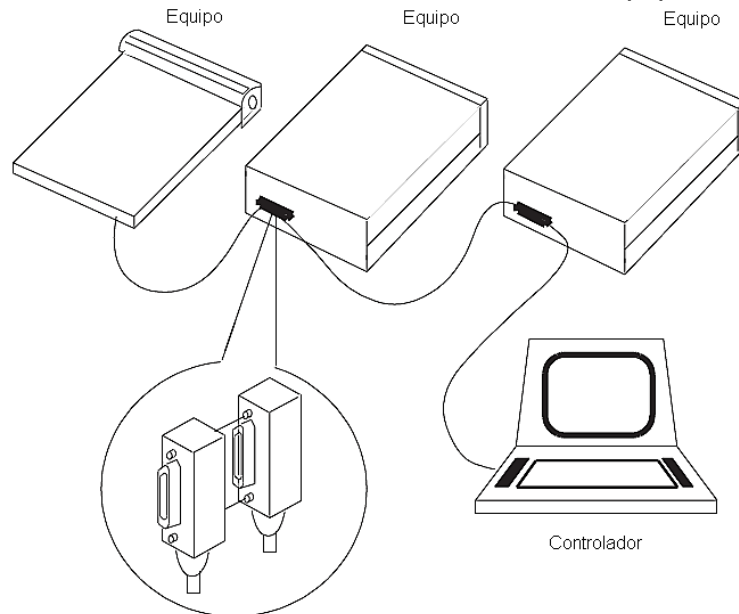
### 3. CONEXIONES DEL MONTAJE

**Conexión a la entrada IEEE-488:** Siga el procedimiento a continuación para conectar los equipos a la entrada IEEE-488 (*figura 45*):

1. Alinee el conector de cada cable GPIB modelo 7007-1 o 7007-2 con el conector ubicado en el panel posterior de cada equipo. El conector está diseñado para que se ajuste de una sola manera.
2. Apriete los tornillos firmemente, asegurándose de no apretarlos demasiado.
3. Conecte cualquier equipo adicional, a través del cable GPIB, según sea necesario para su aplicación (sólo puede tener 15 dispositivos conectados a la GPIB, incluyendo el controlador).

4. Asegúrese de que el controlador GPIB BUS-HS esté correctamente conectado a uno de los extremos libres del cable GPIB.

Figura 45. Conexiones a la entrada IEEE-488 de cada equipo.



