

Implementación de un sistema de caracterización eléctrica enfocado en materiales  
fotovoltaicos mediante el método de Van der Pauw

Erika Lizeth Burgos Báez y Jimena Nataly Noy Salamanca

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniera Electrónica

Directora

Mónica Andrea Botero Londoño

Doctora en Ciencias Físicas

Codirectora

María Alejandra Mantilla Villalobos

Doctora en Ingeniería Electrónica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2020

**Tabla de Contenido**

Introducción .....	12
1. Objetivos .....	15
1.1 Objetivo General .....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Marco Referencial.....	16
2.1 Conductividad en Semiconductores.....	17
2.1.1 Semiconductores intrínsecos y extrínsecos.....	17
2.1.2 Portadores de carga.....	20
2.1.3 Modelos de enlaces y de bandas.....	20
2.1.4 Contacto Metal-Semiconductor.....	21
2.1.5 Conductividad eléctrica .....	23
2.1.6 Resistencia y Resistividad.....	23
2.2 Método de Van der Pauw.....	25
2.2.1 Factores de corrección .....	29
2.2.2 Configuraciones para cálculo de la Resistividad .....	31
2.3 Programación gráfica .....	33
2.3.1 Estructura del programa LabVIEW .....	33
2.3.1.1 Módulos Instrumentos virtuales (VI) Keithley.....	33
3. Metodología .....	41
3.1. LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench).....	41
3.2 Equipos utilizados.....	44
3.2.1 Nanovoltímetro .....	45

3.2.2 Picoamperímetro .....	45
3.2.3 Modelo funcional de medición de conductividad eléctrica en películas delgadas semiconductoras.....	46
3.2.4 Configuración y Manejo de equipos mediante el software.....	47
3.3 Conexiones en el sistema .....	48
4. Resultados .....	52
4.1 Interfaz en el software.....	52
4.2. Programación del software .....	57
4.3 Verificación del funcionamiento del sistema.....	59
4.3.1 Película Oxido de Estaño dopado con Flúor (FTO). .....	59
4.3.2 Película delgada de Sulfuro de Estaño (SnS).....	61
4.3.3 Silicio con película de platino.....	63
4.3.4 Película de Óxido de Zinc (ZnO).....	65
4.3.5 Oblea de Silicio.....	67
4.4 Errores en el proceso de medición .....	70
5. Conclusiones .....	75
6. Recomendaciones .....	76
Referencias Bibliográficas .....	78

**Lista de Tablas**

Tabla 1 Factores de corrección (k) para muestras geométricas con forma cuadrada, rectangular y circular. ....	30
Tabla 2 Módulos VI de Keithley para el nanovoltímetro 2182A usados en el programa. ....	34
Tabla 3 Parámetros Módulo VI Configure Voltage Parameters. ....	34
Tabla 4 Parámetros Módulo VI Configure Measurements. ....	36
Tabla 5 Parámetros Módulo VI Read latest Measurement. ....	37
Tabla 6 Módulos VI de Keithley para el picoamperímetro 6485 usados en el programa. ....	38
Tabla 7 Parámetros Módulo VI Configure Current Range. ....	39
Tabla 8 Parámetros Módulo VI Measure Current. ....	40
Tabla 9 Descripción de los Materiales utilizados en el sistema de conmutación. ....	49
Tabla 10 Cálculo del porcentaje de error en la medición haciendo uso del sistema de conmutación. ....	72
Tabla 11 Valores de las distancias entre los extremos de la muestra. ....	73
Tabla 12 Valores de las distancias de los contactos en los extremos de la muestra. ....	74
Tabla 13 Cálculo del error $\Delta P/P$ producido en los extremos de la muestra. ....	74
Tabla 14 Porcentaje de error debido a las posiciones de los contactos. ....	74

### Lista de Figuras

Figura 1. Semiconductor Intrínseco .....	18
Figura 2. Semiconductor extrínseco tipo N .....	19
Figura 3. Semiconductor extrínseco tipo P .....	19
Figura 4. Bandas de energía de materiales conductores, semiconductores y aislantes.....	21
Figura 5. Diagrama de bandas de un contacto metal sobre un semiconductor: (a) $\phi_m > \phi_s$ ; (b) $\phi_m < \phi_s$ .....	22
Figura 6. Curvas características I-V de una barrera Schottky y un contacto óhmico .....	22
Figura 7. Corriente eléctrica a través de un cable conductor. ....	23
Figura 8. Configuración eléctrica para el método de van der Pauw con contactos en la periferia de la muestra. ....	26
Figura 9. Primera configuración de Van der Pauw.....	27
Figura 10. Corriente $2i$ inyectada en el contacto M y extraída por el contacto N, diferencia de potencial entre O y P.....	27
Figura 11. (a) Forma de trébol. (b) Forma cuadrada con los contactos en los vértices .....	29
Figura 12. Configuración para muestra cuadrada de lados a, d, con espesor t .....	30
Figura 13. Configuraciones para obtener la resistencia característica $R_a$ . ....	32
Figura 14. Configuraciones para obtener la resistencia característica $R_b$ . ....	32
Figura 15. Configure Voltage Parameters. ....	34
Figura 16. Módulo VI Configure Measurements.....	36
Figura 17. Módulo VI Read latest Measurement.....	37
Figura 18. Módulo VI Configure Current Range.....	39
Figura 19. Módulo Measure Current. ....	40

Figura 20. Panel frontal.....	43
Figura 21. Diagrama de bloques.....	44
Figura 22. Nanovoltímetro 2182A.....	45
Figura 23. Picoamperímetro 6485.....	45
Figura 24. Modelo Funcional.....	46
Figura 25. Serial Configuration. ....	47
Figura 26. Programación para la lectura de datos por medio de los equipos.....	48
Figura 27. Circuito esquemático.....	50
Figura 28. Sistema de conmutación e intercambio de posición.....	50
Figura 29. Diagrama de Conexiones del sistema.....	51
Figura 30. Ventana principal de la interfaz.....	52
Figura 31. Pestaña para la configuración de los equipos.....	53
Figura 32. Pestaña para las especificaciones de la muestra. ....	54
Figura 33. Pestaña de Medidas Obtenidas.....	55
Figura 34. Pestaña de Resultados.....	56
Figura 35. Pestaña Graficas Ra-Rb.....	57
Figura 36. Película delgada FTO. ....	59
Figura 37. Gráficas Ra-Rb para Película delgada de FTO.....	60
Figura 38. Pestaña de resultados en la interfaz para la película delgada de FTO.....	61
Figura 39. Muestra de SnS.....	62
Figura 40. Pestaña de resultados en la interfaz para la muestra de SnS. ....	62
Figura 41. Gráficas Ra-Rb para la muestra de SnS. ....	63
Figura 42. Muestra de silicio con película de platino.....	63

Figura 43. Pestaña de resultados en la interfaz de la muestra de silicio con película de platino. .	64
Figura 44. Gráficas Ra-Rb para la muestra de silicio con película de platino.....	65
Figura 45. Película de ZnO.....	65
Figura 46. Pestaña de resultados en la interfaz de la muestra de ZnO.....	66
Figura 47. Gráficas Ra-Rb para la película de ZnO.....	67
Figura 48. Oblea de Silicio. ....	68
Figura 49. Oblea de silicio con los contactos de Tungsteno.....	69
Figura 50. Gráficas Ra-Rb para la oblea de silicio. ....	69
Figura 51. Pestaña de resultados en la interfaz de la obleas de silicio.....	70
Figura 52. Pestaña de resultados en la interfaz para la película delgada de FTO sin hacer uso del sistema de conmutación. ....	71
Figura 53. Ubicación de los contactos en la muestra.....	73

**RESUMEN**

**TÍTULO:** Implementación de un sistema de caracterización eléctrica enfocado en materiales fotovoltaicos mediante el método de Van der Pauw\*

**AUTORES:** Erika Lizeth Burgos Báez, Jimena Nataly Noy Salamanca\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Películas delgadas, Materiales semiconductores, Conductividad, Método de Van der Pauw, LabVIEW.

**DESCRIPCIÓN:**

En vista del aumento en el uso de películas delgadas semiconductoras en diversos campos tecnológicos, el trabajo realizado en esta investigación pretendió contribuir con el aprovechamiento de las mismas mediante el estudio de una de las propiedades eléctricas más importantes en dichos materiales: la conductividad eléctrica. Esto debido a que esta característica influye directamente en el funcionamiento de la aplicación que se desee, como, por ejemplo, el desempeño de las celdas solares. De ahí que el objetivo central que orientó la investigación fue implementar un sistema de medición para la caracterización eléctrica de películas delgadas semiconductoras.

Para realizar la medición de dicho parámetro, en este trabajo se aplicó el método de Van der Pauw, siendo este uno de los métodos más conocidos en medición de conductividad eléctrica. Este consiste en inyectar una corriente en dos puntos ubicados en la periferia de la muestra y medir el valor de la tensión en otros dos puntos, con estos valores se aplican las ecuaciones propuestas en el método y se calcula el valor de la conductividad eléctrica. Para implementar el método se usó un modelo funcional diseñado y construido en la Universidad Industrial de Santander (UIS) empleando el método de Van der Pauw y calculando el valor de la conductividad eléctrica de las películas delgadas semiconductoras a través de una interfaz de usuario en el software LabVIEW, que permitió la adquisición y manejo de los datos obtenidos para realizar las gráficas de las curvas I-V. En el proceso se obtuvieron resultados del valor de la conductividad eléctrica para 5 diferentes materiales, valores con los que se realizó la verificación de su funcionamiento.

---

\*Trabajo de grado

\*\*Escuela de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Directora Mónica Andrea Botero Londoño, Doctora en Ciencias Físicas. Codirectora María Alejandra Mantilla Villalobos, Doctora en Ingeniería Electrónica.

**ABSTRACT**

**TITLE:** Implementation of an electrical characterization system focused on photovoltaic materials using the Van der Pauw method \*

**AUTHORS:** Erika Lizeth Burgos Báez, Jimena Nataly Noy Salamanca\*\*

**KEY WORDS:** Thin films, Semiconductor materials, Conductivity, Van der Pauw method, LabVIEW.

**DESCRIPTION:**

In view of the increase in the use of thin semiconductor films in various technological fields, the work carried out in this research aimed to contribute to their use by studying one of the most important electrical properties in these materials: electrical conductivity. This is because this feature directly influences the operation of the desired application, such as the performance of solar cells. Hence the main objective that guided the investigation was to implement a measurement system for the electrical characterization of thin semiconductor films.

To carry out the measurement of said parameter, in this work the Van der Pauw method was applied, this being one of the best known methods in measuring electrical conductivity. This consists of injecting a current at two points located on the periphery of the sample and measuring the value of the voltage at another two points, with these values the equations proposed in the method are applied and the value of the electrical conductivity is calculated. To implement the method, a functional model designed and built at the Industrial University of Santander (UIS) was used using the Van der Pauw method and calculating the value of the electrical conductivity of thin semiconductor films through a user interface in the LabVIEW software, which allowed the acquisition and management of the data obtained to make the graphs of the IV curves. In the process, results of the value of the electrical conductivity were obtained for 5 different materials, values with which the verification of its operation was performed.

---

\* Bachelor Thesis

\*\*School of Mechanical Mechanical Engineering School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director Monica Andrea Botero Londoño, Doctor of Physical Sciences. Co-director María Alejandra Mantilla Villalobos, Doctor in Electronic Engineering.

## Introducción

En la actualidad el uso de las películas delgadas semiconductoras se ha convertido en una rama muy importante para los campos tecnológicos; gracias a los avances en investigación de nuevos materiales. De estas se están aprovechando las propiedades y características encontradas con el fin de lograr la mejora o creación de nuevas tecnologías, la fabricación de dispositivos electrónicos, la electrónica orgánica flexible y la biocompatibilidad en implantes médico-quirúrgicos; todos estos resultan siendo unos pocos ejemplos de sus aplicaciones tecnológicas actuales. Además de lo mencionado con anterioridad, hoy la energía solar fotovoltaica es un área importante para considerar, debido al notorio avance en la generación de energías renovables. De hecho, en 2017 se presentó su mayor incremento anual debido a los aumentos en la capacidad instalada de la energía solar fotovoltaica y eólica en el mundo (Appavou et al., 2019).

Es de agregar que la energía solar fotovoltaica presenta mejores rendimientos en países del LAC (Región de América Latina y el Caribe) como Colombia (Appavou et al., 2019) debido a que posee un alto potencial para el desarrollo de las energías renovables. De estas energías la fotovoltaica es calculada con base a la información suministrada por el Instituto de Estudios Ambientales (IDEAM) y evidencia que el país tiene grandes posibilidades de desarrollo en esta área. (Cortez et al., 2018)

Este tipo de energía produce electricidad a partir de radiación solar, además, está conformada por paneles fotovoltaicos constituidos por celdas solares que son fabricadas con diversas tecnologías, y que se clasifican en tres generaciones. La primera se basa en el uso de silicio (policristalino y monocristalino); la segunda generación también conocida como de película delgada y la tercera generación que se encuentra en desarrollo desde el mejoramiento de la

eficiencia de celdas solares en películas delgadas con materiales de menor precio y mayor abundancia en el mercado (Martin A Green, 2015).

En vista de lo anterior, en lo que se refiere a los materiales de película delgada la resistividad es una de las propiedades eléctricas más importantes. De ahí que resulta esencial tener información como la concentración del portador de carga y la movilidad del portador de materiales de película delgada que se puede obtener a través de la toma de datos de resistividad. En consecuencia, se requieren formas de medir de esta información y sobre estas precisamente existen varias técnicas de medición de resistividad, entre ellas, el método de Van der Pauw y el método de las cuatro puntas; ambas han sido ampliamente utilizadas (Lim et al., 2009).

En este marco de ideas, este trabajo automatizó el proceso de caracterización de películas delgadas semiconductoras por medio de un modelo funcional (Ariza & Torres,2018) diseñado y construido en la Universidad Industrial de Santander (UIS) empleando el método de Van Der Pauw; con el fin de determinar la conductividad a través de una interfaz. Está se presenta de forma amigable e intuitiva al usuario permitiéndole graficar curvas I-V. Además, este modelo funcional, cuenta con una sonda de medición conformada por cuatro electrodos ubicados en una posición fija para cada muestra. Así mismo, para facilitar el proceso de caracterización se cuenta con una herramienta elaborada en el software LabVIEW que permite hacer la adquisición y manejo de los datos obtenidos.

Para llegar a estos resultados en el presente trabajo se plantean una serie de capítulos que explican el proceso investigativo que se llevó a cabo. El primero de ellos evidencia el objetivo principal que orientó la investigación; seguido del segundo capítulo que contiene información acerca de conceptos básicos de conductividad, materiales semiconductores, método de Van der Pauw, programación gráfica y su aplicación en el software LabVIEW. Estos son necesarios para

comprender la metodología implementada en el capítulo tres, dado que se especifican los equipos y herramientas utilizados para la toma de mediciones. Por su parte, la interfaz de usuario y los análisis a los resultados obtenidos a partir de las mediciones realizadas a las películas delgadas semiconductoras se encuentran condensados en el capítulo cuarto. Finalmente, el capítulo quinto muestra las conclusiones que evidencian la utilidad del sistema de medición desarrollado en el proceso de caracterización eléctrica de las películas delgadas.

Con todo este trabajo desarrollado se espera que un país como Colombia que cuenta con un buen potencial de radiación solar en todo su territorio empiece a hacer uso de la energía solar y la convierta en una buena alternativa, generando un ambiente propicio para el desarrollo de proyectos enfocados en el tema. Además, que laboratorios y grupos de investigación de universidades continúen trabajando en la fabricación de celdas solares y más específicamente el grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL), de la UIS, que ya ha comenzado a desarrollar su línea de fabricación de celdas tipo película delgada, mediante la síntesis de nuevos materiales semiconductores; para quienes este trabajo contribuye en el proceso de fabricación mediante la caracterización eléctrica de las películas delgadas a implementar.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Implementar un sistema de medición basado en el método de Van der Pauw para la caracterización eléctrica de películas delgadas semiconductoras mediante el desarrollo de un proceso automático de intercambio de información con ayuda de un pico-amperímetro y un nano-voltímetro empleando una aplicación desarrollada en LABVIEW.

### 1.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar una herramienta en el software LABVIEW que permita visualizar los datos obtenidos de tensión y corriente adquiridos haciendo uso de un pico- amperímetro modelo 6485 y un nano-voltímetro modelo 2182A de la marca Keithley.
- Implementar una sonda de medición conformada por cuatro electrodos con su respectivo sistema de conmutación e intercambio de posición.
- Realizar pruebas de verificación del sistema implementado.
- Determinar la conductividad de películas delgadas semiconductoras mediante el análisis de curvas I-V.

## 2. Marco Referencial

La Ciencia de Materiales es considerado un campo multidisciplinario debido a la aplicación de ciencias básicas como la química y la física. La química realiza un aporte relevante en el diseño de métodos de síntesis, evaluación estructural y estudio de estabilidad química de materiales mientras que la física se centra en la evaluación de las propiedades mecánicas, térmicas, magnéticas, ópticas y eléctricas de dichos materiales.

Esta ciencia permite conectar diferentes campos de la ingeniería (electrónica, eléctrica, química, civil, ambiental, mecánica, aeroespacial, etc.), con disciplinas como la geología, la arquitectura y la medicina, teniendo en cuenta que el estudio en nuevos materiales permite la aplicación de estos en diferentes dispositivos o desarrollos tecnológicos al servicio de diversas áreas. (Carriazo et al., 2016).

Un caso de importancia que relaciona la ciencia de materiales con la ingeniería eléctrica y electrónica es el de generación de energía fotovoltaica. Los paneles fotovoltaicos son dispositivos que emplean semiconductores para convertir energía proveniente de la radiación solar en energía eléctrica DC. El diseño, evaluación y fabricación de dispositivos fotovoltaicos implica la caracterización de propiedades de los materiales semiconductores constituyentes del dispositivo. Dentro de las propiedades a evaluar en los materiales semiconductores, las propiedades eléctricas son de gran importancia puesto que a partir de estas se puede obtener información para evaluar el rendimiento de los dispositivos.

En este capítulo se explica el concepto clásico de resistividad eléctrica y cómo esta característica permite clasificar los materiales, se realiza una introducción acerca de los materiales

semiconductores, sus propiedades eléctricas y algunos de los métodos existentes para medir la resistividad eléctrica haciendo especial énfasis en el método de Van der Pauw.

## 2.1 Conductividad en Semiconductores.

Saber que el oro es un mejor conductor que la madera o que un cable más largo presenta más resistencia que un cable más corto es algo intuitivo, sin embargo, existe una respuesta fundamentada para ello, que expresa el porqué de estas diferencias, puesto que el comportamiento de un material depende tanto de la geometría de este, como de su naturaleza.

Los semiconductores conforman un grupo de elementos y compuestos que no son buenos conductores ni aislantes eléctricos, estos materiales presentan una capacidad intermedia para conducir la electricidad (Shacriford, 2005, p.12). Los semiconductores elementales se encuentran en el grupo 4B y los compuestos son conformados por elementos de los grupos 2B, 3B, 5B y 6B de la tabla periódica. (Askeland et al., 2012, p.733).

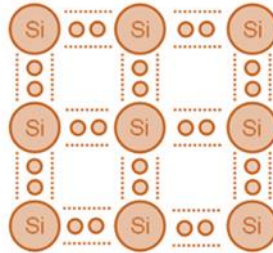
El nivel de la conductividad eléctrica en los semiconductores puede modificarse para ser utilizado en diversas aplicaciones, como dispositivos electrónicos tales como transistores, diodos, etc. (Askeland et al., 2012, p.10).

**2.1.1 Semiconductores intrínsecos y extrínsecos.** En un semiconductor absolutamente perfecto, las concentraciones de electrones y de huecos son iguales ya que los procesos que proporcionan un electrón en la banda de conducción crean un hueco en la de valencia. A este material se le conoce como semiconductor intrínseco (figura 1) y se verificará que

$$n = p = n_i \quad (1)$$

Es decir, por unidad de volumen, la densidad de electrones es igual a la de huecos y se suele representar por  $n_i$ , siendo  $n$  el número de electrones, por unidad de volumen, y  $p$  el número de

huecos, también por unidad de volumen. La densidad intrínseca de portadores en un semiconductor es muy baja, en el Germanio  $n_i = 2.51 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ , en el Silicio de  $n_i = 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  y en el GaAs de  $n_i = 1.8 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ .



*Figura 1.* Semiconductor Intrínseco. Adaptada de Física del Estado Sólido y Física de Semiconductores: lo que hay que saber (2012). Recuperado de <https://thetuzaro.wordpress.com/2012/02/20/fisica-del-estado-solido-y-fisica-de-semiconductores-lo-que-hay-que-saber/>

En la práctica la concentración de portadores en un semiconductor se controlada añadiendo impurezas a dicho material puro. Estas impurezas se denominan dopantes y al semiconductor que las contiene se conoce como semiconductor extrínseco.

En el silicio intrínseco cada átomo está formando enlaces con los cuatro vecinos, si el silicio cristalino se introduce un átomo del grupo V como el fósforo para sustituir un átomo de silicio, cada uno de los átomos de fósforo tiene un electrón más de los necesarios para establecer los enlaces con los átomos vecinos de silicio y este quinto electrón puede ser fácilmente libre. Ya que cada átomo de impureza proporciona un electrón se la denomina impureza donadora. Estos electrones transportan una carga negativa, dejando una carga positiva en el átomo de impureza. A temperatura ambiente, la energía térmica es suficiente para ionizar las impurezas de este tipo, por lo que el número de impurezas contribuirá con el mismo número al número de electrones en la banda de conducción. Este tipo de semiconductor extrínseco se denomina tipo N (figura 2), y la concentración de electrones en el será mayor que la de huecos.

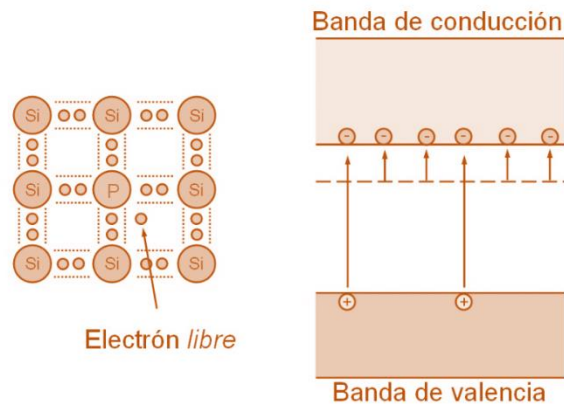


Figura 2. Semiconductor extrínseco tipo N. Adaptada de Física del Estado Sólido y Física de Semiconductores: lo que hay que saber (2012). Recuperado de <https://thetuzaro.wordpress.com/2012/02/20/fisica-del-estado-solido-y-fisica-de-semiconductores-lo-que-hay-que-saber/>

Si se introduce como impureza un elemento del grupo III como el Boro, entonces se tendrá un enlace incompleto ya que el Boro solo tienen tres electrones de valencia y por tanto se tendrá, por cada átomo de impureza de este tipo, un hueco en la banda de valencia. El átomo de impureza estará cargado negativamente cuando se complete ese enlace. Cada átomo de impureza contribuirá con un hueco. Este tipo de impureza se conoce como impureza aceptadora, ya que acepta un electrón provocando la aparición de un hueco en la banda de valencia. (Pardo Collantes, 2006) Este semiconductor extrínseco con impurezas aceptadoras se conoce como de tipo P (figura 3).

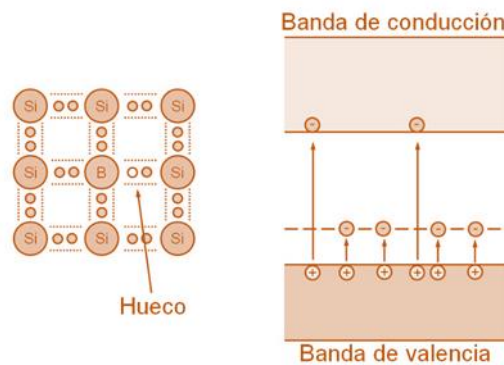


Figura 3. Semiconductor extrínseco tipo P. Adaptada de Física del Estado Sólido y Física de Semiconductores: lo que hay que saber (2012). Recuperado de <https://thetuzaro.wordpress.com/2012/02/20/fisica-del-estado-solido-y-fisica-de-semiconductores-lo-que-hay-que-saber/>

**2.1.2 Portadores de carga.** La corriente eléctrica a través de una sección de un material se define como la carga que atraviesa esa sección por unidad de tiempo, para que exista conducción eléctrica existen partículas de escala atómica que transportan la carga; esas partículas móviles con carga eléctrica se denominan portadores de carga. Un conocido ejemplo de portadores de carga es el electrón, una partícula con carga negativa de  $1.6 \times 10^{-19}$  C. (Shackerlford, 2005, p.524).

**2.1.3 Modelos de enlaces y de bandas.** En un átomo, los electrones giran alrededor del núcleo formando capas; cuando los electrones están próximos al núcleo su fuerza de atracción es mayor, en caso contrario el núcleo y los electrones están débilmente ligados.

El hecho de que en dichas capas la energía que posee el electrón es diferente hace que los electrones de un átomo tengan diferentes niveles de energía.

Las energías de los electrones de valencia se agrupan en un intervalo que se denomina banda de valencia; el límite superior de ese intervalo es  $E_v$ . Las energías que pueden tener los electrones que se han desligado de los enlaces covalentes se agrupan también en un intervalo, denominado banda de conducción; su límite inferior es  $E_c$ . La amplitud de la banda prohibida se denomina  $E_g$  (band gap), y es uno de los parámetros más importantes de un semiconductor. Esa energía,  $E_g = E_c - E_v$ , es la energía mínima que se debe proporcionar a un electrón de valencia para desligarlo del enlace covalente. (Viñas & Cardona, 2003).

El nivel de fermi  $E_f$  se define con la energía del estado ocupado más alto en la banda de energía a 0 K. Un factor que distingue a los metales de los semiconductores y aislantes es La posición de la energía de Fermi respecto a las bandas de valencia y de conducción. (Shackerlford, 2005, p.531)

La figura 4 muestra el comportamiento de la banda de conducción ( $E_c$ ), la banda de valencia ( $E_v$ ) y la banda prohibida ( $E_g$ ) propias de los materiales conductores, semiconductores y aislantes.

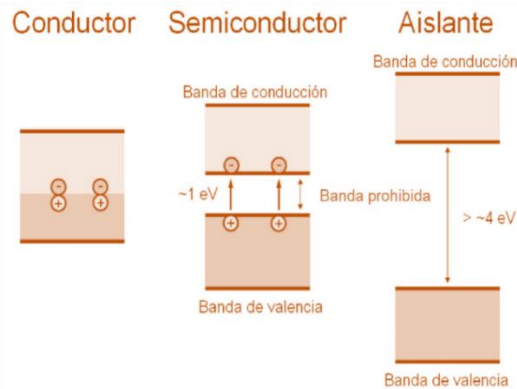


Figura 4. Bandas de energía de materiales conductores, semiconductores y aislantes. Adaptada de Física del Estado Sólido y Física de Semiconductores: lo que hay que saber (2012). Recuperado de <https://thetuzaro.wordpress.com/2012/02/20/fisica-del-estado-solido-y-fisica-de-semiconductores-lo-que-hay-que-saber/>

**2.1.4 Contacto Metal-Semiconductor.** Cuando un metal y un semiconductor se unen, se forma una barrera de potencial en la interfaz. La Figura 5 muestra el diagrama de bandas de un contacto metal sobre un semiconductor. En la figura  $E_c$  y  $E_v$  representan las bandas de conducción y de valencia respectivamente,  $E_f$  representa el nivel de energía de Fermi, la altura de la barrera del potencial  $\phi_B$  y la anchura de la región de carga es  $W$  (Van der Ziel, 1968).