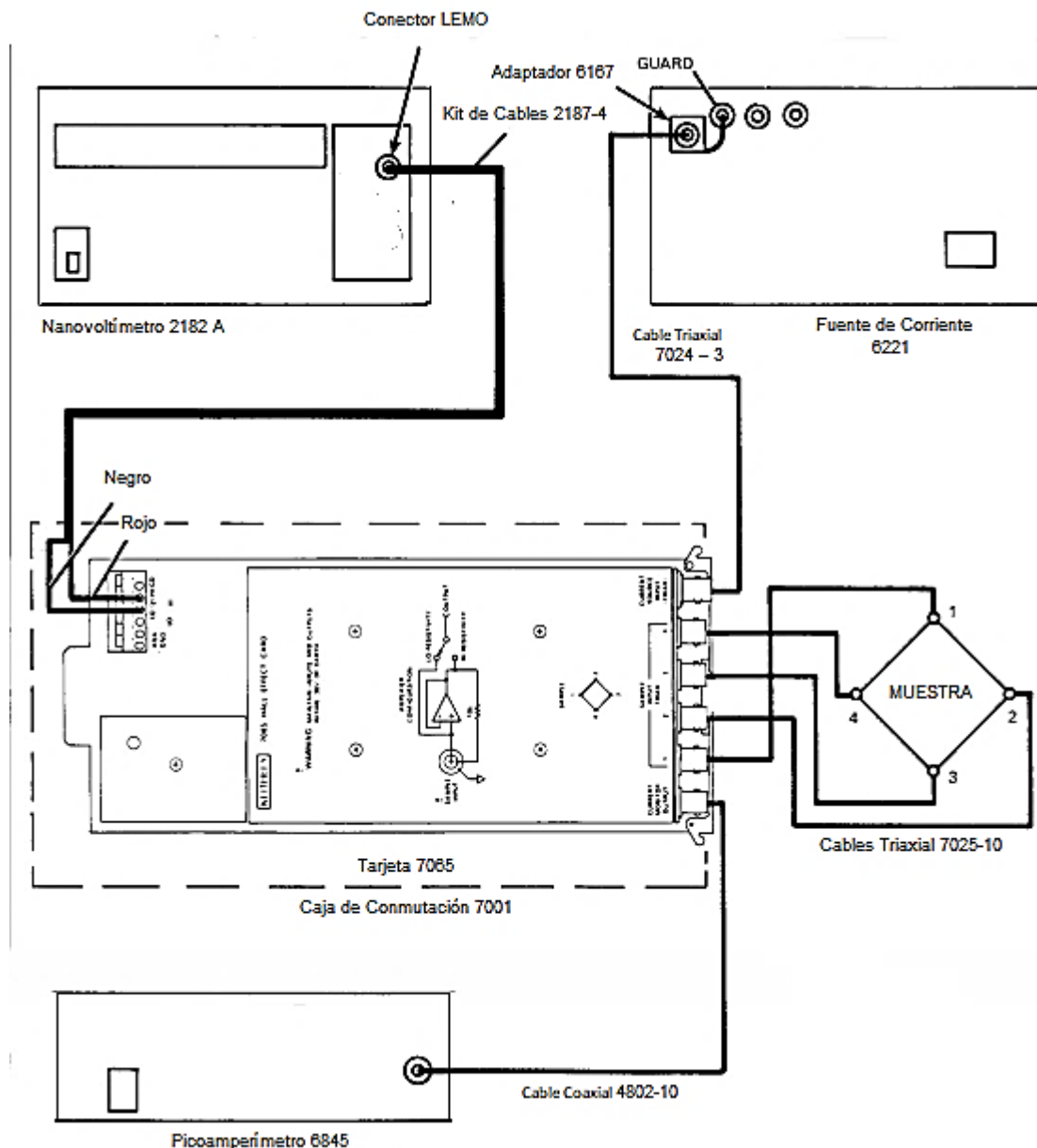
Fuente: Tomado y adaptado de Model 6220 DC Current Source. Model 6221 AC and DC Current Source. Reference Manual.

**Conexiones a la fuente de corriente Keithley 6221:** Siga el procedimiento a continuación para realizar las conexiones a la fuente de corriente:

- Conecte el extremo macho del adaptador modelo 237-TRX-T a la entrada 2 – del panel posterior (OUTPUT) de la fuente de corriente.
- Conecte el extremo macho del adaptador de guarda modelo 6167 sobre el extremo hembra del adaptador modelo 237-TRX-T.
- Conecte el extremo con conector tipo banana del cable que sale del Guard output, fijo en el adaptador de guarda, a la entrada 3 – del panel posterior (GUARD).
- Conecte el interruptor de bloqueo a la entrada 4 – del panel posterior (INTERLOCK).

**Conexiones al sistema de conmutación Keithley 7001:** Siga el procedimiento a continuación para realizar las conexiones al sistema de conmutación (*figura 46*):

Figura 46. Conexiones de los equipos al sistema de conmutación Keithley 7001.



Fuente: Tomado y adaptado de Model 7065 Hall Effect Card. Instruction Manual.

- Conecte un extremo del cable triaxial modelo 7024-3 al extremo libre del adaptador de guarda modelo 6167 y el otro a la tarjeta 7065 del sistema de conmutación.
- Conecte el extremo con conector LEMO del cable de entrada modelo 2187-4 a la entrada 1 – del panel frontal del nanovoltímetro y el otro extremo con conectores tipo banana a la tarjeta 7065 del sistema de conmutación.
- Conecte el extremo con conector BNC macho del modelo 4802-10 a la tarjeta 7065 del sistema de conmutación y el otro extremo con dos conectores tipo banana al adaptador CA-186-1B. A su vez, conecte el

extremo con conector BNC del adaptador a la entrada 1 – (INPUT) del panel posterior del picoamperímetro.

- Conecte los extremos macho de los cuatro cables triaxiales modelo 7025-10 a la tarjeta 7065 del sistema de conmutación y los extremos libres a la muestra, por medio de un alambre delgado.