Considerando que la función de trabajo es conocida como la energía mínima que debe proporcionarse a un átomo para liberar un electrón de la superficie de una sustancia determinada, se presentan ciertas condiciones en base a su valor para formar contactos de tipo óhmico o de barrera schottky.

En el caso de que  $\phi_m > \phi_s$ , donde  $\phi_s$  y  $\phi_m$  son la función trabajo del semiconductor y del metal respectivamente, se forma la barrera mostrada en la figura 5 (a) (Barrera Schottky). Esta barrera impide el flujo de corriente, incluso para valores pequeños de corriente, dando origen a grandes caídas de voltajes que aparecen a través de esta interfaz resultando en grande resistencia de contacto. Por otro lado, en caso de que  $\phi_m < \phi_s$ , en un semiconductor tipo n o  $\phi_m > \phi_s$  en un semiconductor tipo p, puede hacerse cero o incluso negativo. En tal caso, la corriente no verá

esencialmente ninguna resistencia, ya que no existe ninguna barrera (figura 5(b)). A tal contacto ideal se le define como uno que tiene una resistencia de valor cero o también como contacto óhmico (Kao, 2004).

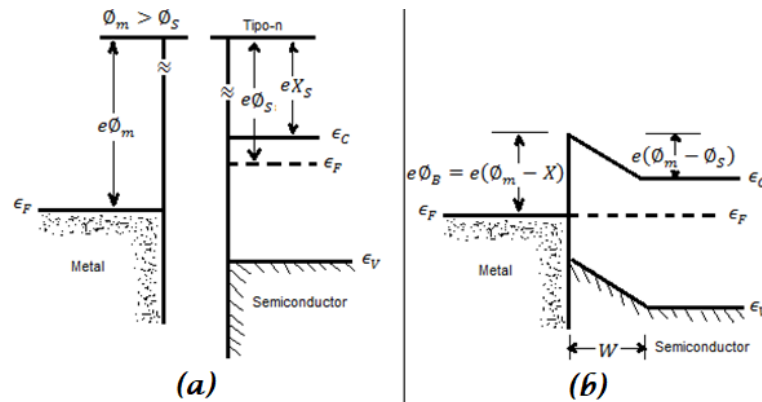


Figura 5. Diagrama de bandas de un contacto metal sobre un semiconductor: (a)  $\phi_m > \phi_s$ ; (b)  $\phi_m < \phi_s$ . Adaptada de Kao, K. C. (2004). Charge Carrier Injection from Electrical Contacts. Dielectric Phenomena in Solids, 327–380. <https://doi.org/10.1016/b978-012396561-5/50016-5>

Las diferencias entre los tipos de contactos se pueden identificar mediante las gráficas de corriente-voltaje ( $I - V$ ) (Figura 6) donde se evidencia un comportamiento lineal en el caso del contacto óhmico y uno no lineal en el caso de barrera Schottky (S.M.Sze & Ng, 2007).

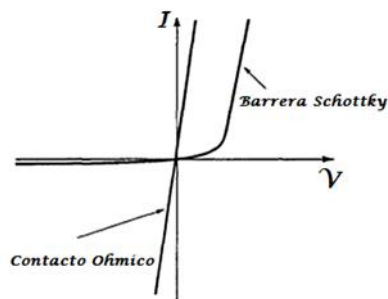


Figura 6. Curvas características I-V de una barrera Schottky y un contacto óhmico. S.M.Sze, & Ng, K. K.(2007).Physics of semiconductor devices. John Wiley Sons.inc.,Hoboken.

**2.1.5 Conductividad eléctrica.** La conductividad de un material depende del tipo de material, de la temperatura y del campo aplicado, pero no de su forma o tamaño. La unidad de conductividad eléctrica es  $1 \text{ C} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . Esta unidad también se escribe como 1 Siemens/m (Arrayás & Trueba, 2007). La inversa de la conductividad se llama resistividad del material y se simboliza como:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2)$$

Los conductores como el oro ( $2.44 \times 10^{-8}$ ) y el cobre ( $1.72 \times 10^{-8}$ ) tienen muy baja resistividad, mientras que los aislantes como el teflón ( $10^{23}$ ) tienen alta resistividad, además de ello algunos materiales, como el Germanio ( $4,6 \times 10^{-1}$ ) y el Silicio ( $6,4 \times 10^2$ ), tienen una resistividad intermedia, son considerados semiconductores (Arrayás & Trueba, 2007).

**2.1.6 Resistencia y Resistividad.** La resistencia eléctrica es la oposición al flujo de corriente o frenado de la circulación de las cargas eléctricas a través de un material, la unidad de resistencia es  $1 \Omega$ . (Wargo y Associates, s.f.).

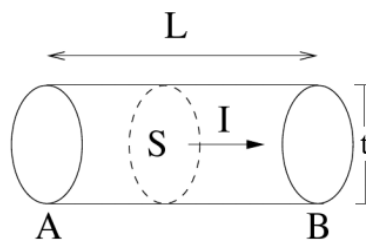


Figura 7. Corriente eléctrica a través de un cable conductor.

En el caso de un trozo de cable conductor de longitud  $L$  y sección transversal  $S$  (figura 7) considerado homogéneo y con campo eléctrico uniforme, sometido a un potencial eléctrico, donde se produce un campo eléctrico  $E$  en su interior donde:

$$E = \rho j \quad (3)$$

Además, el campo eléctrico  $E$  es igual al potencial eléctrico aplicado  $V = V_A - V_B$  (diferencia de potencial entre los extremos A y B del cable):

$$E = \frac{v}{L} \quad (4)$$

Al igualar las ecuaciones de campo eléctrico se obtiene:

$$\rho = \frac{v}{jL} \quad (5)$$

y como la densidad de corriente  $j$  es igual a la corriente eléctrica  $I$  entre el área transversal  $S$  del cable

$$j = \frac{I}{S} \quad (6)$$

Remplazando la ecuación (6) en la ecuación (5) se encuentra la ecuación de la resistividad eléctrica del cable

$$\rho = \frac{SV}{LI} \quad (7)$$

A continuación, se define una nueva cantidad  $R$  que es igual a la relación de voltaje y de corriente aplicada, conocida como Ley de Ohm

$$I = \frac{V}{R} \quad (8)$$

Obteniendo como resultado

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad (9)$$

Entonces es lógico que la resistencia aumente con la longitud del cable y disminuya con su grosor. (Wilson, 2007) Otra cantidad a considerar es la denominada resistencia superficial  $R_S$ , debido a que es una cantidad muy usada en la electrónica planar donde el espesor es muy pequeño comparado con su longitud, tomando  $t$  como el espesor del cable se obtiene

$$R_S = \frac{\rho}{t} \quad (10)$$

## 2.2 Método de Van der Pauw

El método de Van der Pauw es una técnica utilizada específicamente para medir la resistividad y el coeficiente de Hall de materiales de película delgada utilizando contactos de cuatro puntos ubicados de forma arbitraria en la periferia de la muestra.

El método evita errores que surgen por la presencia de resistencia de contacto además es adecuado para muestras de cualquier forma, para que el método de van der Pauw sea más exacto son necesarias las siguientes condiciones: (Van der Pauw, 1958).

1. Los contactos se deben ubicar en la periferia de la muestra.
2. El área de los contactos debe ser suficientemente pequeña.
3. La muestra debe poseer un espesor homogéneo y ser lo suficientemente delgada.
4. La superficie de la muestra está conectada individualmente. Es decir, la muestra no tiene agujeros aislados.

Las condiciones 1 y 2 ha sido motivo de investigación, debido a los errores asociados con la ubicación de los contactos y su tamaño finito, mientras que las condiciones 3 y 4 se cumplen fácilmente en la práctica (Chwang et al., 1974) (Cornils et al., 2007).

La condición 1 es difícil de lograr en situaciones prácticas debido a que ubicar un contacto de área muy pequeña exactamente en el borde de una muestra, mientras se asegura la estabilidad mecánica del contacto es complicado.

Los errores asociados con la localización de los contactos a una pequeña distancia del borde fueron discutidos primero por van der Pauw (Van der Pauw, 1958) y luego por Koon (Koon, 1989) (Koon et al., 1989) para geometrías específicas como cuadrado, círculo y hoja de trébol. Perloff (Perloff, 1977) ha analizado el caso de muestras rectangulares delgadas en detalle y ha dado

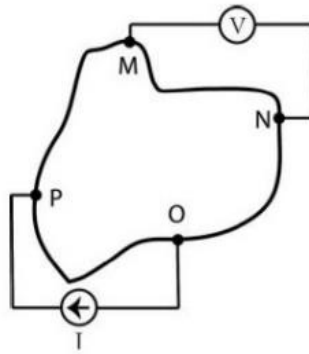
factores de corrección para los contactos colocados en una matriz cuadrada en varios lugares dentro de una muestra cuadrada.

La configuración eléctrica del método de Van der Pauw proporciona cuatro contactos, etiquetados M, N, O y P colocados en la periferia de la muestra cómo se observa en la Figura 8, donde por ejemplo la resistencia  $R_{MN,OP}$  es igual a la diferencia de potencial entre los contactos M y N dividido por la corriente que pasa a través de los contactos O y P.

Van der Pauw dedujo una relación general entre las resistencias medidas cuando se intercambian un contacto de voltaje y un contacto de corriente,

$$\exp\left\{\frac{-\pi d}{\rho} R_{MN,OP}\right\} + \exp\left\{\frac{-\pi d}{\rho} R_{NO,PM}\right\} = 1 \quad (11)$$

Donde  $d$  es el espesor de la película y  $\rho$  su resistividad. La derivación de esta ecuación se puede encontrar con todo detalle en un documento original de van der Pauw (van der Pauw, 1958).



*Figura 8.* Configuración eléctrica para el método de van der Pauw con contactos en la periferia de la muestra. Adaptado de Lim, S. H. N., McKenzie, D. R., & Bilek, M. M. M. (2009). Van der Pauw method for measuring resistivity of a plane sample with distant boundaries. *Review of Scientific Instruments*, 80(7). <https://doi.org/10.1063/1.3183503>

Para comprender el funcionamiento del método de Van der Pauw, en primer lugar, se considera una superficie semi-infinita de espesor  $t$  con las puntas en el borde, como en la Figura 9.

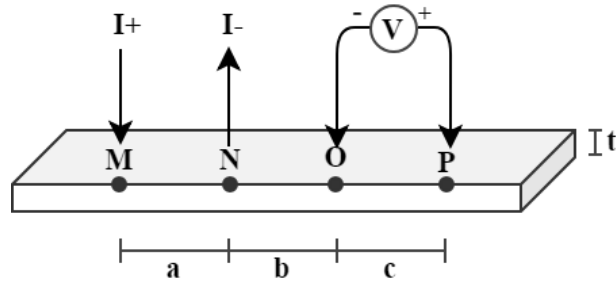


Figura 9. Primera configuración de Van der Pauw.

Donde la forma de dispersión de la corriente será la de un semi-cilindro de altura  $t$  la densidad de corriente que ingresa por la punta 1 a una distancia  $r$ , está dada por

$$j = \frac{I}{\pi r t} \tag{12}$$

Con un campo eléctrico:

$$E = \rho j \tag{13}$$

Entonces, el campo eléctrico a una distancia  $r$  del punto 1 será:

$$E = \frac{\rho I}{\pi r t} \tag{14}$$

A partir de la relación entre el potencial y del campo el eléctrico

$$E = -\frac{dV}{dr} \tag{15}$$

Al inyectar una corriente  $2i$  en el contacto  $M$  y que se extrae en  $N$ , como se puede observar en la Figura 10, la diferencia de potencial entre  $O$  y  $P$  viene dada por la ecuación:

$$V_p - V_o = \frac{i\rho}{\pi d} \ln \left[ \frac{(a+b)(b+c)}{b(a+b+c)} \right] \tag{16}$$

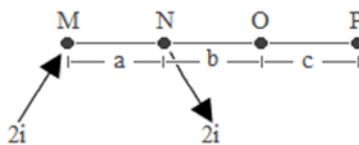


Figura 10. Corriente  $2i$  inyectada en el contacto  $M$  y extraída por el contacto  $N$ , diferencia de potencial entre  $O$  y  $P$ . Adaptado de Lim, S. H. N., McKenzie, D. R., & Bilek, M. M. M. (2009). Van der Pauw method for measuring

resistivity of a plane sample with distant boundaries. Review of Scientific Instruments, 80(7).  
<https://doi.org/10.1063/1.3183503>

Donde  $V_p$  y  $V_o$  son:

$$V_p = \frac{i\rho}{\pi d} \ln \left[ \frac{a+b}{a+b+c} \right] \quad (17)$$

$$V_o = \frac{i\rho}{\pi d} \ln \left[ \frac{b+c}{b} \right] \quad (18)$$

Para realizar el cálculo de la resistencia se divide la diferencia de potencial en el valor de la corriente aplicada, dando como resultado la siguiente ecuación:

$$R_{MN,OP} = \frac{\rho}{\pi t} \ln \left( \frac{(a+b)(b+c)}{b(a+b+c)} \right) \quad (19)$$

Reorganizando la ecuación tenemos

$$e^{-\frac{\pi t}{\rho} R_{MN,OP}} = \frac{b(a+b+c)}{(a+b)(b+c)} \quad (20)$$

De forma similar al inyectar una corriente  $2i$  en el contacto  $N$  y que se extrae por en  $O$ , con diferencia de potencial entre  $P$  y  $M$ , obtenemos

$$R_{NO,PM} = \frac{\rho}{\pi t} \ln \left( \frac{(a+b)(b+c)}{ac} \right) \quad (21)$$

Reorganizando tenemos

$$e^{-\frac{\pi t}{\rho} R_{NO,PM}} = \frac{ac}{(a+b)(b+c)} \quad (22)$$

Como

$$1 = \frac{b(a+b+c)}{(a+b)(b+c)} + \frac{ac}{(a+b)(b+c)} \quad (23)$$

Al sumar las ecuaciones  $R_{MN,OP}$  y  $R_{NO,PM}$  se obtiene la ecuación de Van Der Pauw:

$$\exp \left\{ \frac{-\pi d}{\rho} R_{MN,OP} \right\} + \exp \left\{ \frac{-\pi d}{\rho} R_{NO,PM} \right\} = 1 \quad (24)$$

Con el fin de introducir efectos de no homogeneidad Van der Pauw logró desplegar la siguiente ecuación, introduciendo dos factores de corrección, el factor  $k$  que depende la longitud lateral de

la muestra, con respecto a la distancia entre los electrodos y el factor  $f$  que está en función de las resistencias características

$$\rho = kt \left( \frac{R_{MN,OP} + R_{NO,PM}}{2} \right) f \left( \frac{R_{MN,OP}}{R_{NO,PM}} \right) \quad (25)$$

Van der Pauw recomienda que, para tener mediciones con un menor error, se deben usar muestras de forma simétrica (Figura 11), la forma de trébol es la más recomendada por minimizar los errores producidos por el tamaño del contacto, como la forma de trébol es muy difícil de producir, la forma cuadrada con los contactos en los vértices es la más aceptable. (Van der Pauw, 1958).

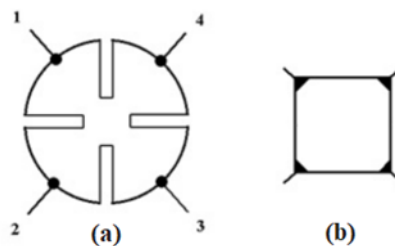


Figura 11. (a) Forma de trébol. (b) Forma cuadrada con los contactos en los vértices. Adaptado de Koon, D. W. (1989a). Effect of contact size and placement, and of resistive inhomogeneities on van der Pauw measurements. Review of Scientific Instruments, 60(2), 271–274. <https://doi.org/10.1063/1.1140422>

**2.2.1 Factores de corrección.** Debido a la no idealidad de las películas delgadas a estudiar se hace necesario el uso de factores de corrección para mitigar este efecto en la medición.

- Factor de corrección  $k$  que incorpora los efectos de la geometría de la muestra y el posicionamiento de la sonda en la muestra (Figura 12). Green y Gunn proponen el valor del factor  $k$  a partir de la relación de la longitud lateral de la muestra, y la distancia entre los electrodos  $\frac{d}{s}$  además de la relación entre las longitudes de la muestra  $\frac{a}{d}$  al no poseer forma cuadrada o una relación entre el diámetro y la separación de los electrodos al ser una muestra circular (Green & Gunn, 1971), información condensada en la tabla 1.

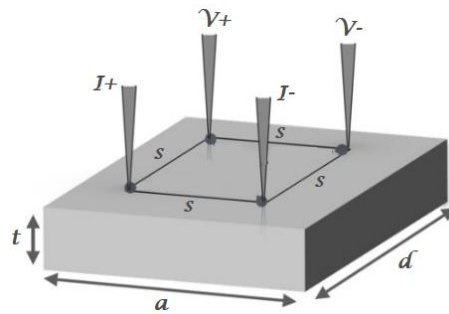


Figura 12. Configuración para muestra cuadrada de lados  $a$ ,  $d$ , con espesor  $t$ . Adaptado de Miccoli, I., Edler, F., Pfnür, H., & Tegenkamp, C. (2015). The 100th anniversary of the four-point probe technique: The role of probe geometries in isotropic and anisotropic systems. *Journal of Physics Condensed Matter*, 27(22). <https://doi.org/10.1088/0953-8984/27/22/223201>

Tabla 1  
Factores de corrección ( $k$ ) para muestras geométricas con forma cuadrada, rectangular y circular.

$\frac{\text{longitud lateral/diámetro}}{\text{espacio entre las puntas}} = \frac{d}{s}$	Muestra Circular	Muestra Rectangular				
		$\frac{a}{d} = 1$	$\frac{a}{d} = 1.2$	$\frac{a}{d} = 1.5$	$\frac{a}{d} = 2$	$\frac{a}{d} = 4$
1		4.5324	2.8667	2.0936	1.7822	1.7076
1.25		4.5477	3.3358	2.7101	2.4454	2.3810
1.5	4.5437	4.6508	3.7832	3.3044	3.0239	3.0418
1.75	4.6778	4.8526	4.2321	3.8710	3.7070	3.6658
2	4.9052	5.1168	4.6701	4.3988	4.2716	4.2391
2.5	5.4593	5.7028	5.4677	5.3127	5.2358	5.2157
3	6.0052	6.2516	6.1273	6.0373	5.9896	5.9773
4	6.8803	7.0969	7.0662	7.0350	7.0156	7.0102
5	7.4739	7.6504	7.6495	7.6392	7.6306	7.6281
7	8.1442	8.2581	8.2694	8.2696	8.2680	8.2673
10	8.5795	8.6434	8.6528	8.6551	8.6550	8.6549
Valores Mayores	9.0647	9.0647	9.0647	9.0647	9.0647	9.0647

Nota: Recuperado de Green, M.A., & Gunn, M. W. (1971). The evaluation of geometrical effects in four point probe measurements. In *Solid-State Electronics* (Vol. 14, Issue 11). Pergamon. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(71\)90029-3](https://doi.org/10.1016/0038-1101(71)90029-3)

Cuando  $R_{MN,OP} = R_{NO,PM} = R$  el valor del factor  $k$  es igual a

$$k = \frac{\pi}{\ln(2)} \tag{26}$$

Obteniendo como fórmula de resistividad:

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln 2} R \quad (27)$$

- Factor de corrección  $f$  generalmente se divide en tres factores diferentes teniendo en cuenta el grosor finito de la muestra ( $f_1$ ), la alineación de las sondas en la proximidad de un borde de la muestra ( $f_2$ ) y el ancho lateral finito de la muestra ( $f_3$ ).

Para las mediciones de resistividad es de gran importancia el método de Van der Pauw, que extiende las fórmulas para evaluar el factor de corrección  $f_3$  para el caso especial de muestras cuadradas/circulares a una muestra de forma arbitraria, siempre que las cuatro sondas se encuentren en la periferia de la muestra y sean pequeñas en comparación con el tamaño de la muestra. Además, el método de Van der Pauw requiere muestras homogéneas, delgadas ( $\frac{t}{s} < 1$ ;  $f_1 = 1$ ), isotrópicas y conectados individualmente, es decir, no se permite que la muestra tenga agujeros aislados (Miccoli et al., 2015).

Para el método de Van der Pauw, el factor  $f$  se encuentra dado por la siguiente expresión matemática:

$$\frac{R_{MN,OP} - R_{NO,PM}}{R_{MN,OP} + R_{NO,PM}} = \frac{f}{\ln 2} \cosh^{-1} \left( \frac{e^{\ln 2 / f}}{2} \right) \quad (28)$$

**2.2.2 Configuraciones para cálculo de la Resistividad.** Para eliminar los efectos de las resistencias de los contactos y tener seguridad de la homogeneidad en las medidas, se recomienda hacer ocho mediciones.

Con el promedio de las primeras cuatro mediciones. Figura 13 se obtiene la resistencia característica  $R_a$ .

Configuraciones Ra

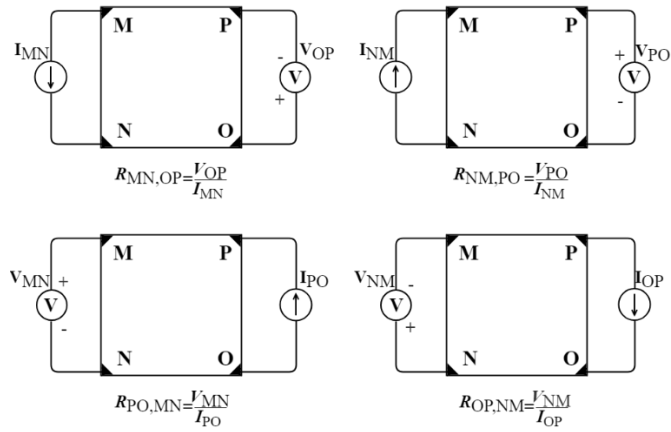


Figura 13. Configuraciones para obtener la resistencia característica  $R_a$ .

$$R_a = \frac{R_{MN,OP} + R_{NM,PO} + R_{PO,MN} + R_{OP,NM}}{4} \quad (29)$$

y con el promedio de las otras cuatro mediciones. Figura 14 se obtiene la resistencia característica  $R_b$ .

Configuraciones Rb

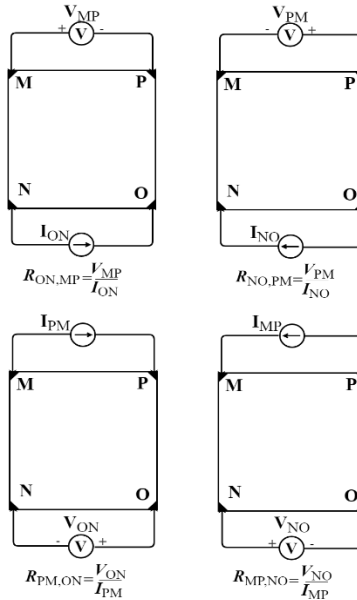


Figura 14. Configuraciones para obtener la resistencia característica  $R_b$ .

$$R_b = \frac{R_{ON,MP} + R_{NO,PM} + R_{PM,ON} + R_{MP,NO}}{4} \quad (30)$$

Entonces se puede reemplazar en la ecuación de Van der Pauw obteniendo:

$$e^{-\frac{\pi t}{\rho} R_a} + e^{-\frac{\pi t}{\rho} R_b} = 1 \quad (31)$$

Para comprobar que se realiza una buena medición se debe cumplir que:

$$R_{MN,OP} = R_{ON,MP} \quad (32)$$

$$R_{NM,PO} = R_{NO,PM} \quad (33)$$

$$R_{PO,MN} = R_{PM,ON} \quad (34)$$

$$R_{OP,NM} = R_{MP,NO} \quad (35)$$

o al menos estas igualdades deben ser de valores muy próximos.

## 2.3 Programación gráfica

En esta sección se explica la utilización de este tipo de programación a través del software LabVIEW, dando a conocer los módulos utilizados en la construcción de la interfaz.

**2.3.1 Estructura del programa LabVIEW.** La interfaz desarrollada en el software LabVIEW interactúa con los equipos (nanovoltímetro, picoamperímetro) que son los encargados de recopilar los datos de tensión y corriente necesarios para el cálculo de la conductividad del material, esta acción se realiza haciendo uso de las librerías propias de cada instrumento proporcionadas por la marca Keithley en la página de national instruments.



**2.3.1.1 Módulos Instrumentos virtuales (VI) Keithley.** Dentro de las librerías propias de los equipos a utilizar se encuentra una variedad de módulos que permiten efectuar diferentes acciones, como es el caso del inicio o finalización de la medición.

- Módulos VI Keithley para el nanovoltímetro 2182A. Se presenta una breve descripción de los módulos más utilizados en la programación de la interfaz.

En la tabla 2 se muestran los módulos de uso obligatorio en la programación del equipo.

Tabla 2

Módulos VI de Keithley para el nanovoltímetro 2182A usados en el programa.

Icono VI	Nombre del Módulo	Descripción
	Keithley 2182.lvlib:Initialize.vi	Establece comunicación con el instrumento y opcionalmente realiza una consulta de identificación y/o un reinicio. También coloca a este en el estado predeterminado necesario para otras operaciones del controlador. Por lo tanto, se debe llamar a este VI antes de llamar a otro controlador de instrumento. Generalmente, debe llamar al VI de inicialización solo una vez al comienzo de una aplicación.
	Keithley 2182.lvlib:Close.vi	Realiza una consulta de error del instrumento antes de finalizar la conexión del software al instrumento.

Algunos módulos VI importantes para la configuración del Nanovoltímetro Keithley son:

- El módulo VI Configure Voltage Parameters

Los parámetros para este módulo VI se muestran en la Figura 15 y una breve descripción de estos en la tabla 3.

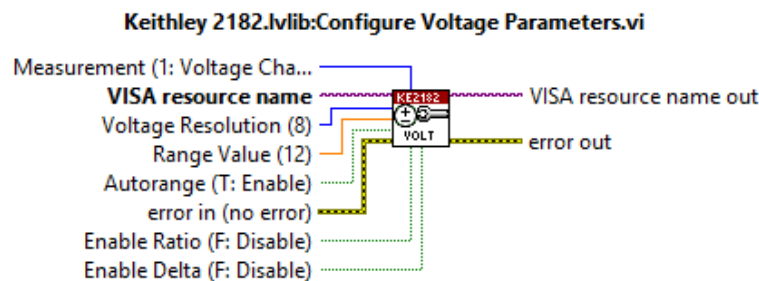








Figura 15. Configure Voltage Parameters.

Tabla 3

Parámetros Módulo VI Configure Voltage Parameters.

Icono	Parámetro	Descripción
 Measurement (1: Voltage Channel 1)	Measurement	Especifica el tipo de medición a realizar. Valores válidos: 0: Voltaje Canal 1: Lee datos de voltaje del Canal 1. 1: Voltaje Canal 2: Lee datos de voltaje del Canal 2. Valor por defecto: 0: Voltaje canal 1.