**Conexión a la línea de alimentación:** Siga el procedimiento a continuación para conectar los equipos a la línea de alimentación y encenderlos:

1. Verifique que el voltaje de línea indicado sea el correcto para el voltaje de operación de cada equipo.
2. Antes de enchufar el cable de alimentación, asegúrese de que el interruptor de poder del panel frontal esté en la posición de apagado (O).
3. Conecte el extremo hembra del cable de alimentación al puerto de entrada de CA en el panel posterior de cada equipo. Conecte el otro extremo del cable de alimentación a una toma de CA con conexión a tierra.
4. Encienda cada instrumento presionando el interruptor de encendido del panel frontal a la posición de encendido (I).

ADVERTENCIA: El cable de alimentación contiene un cable a tierra separado, para usar con tomacorrientes con conexión a tierra.

## 4. LABVIEW

*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabVIEW)* es un software y entorno de desarrollo con un lenguaje de programación gráfico para diseñar sistemas con aplicaciones que requieren pruebas, medidas y control con acceso rápido a información de datos y hardware [2]. Los programas que se desarrollan con LabVIEW se llaman Instrumentos Virtuales (VI). Cada VI consta de dos ventanas: ventana del panel frontal y el diagrama de bloques.

### 4.1. Virtual Instrument desarrollado para las mediciones:

ResisUIScnt\_2019.vi fue el VI desarrollado en LabVIEW para realizar el proceso de medición de resistividad eléctrica usando el método de van der Pauw. Este VI cuenta con tres (3) pestañas:

## 1. Información del experimento:

Figura 47. Pestaña de información del experimento.

The screenshot shows a software interface for an experiment. At the top, there is a navigation bar with tabs: 'Toma de datos', 'Contactos', 'Configuración', 'Información del Experimento' (the active tab), 'Nuevo Experimento', 'Iniciar', and 'Finalizar Experimento'. The main content area is divided into several sections. On the left, there is a 'Tipo Medida' section with five radio button options: 'r, Van der Pauw', 'r, Barra', 'r, 4 ptas en línea', 'mH, Van der Pauw', and 'mH, Barra'. Next to it is an 'Archivo de Datos' section with a text input field. Below these is a 'Dimensiones de la Muestra y Parámetros Externos' section containing several input fields: 'Campo magnético [mT]' (0.00), 'Espesor de la muestra [mm]' (1.00000), 'Área transversal [mm^2]' (0.0000), 'Largo de la Barra [mm]' (0.0000), and four distance fields between electrodes (all 0.0000). On the right side, there is an 'Información de la muestra' section with fields for 'Muestra fabricada por:', 'Nombre de la Muestra', 'Operario del equipo', and 'Código de la Muestra', and a large text area for 'Observaciones del experimento'. Numbered callouts 1, 2, 3, and 4 point to these sections respectively.

Fuente: Autores.

1 – TIPO DE MEDIDA: Permite elegir el tipo de medida (resistividad eléctrica o movilidad Hall) y el método de medición que se va a utilizar para realizar toma de datos (por defecto se usa “r, Van der Pauw” para medir resistividad eléctrica).