<p> VISA resource name</p>	<p>VISA resource name</p>	<p>Una referencia al instrumento en uso. La referencia al nombre del dispositivo se crea en el VI de inicialización. Por lo tanto, antes de llamar a este, debe llamar al de inicialización. Para ejecutar este VI de forma interactiva, seleccione el nombre del dispositivo inicializado previamente en el menú desplegable. Para ejecutarlo mediante programación, conecte el terminal VISA RESOURCE NAME OUT del VI inicializado a los terminales de entrada VISA RESOURCE NAME posteriores.</p>
<p> Voltage Resolution (8)</p>	<p>Voltage Resolution</p>	<p>Establece la resolución de pantalla para el Modelo 2182. Valores válidos: 4-8. Valor por defecto: 8. Esta configuración no depende del tipo de medición. Se aplica a todas las mediciones de voltaje.</p>
<p> Range Value (12)</p>	<p>Range Value</p>	<p>Establece el rango para la medición especificada. El rango seleccionado afecta tanto la precisión de la medición de voltaje como el voltaje máximo que se puede medir. Valores válidos:                  Voltaje canal 1: 0 a 120 V                  Voltaje canal 2: 0 a 12 V                  Valor por defecto:                  Voltaje canal 1: 120 V                  Voltaje canal 2: 12V</p>
<p> Autorange (T: Enable)</p>	<p>Autorange</p>	<p>Habilita o deshabilita el rango automático para la medición seleccionada. Mientras el rango automático está activado, el instrumento selecciona automáticamente el mejor rango para medir la señal aplicada. El rango automático no debe usarse cuando se requiere una velocidad óptima. Valores válidos:                  T: habilitar                  F: deshabilitar                  Valor por defecto:                  F: deshabilitar</p>
<p> error in (no error)</p>	<p>Error in</p>	<p>ERROR IN puede aceptar información de error conectada desde VIs previamente llamados. Use esta información para decidir si se debe omitir alguna funcionalidad en caso de errores de otros VIs. Haga clic con el botón derecho en el control ERROR IN en el panel frontal y seleccione explicar error o explique la advertencia desde el menú contextual para obtener más información sobre el error.</p>

- El módulo VI Configure Measurements

Los parámetros para este módulo VI se muestran en la Figura 16 y una breve descripción de estos en la Tabla 4.

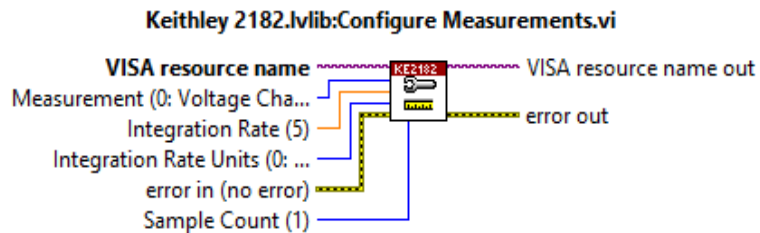




Figura 16. Módulo VI Configure Measurements.

Tabla 4  
Parámetros Módulo VI Configure Measurements.

Icono	Parámetro	Descripción
VISA resource name	VISA resource name	Una referencia al instrumento en uso. La referencia al nombre del dispositivo se crea en el VI de inicialización. Por lo tanto, antes de llamar a este, debe llamar al de inicialización. Para ejecutar este VI de forma interactiva, seleccione el nombre del dispositivo inicializado previamente en el menú desplegable. Para ejecutarlo mediante programación, conecte el terminal VISA RESOURCE NAME OUT del VI inicializado a los terminales de entrada VISA RESOURCE NAME posteriores.
Measurement (1: Voltage Channel 1)	Measurement	Especifica el tipo de medida a realizar Valores válidos 0: Voltaje Canal 1: Lee datos de voltaje del Canal 1. 1: Voltaje Canal 2: Lee datos de voltaje del Canal 2. 2: Temperatura Canal 1: Lee datos de temperatura del Canal 1. 3: Temperatura Canal 2: Lee datos de temperatura del Canal 2. Valor por defecto: 0: Voltaje Canal 1.
Integration Rate (5)	Integration Rate	Establece la tasa de integración del convertidor A / D para la medición especificada. Valores válidos: Ciclos de línea: 0.01 a 60 Hz. Segundos: 166.67us a 1s (60Hz) 200us a 1s (50Hz) Valor por defecto: Ciclos de línea: 5 Hz. Segundos: 83.33 ms

 Integration Rate Units (0: Line Cycles)	Integration Rate Units	Especifica las unidades para el valor numérico utilizado en el control de la tasa de integración. Valores válidos: 0: ciclos de línea 1: segundos Valores predeterminados 0: ciclos de línea
 error in (no error)	Error in	ERROR IN puede aceptar información de error conectada desde VIs previamente llamados. Use esta información para decidir si se debe omitir alguna funcionalidad en caso de errores de otros VIs. Haga clic con el botón derecho en el control ERROR IN en el panel frontal y seleccione explicar error o explique la advertencia desde el menú contextual para obtener más información sobre el error.

- El módulo VI “Read Latest Measurements”

Los parámetros para este módulo VI se muestran en la Figura 17 y una breve descripción de estos en la Tabla 5.

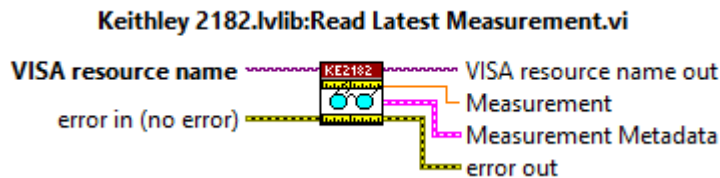




Figura 17. Módulo VI Read latest Measurement.

Tabla 5  
Parámetros Módulo VI Read latest Measurement.

Icono	Parámetro	Descripción
 VISA resource name	VISA resource name	Una referencia al instrumento en uso. La referencia al nombre del dispositivo se crea en el VI de inicialización. Por lo tanto, antes de llamar a este, debe llamar al de inicialización. Para ejecutar este VI de forma interactiva, seleccione el nombre del dispositivo inicializado previamente en el menú desplegable. Para ejecutarlo mediante programación, conecte el terminal VISA RESOURCE NAME OUT del VI inicializado a los terminales de entrada VISA RESOURCE NAME posteriores.
 error in (no error)	Error in	ERROR IN puede aceptar información de error conectada desde VIs previamente llamados. Use esta información para decidir si se debe omitir alguna funcionalidad en caso de errores de otros VIs.

---



Haga clic con el botón derecho en el control ERROR IN en el panel frontal y seleccione explicar error o explique la advertencia desde el menú contextual para obtener más información sobre el error.

---

- Módulos VI Keithley para el Picoamperímetro 6485. Se presenta una breve descripción de los módulos más utilizados en la programación de la interfaz.

En la tabla 6 se muestran los módulos de uso obligatorio en la programación del equipo.

Tabla 6  
Módulos VI de Keithley para el picoamperímetro 6485 usados en el programa.

Icono VI	Nombre del Módulo	Descripción
	Keithley 6485X Series.lvlib:Initialize.vi	Establece comunicación con el instrumento y opcionalmente realiza una consulta de identificación y/o un reinicio. También coloca a este en el estado predeterminado necesario para otras operaciones del controlador. Por lo tanto, se debe llamar a este VI antes de llamar a otro controlador de instrumento. Generalmente, debe llamar al VI de inicialización solo una vez al comienzo de una aplicación.
	Keithley 6485X Series.lvlib:Close.vi	Realiza una consulta de error del instrumento antes de finalizar la conexión del software al instrumento.

Algunos módulos VI importantes para la configuración del Picoamperímetro Keithley son:

- El módulo VI "Configure Current Range"

Los parámetros para este módulo VI se muestran en la Figura 18 y una breve descripción de estos en la Tabla 7.

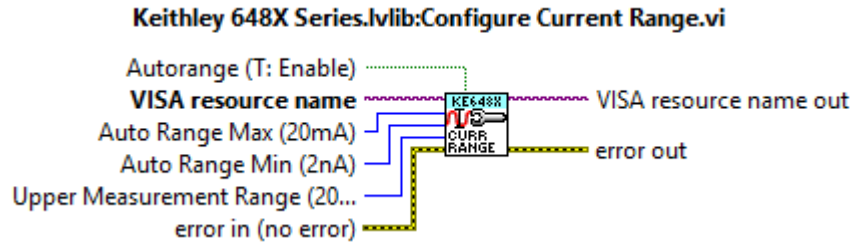






Figura 18. Módulo VI Configure Current Range.

Tabla 7

Parámetros Módulo VI Configure Current Range.

Icono	Parámetro	Descripción
 Autorange (T: Enable)	Autorange	Habilita o deshabilita la función de rango automático. Si se habilita, el instrumento pasa automáticamente al rango más sensible disponible para medir la señal aplicada. El rango ascendente ocurre al 150% del rango, mientras que el rango descendente ocurre al valor del rango. Si está deshabilitado, el VI configurará el rango de medición del instrumento a ese indicado por el control de rango de medición superior. Valor por defecto: T: habilitar
 VISA resource name	VISA resource name	Una referencia al instrumento en uso. La referencia al nombre del dispositivo se crea en el VI de inicialización. Por lo tanto, antes de llamar a este, debe llamar al de inicialización. Para ejecutar este VI de forma interactiva, seleccione el nombre del dispositivo inicializado previamente en el menú desplegable. Para ejecutarlo mediante programación, conecte el terminal VISA RESOURCE NAME OUT del VI inicializado a los terminales de entrada VISA RESOURCE NAME posteriores.
 Auto Range Max (20mA)	Auto Range Max (20mA)	Establece el rango máximo que seleccionará la función de rango automático. Esto es útil para reducir el tiempo de búsqueda de rango automático si sabe cuál será la corriente máxima. Valores válidos: 2nA, 20nA, 200nA, 2uA, 20uA, 200uA, 2mA, 20mA. Valor por defecto: 20mA.
 Auto Range Min (2nA)	Auto Range Min (2nA)	Establece el rango mínimo que seleccionará la función de rango automático. Esto es útil para reducir el tiempo de búsqueda de rango automático si sabe cuál será la corriente mínima. Valores válidos: 2nA, 20nA, 200nA, 2uA, 20uA, 200uA, 2mA, 20mA. Valor por defecto: 20mA.

Upper Measurement Range (200uA)	Upper Measurement Range	Establece el rango de medición superior del instrumento. Este control solo se usa si el rango automático está desactivado. El uso del rango más bajo posible sin causar un desbordamiento garantiza la mejor precisión y resolución de medición. Valores válidos: 2nA, 20nA, 200nA, 2uA, 20uA, 200uA, 2mA, 20mA. Valor por defecto: 200uA.
error in (no error)	Error in	ERROR IN puede aceptar información de error conectada desde VIs previamente llamados. Use esta información para decidir si se debe omitir alguna funcionalidad en caso de errores de otros VIs. Haga clic con el botón derecho en el control ERROR IN en el panel frontal y seleccione explicar error o explique la advertencia desde el menú contextual para obtener más información sobre el error.

- El módulo VI " Measure Current"

Los parámetros para este módulo VI se muestran en la Figura19 y una breve descripción de estos en la Tabla 8.

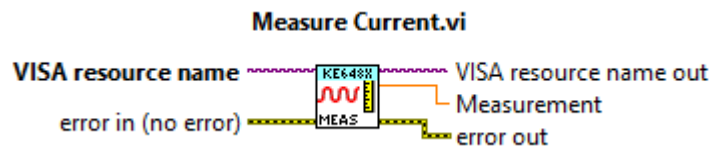


Figura 19. Módulo Measure Current.

Tabla 8

Parámetros Módulo VI Measure Current.

Icono	Parámetro	Descripción
VISA resource name	VISA resource name	Una referencia al instrumento en uso. La referencia al nombre del dispositivo se crea en el VI de inicialización. Por lo tanto, antes de llamar a este, debe llamar al de inicialización. Para ejecutar este VI de forma interactiva, seleccione el nombre del dispositivo inicializado previamente en el menú desplegable. Para ejecutarlo mediante programación, conecte el terminal VISA RESOURCE NAME OUT del VI inicializado a los terminales de entrada VISA RESOURCE NAME posteriores.
error in (no error)	Error in	ERROR IN puede aceptar información de error conectada desde VIs previamente llamados. Use esta información para decidir si se debe omitir alguna funcionalidad en caso de errores de otros VIs.

---

Haga clic con el botón derecho en el control ERROR IN en el panel frontal y seleccione explicar error o explique la advertencia desde el menú contextual para obtener más información sobre el error.

---

### 3. Metodología

Gran parte del proyecto se basa en el desarrollo del software el cual debe encontrarse en capacidad de trabajar tanto con los equipos necesarios para la aplicación del método como con los datos adquiridos en cada una de las mediciones realizadas, por tal razón se consideraron programas utilizados en ingeniería que cumplan con dichas especificaciones.

#### 3.1. LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)

LabVIEW es un software de ingeniería de sistemas el cual cuenta con un enfoque de programación gráfica que ayuda a visualizar cada aspecto de su aplicación, incluyendo configuración de hardware, datos de medidas y depuración, pensado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido.

Estas características permiten, desarrollar algoritmos de análisis de datos y diseñar interfaz de usuario personalizado.

Fue creado por National Instruments (1976) para funcionar en máquinas MAC, salió al mercado por primera vez en 1986, teniendo versiones disponibles para las plataformas Windows, UNIX, MAC y GNU/Linux (Graff & Segundo,2009).

Los programas desarrollados con LabVIEW se llaman Instrumentos Virtuales, o VIs y su origen provienen del control de instrumentos, hoy en día se ha expandido no sólo a Instrumentación electrónica sino también a programación embebida, comunicaciones, matemáticas, etc.

Entre sus objetivos están el reducir el tiempo de desarrollo de aplicaciones de todo tipo, una de sus mayores cualidades consiste en la capacidad de combinarse con todo tipo de software y hardware como tarjetas de adquisición de datos, PAC, Visión, autómatas programables, sistemas de visión, FPGAs, etc.

LabVIEW está constituido en su mayoría por programación G y difiere de otros lenguajes de programación como C o Basic, debido a que están basados en texto, mientras que en G se utiliza programación gráfica.

Los programas en G, o VIs constan de una interfaz interactiva de usuario y un diagrama de flujo de datos que hace las funciones de código fuente. De forma más específica, el entorno de programación gráfico LabVIEW se estructura haciendo la analogía con los instrumentos de laboratorio. Así, un instrumento virtual consta de panel frontal y diagrama de bloques (Molina & Jiménez, 2010).

- Panel Frontal. Es la interfaz interactiva de usuario de un VI, debido a que simula el panel de un instrumento físico, el panel frontal puede contener botones, interruptores, pulsadores, gráficas y otros controles e indicadores.
- Diagrama de Bloques. Se construye en G y constituye el código fuente del programa o VI. Supone una solución gráfica a un determinado.

Los VIs son jerárquicos y modulares. Pueden utilizarse como programas de alto nivel o como subprogramas de otros programas o subprogramas. Cuando un VI se usa dentro de otro VI, se denomina subVI. El icono y los conectores de un VI funcionan como una lista de parámetros gráficos de forma que otros VIs puedan pasar datos a un determinado subVI.

LabVIEW contiene una amplia gama de herramientas para adquisición, análisis, despliegue y almacenamiento de datos, así como herramientas que ayudan a especificar su código de ejecución.

En LabVIEW, se construye una interfaz de usuario, o panel frontal (Figura 20), con controles e indicadores.

- Los controles son textos, botones de acción, interruptores y otros dispositivos de entrada.

Los indicadores son gráficos, LED, objetos para mostrar texto o números y otros elementos.

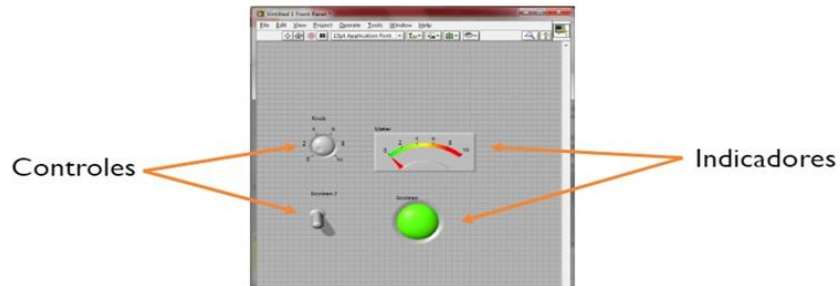


Figura 20. Panel frontal.

Una vez construida la interfaz, el código se agrega en el diagrama de bloques utilizando subVIs y estructuras para controlar los objetos del panel frontal.

El diagrama de bloques (Figura 21) contiene el código fuente gráfico. Los objetos de panel frontal aparecen como terminales en el diagrama de bloques. Adicionalmente, el diagrama de bloques contiene funciones y estructuras incorporadas en las bibliotecas de LabVIEW. Los cables conectan cada uno de los nodos del diagrama de bloques, incluyendo controles e indicadores de terminal, funciones y estructuras.

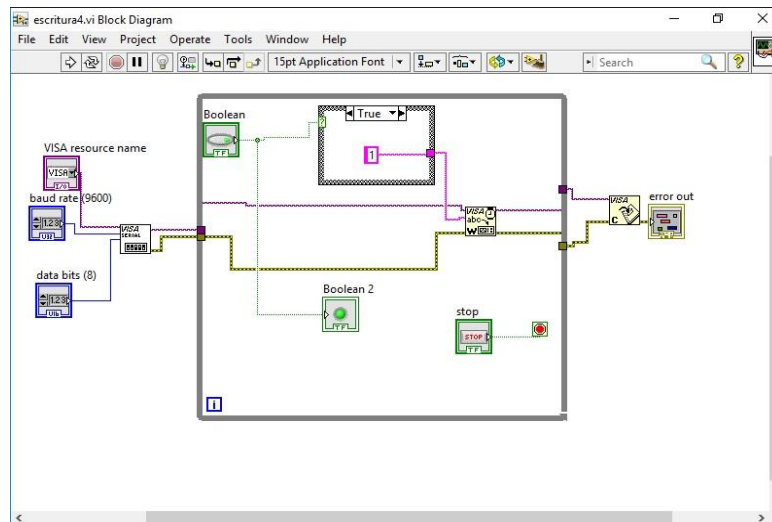


Figura 21. Diagrama de bloques.

### 3.2 Equipos utilizados

En el proceso de caracterización eléctrica de películas delgadas semiconductoras mediante el método de Van der Pauw son necesarios equipos que se encuentren en capacidad de realizar la medición de tensión y corriente en un amplio rango de valores con una buena precisión, además de una herramienta que permita ubicar la muestra de una forma adecuada para aplicar el método.

En este caso se cuenta con un prototipo (Ariza & Torres, 2018) fabricado en la Universidad industrial de Santander diseñado para la aplicación de dicho método el cual permite una fácil conexión entre los equipos a utilizar, debido a las características anteriormente mencionadas se trabajó con un picoamperímetro (Keithley Instruments, 2001) y un nanovoltímetro (Keithley Instruments, 2004) de la marca Keithley, equipos pertenecientes al grupo de investigación GISEL.

**3.2.1 Nanovoltímetro.** El nanovoltímetro Modelo 2182A (Figura 22) de dos canales está optimizado para realizar mediciones de voltaje estables y de bajo ruido y para caracterizar materiales y dispositivos de baja resistencia de manera confiable y repetible. Proporciona una mayor velocidad de medición y un rendimiento de ruido significativamente mejor que las soluciones alternativas de medición de bajo voltaje.



Figura 22. Nanovoltímetro 2182A. Adaptado de Keithley Instruments, I. (2004). Model 2182 and 2182a nanovoltmeter. User's Manual, 2–5

Este equipo posee dos canales para medición de voltaje, cada uno de estos con su respectivo rango de valores. La resolución de pantalla de este equipo es de  $3\frac{1}{2}$  dígitos a  $7\frac{1}{2}$  dígitos.

El canal 1 tiene cinco rangos de medición: 10 mV, 100 mV, 1 V, 10 V y 100 V y puede medir voltaje de 0 V hasta 120 V.

El canal 2 tiene tres rangos de medición: 100 mV, 1 V y 10 V y puede medir voltaje de 0 V hasta 12V. (Keithley Instruments, 2004).

**3.2.2 Picoamperímetro.** El modelo 6485 es un picoamperímetro (Figura 23) programable en bus de alta resolución (RS-232 e IEEE-488) que cuenta con una resolución de pantalla de 5 dígitos que puede medir corrientes a velocidades de hasta 1000 lecturas por segundo.



Figura 23. Picoamperímetro 6485. Adaptado de Keithley Instruments, I. (2001). Model 6485 picoammeter. User's Manual, 2–14.

Este equipo posee un único canal para la medición de corriente, el cual tiene ocho rangos de medición: 2 nA, 20 nA, 200 nA, 2 uA, 20 uA, 200 uA, 2 mA y 20 mA. (Keithley Instruments, 2001).

**3.2.3 Modelo funcional de medición de conductividad eléctrica en películas delgadas semiconductoras.** El modelo funcional cuenta con un amplio rango de trabajo capaz de ajustarse al tamaño y asimetría de las muestras desde un valor de 0,5 cm hasta 20 cm de lado. (Figura 24).



*Figura 24.* Modelo Funcional.

Está compuesto por cuatro carrillos móviles que permiten el desplazamiento de cada carro de forma independiente, el sistema está unido por una base que cuenta con cuatro puntos, que cumplen la función de ejes y a la vez fijan los cuatro rieles al centro del equipo, con dos grados de libertad para que cada uno se pueda girar a izquierda o derecha y dos grados de libertad para que los carrillos móviles se puedan desplazar hacia adelante o hacia atrás, cada carro móvil cuenta con dos orificios utilizados para variar la altura de los electrodos.(Ariza & Torres, 2018).

La conexión de las puntas de medida a los electrodos se puede hacer por medio de pinzas conectadas directamente al extremo de los electrodos, o por medio de conectores banana, conectados en los bornes superiores de los carrillos móviles.

**3.2.4 Configuración y Manejo de equipos mediante el software.** La utilización de los equipos de medición anteriormente mencionados (nanovoltímetro y picoamperímetro) se realiza a través del software LabVIEW, este software permite trabajar con los drivers propios de los equipos, facilitados en la página web de National Instruments.

Para un correcto funcionamiento de los mismos es necesario configurar el puerto serial de cada uno, en aspectos como la velocidad de transmisión, control del flujo, paridad, bits de datos y bits de parada. En la (Figura 25) se presentan 5 ítems encontrados en la opción *serial configuration* en el bloque *Initialize* (como se mencionado en la Tabla 2).

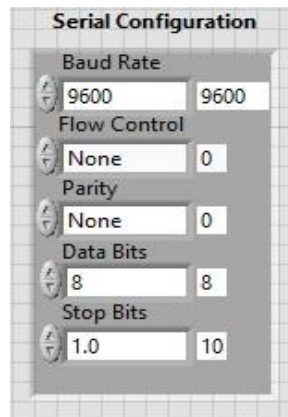


Figura 25. Serial Configuration.

Para llevar a cabo la medición con los equipos y obtener los datos en el computador a través del software es necesario hacer uso de los drivers de los equipos y hacer las respectivas conexiones entre ellos.

Respecto a la lectura de los datos se hace uso de los bloques: *Initialize*, *Configure measurements*, *Configure voltage parameters*, *Initiate*, *Read latest measurement* y *close* en el caso del nanovoltímetro, datos consignados en las tablas: 2, 3, 4 y 5 de la sección 2.3.1.1 y de

los bloques: *Initialize*, *Configure current range*, *Initiate*, *measure current* y *close* en el uso del picoamperímetro, esta información esta consignada en las tablas: 6, 7 y 8 de la sección 2.4.1.1, como se evidencia, en la Figura 26 se observa el diagrama de bloques básicos para la lectura de datos mediante el nanovoltímetro y picoamperímetro.

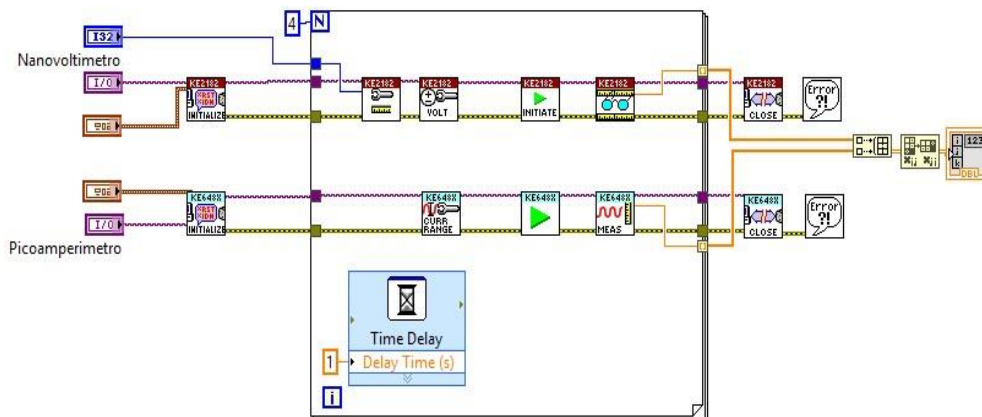


Figura 26. Programación para la lectura de datos por medio de los equipos

### 3.3 Conexiones en el sistema





Teniendo como finalidad facilitar el proceso de medición del sistema se decide implementar una sonda de medición conformada por cuatro electrodos con su respectivo sistema de conmutación e intercambio de posición.

La función del sistema de conmutación es hacer la conexión entre el Nanovoltímetro y el Picoamperímetro con el modelo funcional de medición de conductividad eléctrica, para efectuar el intercambio de posición de los electrodos y tomar las mediciones de tensión y corriente necesarias en cada una de las configuraciones anteriormente mencionadas (ver sección 2.2.2) aplicando el método de Van der Pauw.

Este sistema consta de una serie de actuadores controlados mediante el software LabVIEW a través de un microcontrolador. Programado para llevar a cabo las activaciones de dichos actuadores en el proceso de intercambio de posición, realizando las conexiones respectivas con los terminales deseados.

En la tabla 9 se encuentra una breve descripción a cerca de los principales materiales utilizados en el sistema de conmutación.

Tabla 9  
Descripción de los Materiales utilizados en el sistema de conmutación.

	<p>B&amp;K Precision 1672 Fuente de Alimentación de Triple Salida.</p>	<p>El modelo 1672 es una fuente de poder regulada de salida triple con cuatro indicadores digitales. La fuente provee una salida fija de 5V/ 3A y dos variables de 0 – 32V/ 0 – 3A (Precision, 2005).</p>
	<p>Tarjeta Modulo Relé De 16 Canales</p>	<p>Los contactos de los relevadores están diseñados para conmutar cargas de hasta 10 A y 250VAC (30VDC). Las entradas de control se encuentran aisladas con opto acopladores para minimizar el ruido percibido por el circuito de control mientras se realiza la conmutación de la carga.</p>
	<p>Tarjeta de desarrollo STM32F103C8</p>	<p>Esta tarjeta de desarrollo está basada en un microcontrolador STM32F103C8, con un cristal que maneja una frecuencia de reloj de 2.8MHz Incluye un regulador de tensión LM1117 de 3.3V proporcionando una corriente de hasta 800mA, comunicación USB. (STMicroelectronics, 2015)</p>
	<p>Cable Adaptador Convertidor A Serial Rs232</p>	<p>El Cable Convertidor USB a Serial RS232 convierte un puerto USB a puerto serial RS232 DB9 para conectar, monitorear y controlar un dispositivo serial (Park, 2011).</p>

Por otro lado, la placa utilizada para las conexiones del sistema de conmutación se elaboró con ayuda del software EAGLE debido a que es un software de automatización de diseño electrónico (EDA) que permite conectar sin problemas diagramas esquemáticos, además de la realización del enrutamiento de PCB.