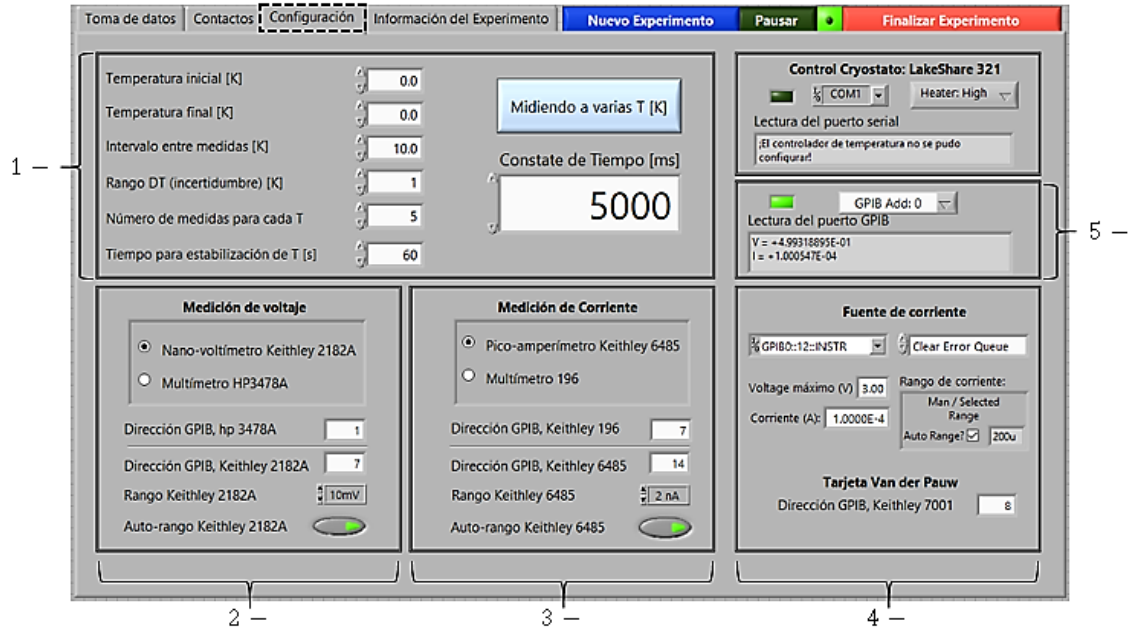
2 – ARCHIVO DE DATOS: Muestra la ubicación, en el disco duro del computador, donde se almacenarán los datos recolectados en las mediciones.

3 – DIMENSIONES DE LA MUESTRA Y PARÁMETROS EXTERNOS: Para el caso de medidas de resistividad, permite ingresar el valor del espesor de las muestras. Para el caso de medidas de movilidad Hall, permite ingresar largo y área transversal de las muestras; la distancia de separación entre los contactos ubicados en la muestra y el campo magnético externo aplicado.

4 – INFORMACIÓN DE LA MUESTRA: Permite introducir el nombre de la persona o empresa que fabricó la muestra, el nombre y código de la muestra, el operario de los equipos y algunas observaciones acerca del experimento si se requieren.

## 2. Configuración:

Figura 48. Pestaña de configuración.



Fuente: Autores.

1 – Permite modificar parámetros experimentales relacionados al control de temperatura y tiempo –temperatura inicial, temperatura final (temperatura a la cual el VI finaliza la toma de datos), intervalo entre medidas de temperatura, número de medidas para cada temperatura (ayuda a finalizar las mediciones realizadas por el VI, es decir, evita que se quede en bucle tomando medidas) y el tiempo de espera para la estabilización de la temperatura (por defecto es 1 *min*). Además, permite dar la orden para iniciar la medición (botón “Midiendo a varias T”) y escoger el intervalo de tiempo entre medidas (introduce un retardo en la toma de medidas. Por defecto es de cinco segundos).

2 – MEDICIÓN DE VOLTAJE: Permite la elección del equipo que se desea utilizar para la medición de voltaje (el nanovoltímetro Keithley 2182A o el multímetro HP3478A), el ingreso de sus respectivas direcciones GPIB, así como la elección del rango de medición (por defecto es auto-rango. Al activar esta función, el instrumento pasa automáticamente al rango disponible más sensible. Al desactivar la función es necesario escoger el rango manualmente para medir la señal aplicada).

3 – MEDICIÓN DE CORRIENTE: Permite la elección del equipo que se desea utilizar para la medición de corriente (el picoamperímetro Keithley