En la Figura 27 se observa el circuito esquemático utilizado para la fabricación de la placa.

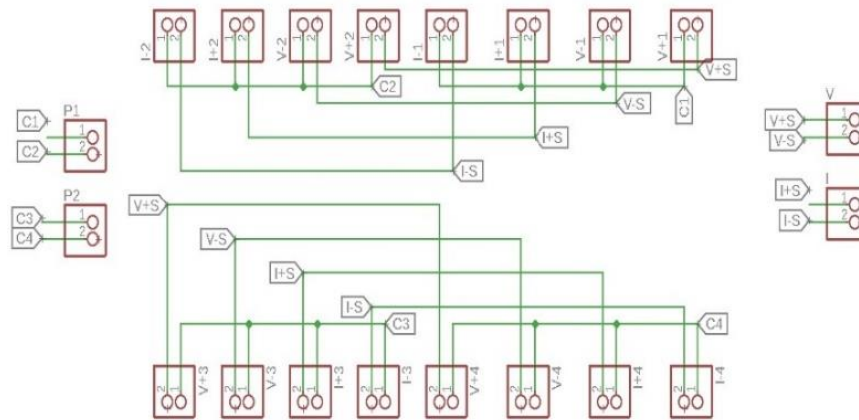


Figura 27. Circuito esquemático.

En el circuito anteriormente mencionado se consideran aspectos específicos de tamaño y posición de la tarjeta de 16 canales y la sonda de medición, para la correcta ubicación de los componentes que lo conforman.

En los extremos laterales de la placa se encuentran ubicados los terminales necesarios para la toma de mediciones, es decir, en un lado los de las cuatro puntas fijas que se unen al modelo funcional y en el otro lado los que se conectan a los equipos.



Figura 28. Sistema de conmutación e intercambio de posición.

En la figura 28 se observa el resultado final del sistema de conmutación, los materiales mencionados anteriormente se encuentran en el interior de la caja y esta permite su fácil conexión.

A continuación, se encuentra una pequeña lista de conexiones necesarias para llevar a cabo el proceso de medición:

1. Entre el modelo funcional, los terminales de medición del nanovoltímetro y el picoamperímetro al sistema de conmutación e intercambio de posición.
2. Entre el sistema de conmutación y el puerto de comunicación del nanovoltímetro y el picoamperímetro mediante sus respectivos cables RS232 a USB al computador.
3. Entre el sistema de conmutación a la fuente de alimentación.

Después se sitúa la muestra sobre la base del prototipo y se ubican los electrodos en la periferia de esta, siguiendo las recomendaciones nombradas en la sección 2.2.

Finalmente se configura la interfaz suministrando la información que en ella se solicita.

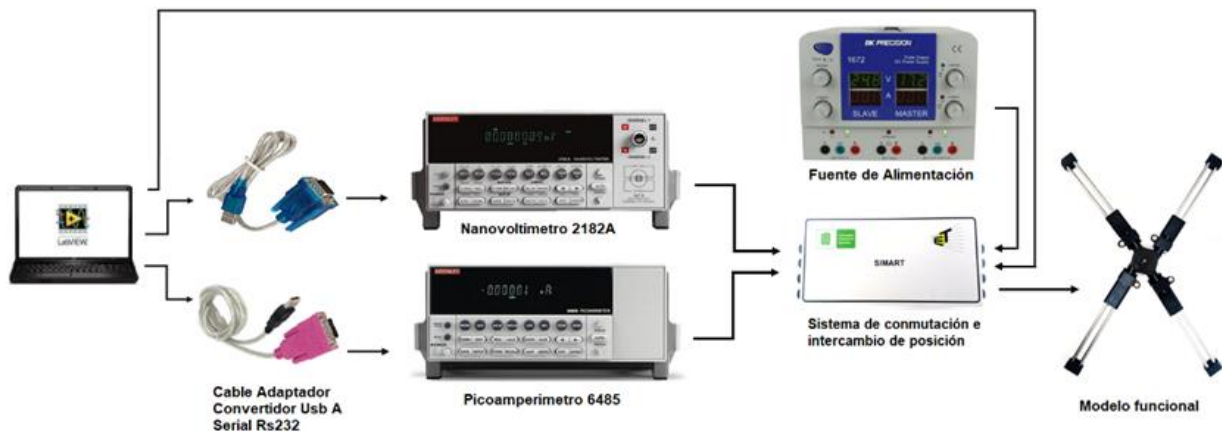


Figura 29. Diagrama de Conexiones del sistema.

La Figura 29 muestra un esquema general de las conexiones anteriormente mencionadas.

## 4. Resultados

Este capítulo presenta la descripción de la interfaz y la programación en el software LabVIEW, así como también la verificación del funcionamiento del sistema con la ayuda de los resultados obtenidos del valor de la conductividad eléctrica en 5 muestras.

### 4.1 Interfaz en el software

Esta interfaz fue diseñada de manera intuitiva y amigable con el usuario. En la parte izquierda se muestra una lista con información relacionada con las conexiones previas que son necesarias para garantizar la correcta aplicación del método de Van der Pauw. En la parte derecha, hay una sección con 5 pestañas, cada una hace referencia a una parte del proceso de adquisición y análisis de datos (ver figura 30).



Figura 30. Ventana principal de la interfaz.

En la figura 31 se observa la primera pestaña en la cual se realiza la configuración de los equipos, es decir se especifica el puerto serial en el que se encuentra conectado cada uno de ellos y se ajustan sus parámetros.

Configuración de los Equipos    Especificaciones de la muestra    Medidas Obtenidas    Resultados    Graficas Ra-Rb

### Configuración de los Equipos

The image shows three configuration panels for different equipment:

- Picoamperímetro 6485 Keithley:**
  - Configuración del Puerto Serial:** Baud Rate (9600), Flow Control (None), Parity (None), Data Bits (8), Stop Bits (1.0).
  - Puerto Serial:** Dropdown menu showing COM1.
- Nanovoltímetro 2182A Keithley:**
  - Configuración del Puerto Serial:** Baud Rate (9600), Flow Control (None), Parity (None), Data Bits (8), Stop Bits (1.0).
  - Puerto Serial:** Dropdown menu showing COM1.
  - Selección del Canal:** Voltage Channel 1 (0).
- Microcontrolador:**
  - Puerto Serial:** Dropdown menu showing COM1.

Figura 31. Pestaña para la configuración de los equipos.

En la segunda pestaña se ingresan los datos requeridos de la muestra, es decir el espesor y la distancia entre las puntas. En la figura 32 se muestra la imagen de esta pestaña, en la parte izquierda se observa la imagen que describe las variables y, el texto que señala aquellas que se deben ingresar independientemente de la geometría de la muestra. En la parte derecha, por otro lado, se debe seleccionar la forma de la muestra (rectangular, circular o cuadrada) y se deben ingresar las dimensiones requeridas según cada geometría.

Especificaciones de la Muestra

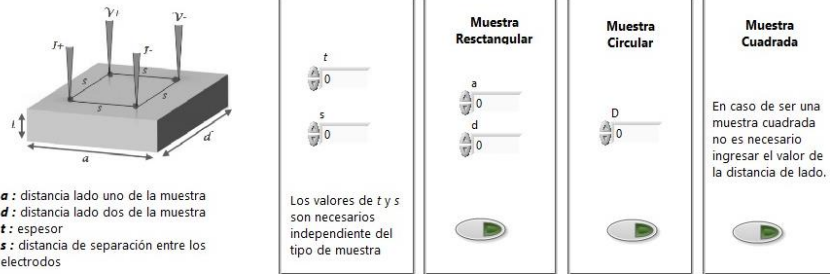


Figura 32. Pestaña para las especificaciones de la muestra.

El programa fue elaborado con el fin de visualizar el comportamiento del material para una variación de 6 diferentes valores de tensión aplicada.

Debido a que no se contó con una fuente de tensión programable, la variación de tensión se realizó de forma manual.

En la Figura 33 se presenta la tercera pestaña, en la cual se aprecian 6 indicadores pertenecientes a la ubicación del barrido, cada uno de ellos enciende cada vez que el valor del barrido deba ser modificado, además se muestran los valores de tensión y corriente obtenidos en cada valor de la variación.

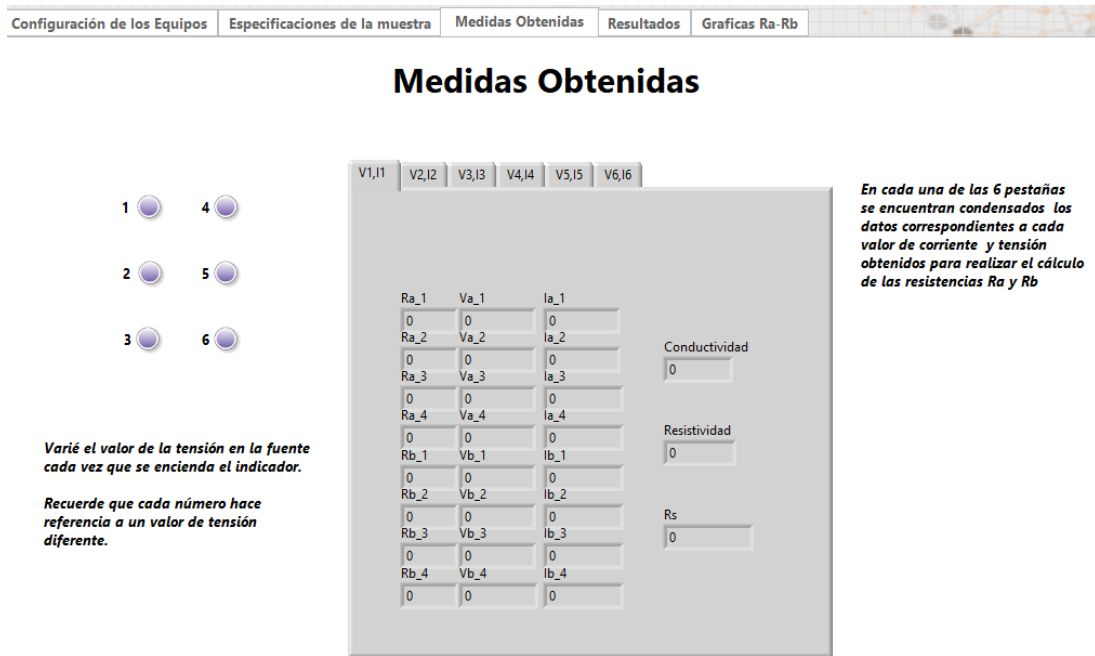


Figura 33. Pestaña de Medidas Obtenidas.

La cuarta pestaña se puede apreciar en la Figura 34, la cual permite visualizar la tabla de resultados, que contiene los valores de Ra, Rb, los factores de corrección f y k, la resistencia superficial (Rs), la resistividad y la conductividad obtenidos para cada uno de los valores de tensión aplicados.

**Resultados**

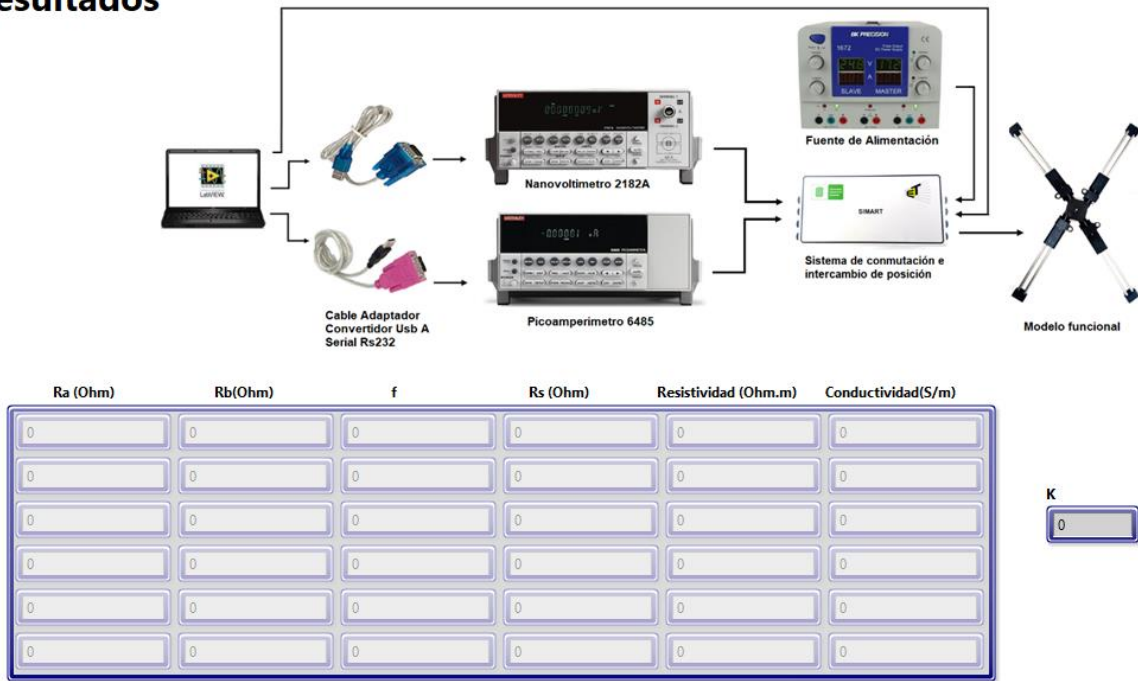


Figura 34. Pestaña de Resultados.