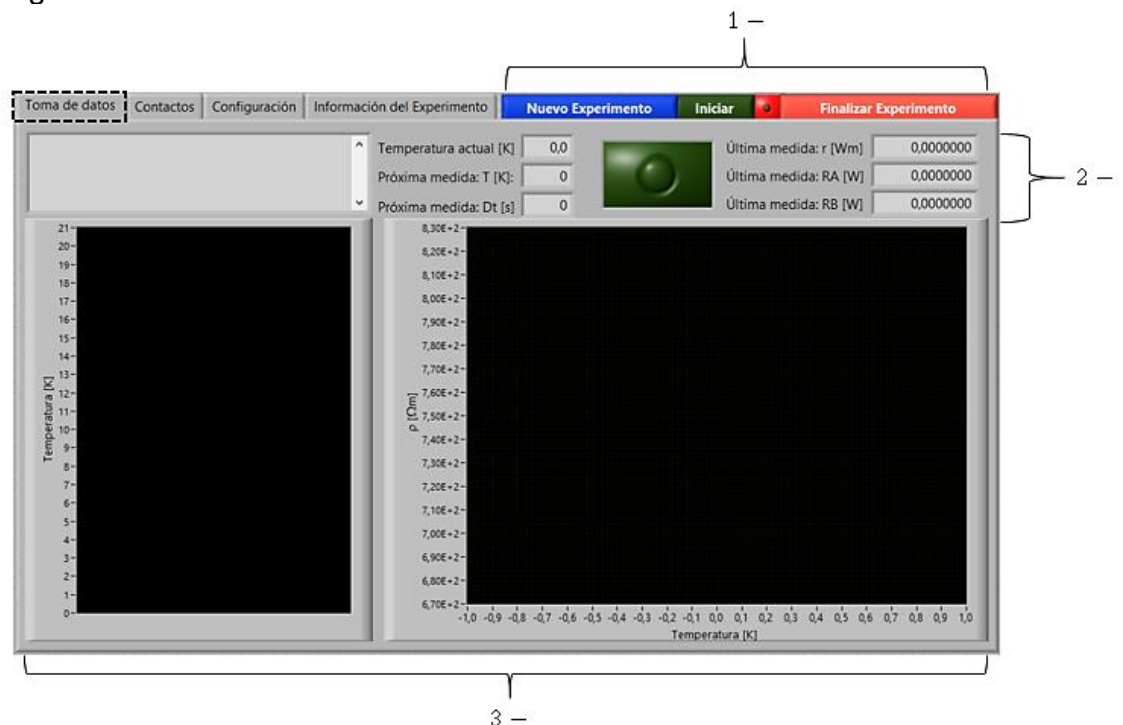
6485 o el multímetro Keithley 196), el ingreso de sus respectivas direcciones GPIB, así como la elección del rango de medición (por defecto es auto-rango. Al activar esta función, el instrumento pasa automáticamente al rango disponible más sensible. Al desactivar la función es necesario escoger el rango manualmente para medir la señal aplicada).

4 – Permite ingresar el voltaje (el valor máximo para evitar daños en la tarjeta del sistema de conmutación Keithley 7001 es 3 V) y la corriente (el valor máximo es 105 mA), suministrada por la fuente de corriente Keithley 6221 (por defecto elige la función auto-rango y muestra el rango apropiado elegido automáticamente para el valor de corriente suministrado), así como la dirección GPIB de dichos equipos.

5 – Muestra las mediciones de voltaje  $V$  y corriente  $I$ .

### 3. Toma de datos:

Figura 49. Pestaña de toma de datos.



Fuente: Autores.



1 – Permite iniciar y finalizar un nuevo experimento.

2 – Muestra las mediciones de resistencia  $RA$  ( $R_{MN,OP}$ ) y  $RB$  ( $R_{NO,PM}$ ) y resistividad  $r$ .

3 – Muestra los valores de temperatura  $T$  y la gráfica de resistividad  $\rho$  vs. temperatura  $T$ .

## 5. MEDICIONES

Siga el procedimiento a continuación para medir resistividad eléctrica:

- Prenda todos los equipos y déjelos calentar el tiempo especificado para cada uno de ellos.
- Abra el VI ResisUIScnt\_2019.vi y siga el siguiente protocolo para usarlo correctamente: Para iniciar la toma de mediciones es obligatorio establecer los valores de voltaje, corriente, constante de tiempo y número de medidas para cada  $T$ . Posteriormente, se debe activar el botón “Midiendo a varias  $T$ ” ubicado en la pestaña de configuración y oprimir el botón  (botón “run”), ubicado en cualquiera de los dos paneles del software, para poner el VI en funcionamiento. Por último, una vez oprimido el botón “run”, el VI realiza una verificación de los equipos conectados y requiere información acerca de la muestra y del operario que realiza las mediciones (los datos requeridos al iniciar el programa son obligatorios y si no son ingresados, no es posible que el programa comience su operación). Las mediciones terminan cuando se alcanza el número de medidas ingresado y el VI termina su ejecución al oprimir el botón  (Abort Execution), ubicado en cualquiera de los dos paneles del software.
- Una vez finalizadas las mediciones, apague todos los equipos y desconéctelos de la línea de alimentación.