Para finalizar, en la quinta pestaña (Figura 35) se observan las gráficas de Ra y Rb resultantes. En la parte derecha se observa una serie de 8 pestañas pertenecientes a las gráficas individuales de Ra y Rb, mientras que en la parte izquierda se muestra una gráfica que contiene todas las curvas de Ra y Rb obtenidas.

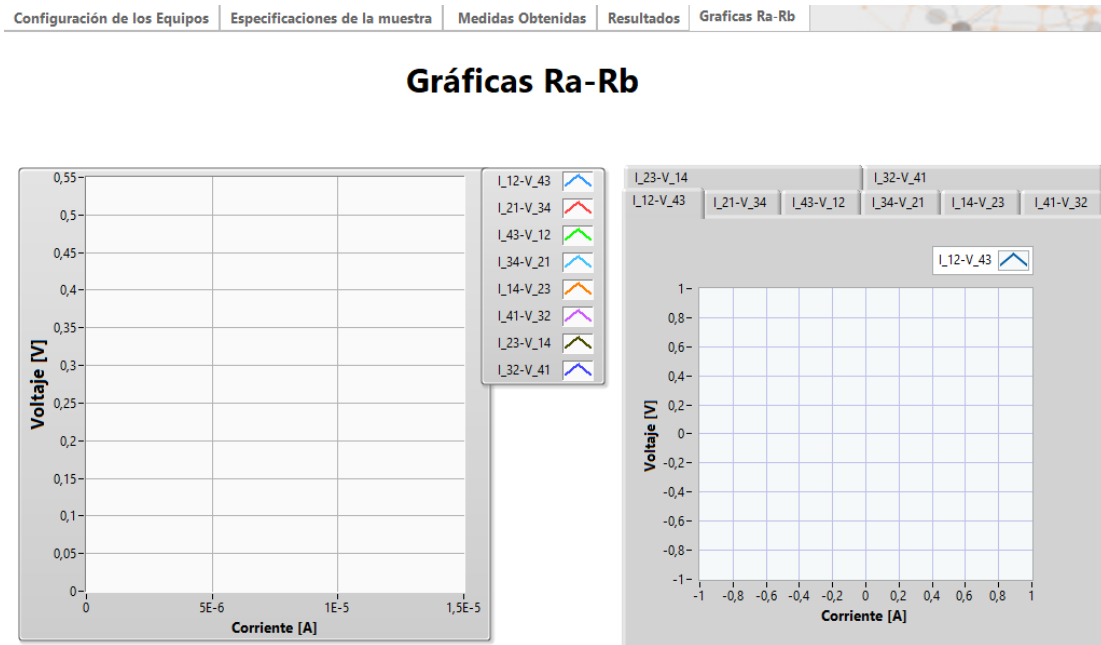


Figura 35. Pestaña Graficas Ra-Rb.

#### 4.2. Programación del software

La interfaz fue programada en el software LabVIEW, está se encuentra dividida en tres partes, la primera de ellas, la activación de los actuadores a través del microcontrolador, la segunda, la adquisición de datos a partir del nanovoltímetro y el picoamperímetro, por último la aplicación de las ecuaciones propias del método de Van der Pauw para el cálculo del valor de la conductividad (sección 2.2) y la realización de las curvas I-V propias del material de estudio.

- Programación de actuadores

La activación de los actuadores se realiza mediante el sistema de conmutación e intercambio de posiciones. Dicho intercambio de posiciones se realiza de acuerdo con las configuraciones establecidos en el método de Van der Pauw para el cálculo de Ra y Rb.

La activación de los actuadores se lleva a cabo mediante la programación del microcontrolador STM32, que es configurado a través de su puerto serial, puesto que LabVIEW cuenta en su paleta de funciones con una sección llamada VISA la cual contiene bloques que permiten configurar, programar y depurar instrumentos con puerto serial (RS232/RS485).

- Programación de adquisición de datos

Debido a que el programa está configurado para realizar el cálculo de la conductividad eléctrica de un material mediante el método de Van der Pauw, se hace necesario conocer el valor de las resistencias  $R_a$  y  $R_b$ . Estos valores son calculados con los resultados de las mediciones de tensión y corriente en las configuraciones específicas del método. Cada valor es el promedio de 10 mediciones de corriente y tensión.

- Programación para cálculo del valor de la conductividad

Aplicando la ecuación (25) propuesta por Van der Pauw para el cálculo de la conductividad eléctrica a películas delgadas se hace uso tanto de la información adquirida a través de la interfaz acerca de las dimensiones propias de la película como de los valores calculados de  $R_a$ ,  $R_b$  y los valores de los factores de corrección  $k$  y  $f$ .

El valor del factor de corrección  $k$  se obtiene al ingresar las dimensiones de la película, esta información es comparada con valores contenidos en la tabla propuesta por Green y Gunn (tabla 1).

Una vez se conocen los valores de las variables requeridas por el método de Van der Pauw (ecuación (25)) se procede a calcular el valor de conductividad.

Con el fin de visualizar los resultados obtenidos, se construyó una tabla donde se encuentran agrupados los valores principales de los parámetros correspondientes al comportamiento del material.

### 4.3 Verificación del funcionamiento del sistema

Con el fin de corroborar el correcto funcionamiento del sistema de medición de conductividad eléctrica, se realizó la medición de este parámetro en 5 muestras de materiales y geometría diferentes. Algunas de ellas son de tipo comercial y otras fabricadas en laboratorio.

**4.3.1 Película Oxido de Estaño dopado con Flúor (FTO).** Las películas delgadas de óxido de estaño dopado con flúor (FTO) hacen parte del grupo de óxidos conductores transparentes (TCO), los cuales presentan aplicaciones en fabricación de celdas solares de película delgada, dispositivos optoelectrónicos, sensores, etc. debido a su conductividad y su alta transparencia óptica. (*Chantarat et al., 2013*).

La muestra de óxido de estaño dopado con flúor empleada para la verificación es una muestra comercial que cuenta con unas dimensiones de 7.4cm \* 2.6 cm de lado con un espesor de 500nm. En la figura 36 se observa la película delgada y la ubicación de los contactos en la misma.

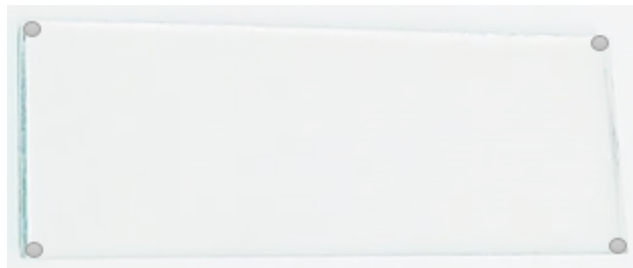


Figura 36. Película delgada FTO.

En la figura 37 se observan las curvas correspondientes a las 8 configuraciones propuestas por el método de Van der Pauw, estas están divididas en dos grupos de 4 curvas, las cuales representan  $R_a$  y  $R_b$  respectivamente. En ella los dos grupos de curvas presentan un comportamiento lineal, evidenciando el comportamiento de tipo óhmico de los contactos.

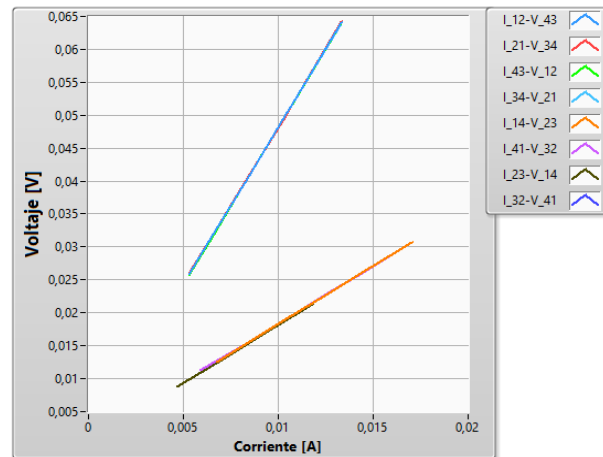


Figura 37. Gráficas Ra-Rb para Película delgada de FTO.

Los resultados obtenidos de la medición de la película delgada de FTO se encuentran condensados en la figura 38, en la cual se evidencia el barrido en tensión aplicado que abarca desde 0.3 V a 0.8 V con pasos de 0.1V. En la tabla con los resultados obtenidos se evidencia que los valores de resistividad obtenidos se encuentran dentro del rango de resistividades presentado en (Tuyen et al., 2019), donde se estudia la resistividad en películas delgadas de FTO por síntesis de spray pirólisis. En este el rango de resistividades varía desde 0.53 mΩ.cm hasta 6.50 mΩ.cm, al realizar la conversión a metros y calculando su inverso, el rango de la conductividad de estas películas esta entre 15.38 kS/m hasta 188.67 S/m.

El hecho de que valor promedio de conductividad obtenido experimentalmente sea de 139.20 kS/m, y que se encuentre dentro del rango, corrobora el funcionamiento de la interfaz mediante la aplicación del método de Van der Pauw.

## Resultados

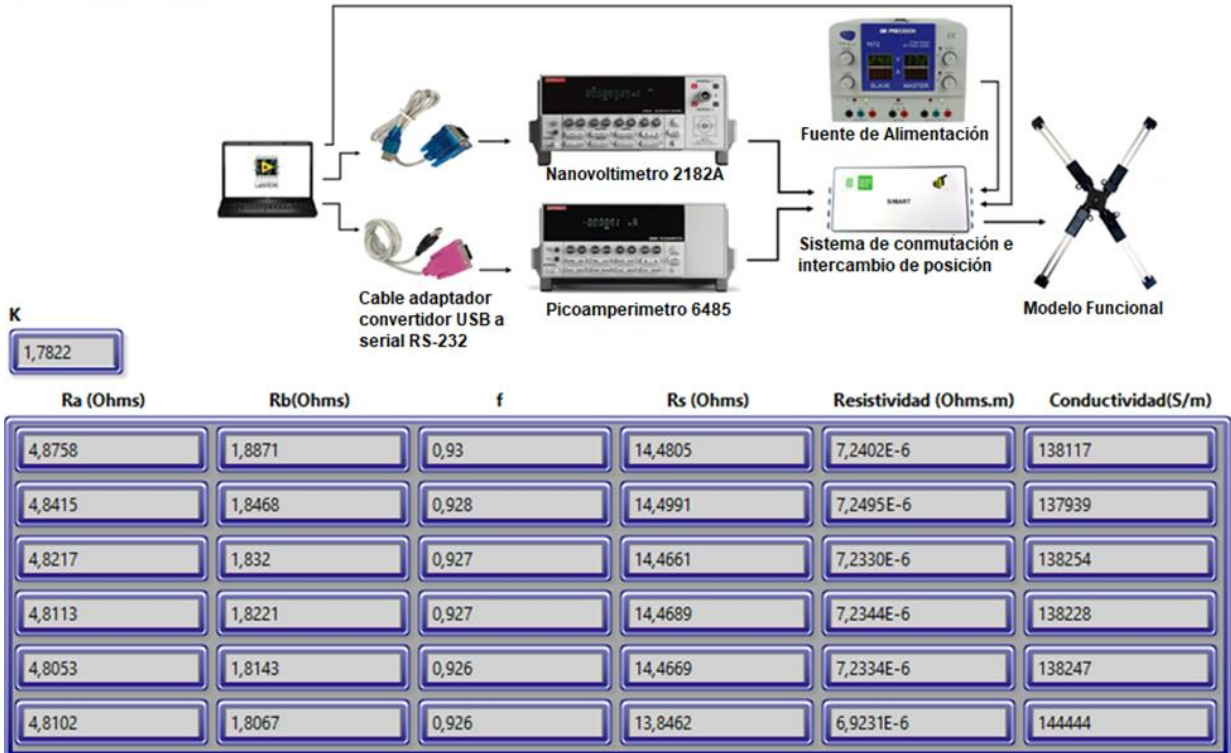


Figura 38. Pestaña de resultados en la interfaz para la película delgada de FTO.

**4.3.2 Película delgada de Sulfuro de Estaño (SnS).** Investigaciones recientes sobre dispositivos fotovoltaicos enfatizan la en el campo de estudio de dispositivos fotovoltaicos la investigación de nuevos materiales es un aspecto importante puesto que estos deberían ser eficientes, rentables, menos tóxicos y abundantes en la naturaleza.

Un material como el sulfuro de estaño (SnS) que es un semiconductor de tipo p es de considerable interés debido a sus propiedades físicas y su potencial para generar energía a gran escala (Reddy et al., 2006).

La muestra de sulfuro de estaño cuenta con unas dimensiones de 1.1cm \* 0.7 cm de lado con un espesor de 1.2um. En la figura 39 se observa la película delgada y la ubicación de los contactos en la misma.



Figura 39. Muestra de SnS.

El barrido en tensión aplicado para la medición de la película delgada de SnS fue de 1.5 V a 26.5 V con pasos de 5 V. Los resultados obtenidos se observan en la figura 40, donde se evidencia que el valor promedio de la conductividad es de 3.81 S/m, este valor es corroborado mediante del rango de resistividades presentado en (Hegde et al, 2018), en el cual se estudia la resistividad en películas delgadas de SnS por evaporación térmica. En este el rango de resistividades varía desde 7.8  $\Omega$ .cm hasta 32.5  $\Omega$ .cm, al realizar la conversión a metros y calculando su inverso, el rango de la conductividad de estas películas esta entre 3.08 S/m hasta 12.82 S/m.

## Resultados

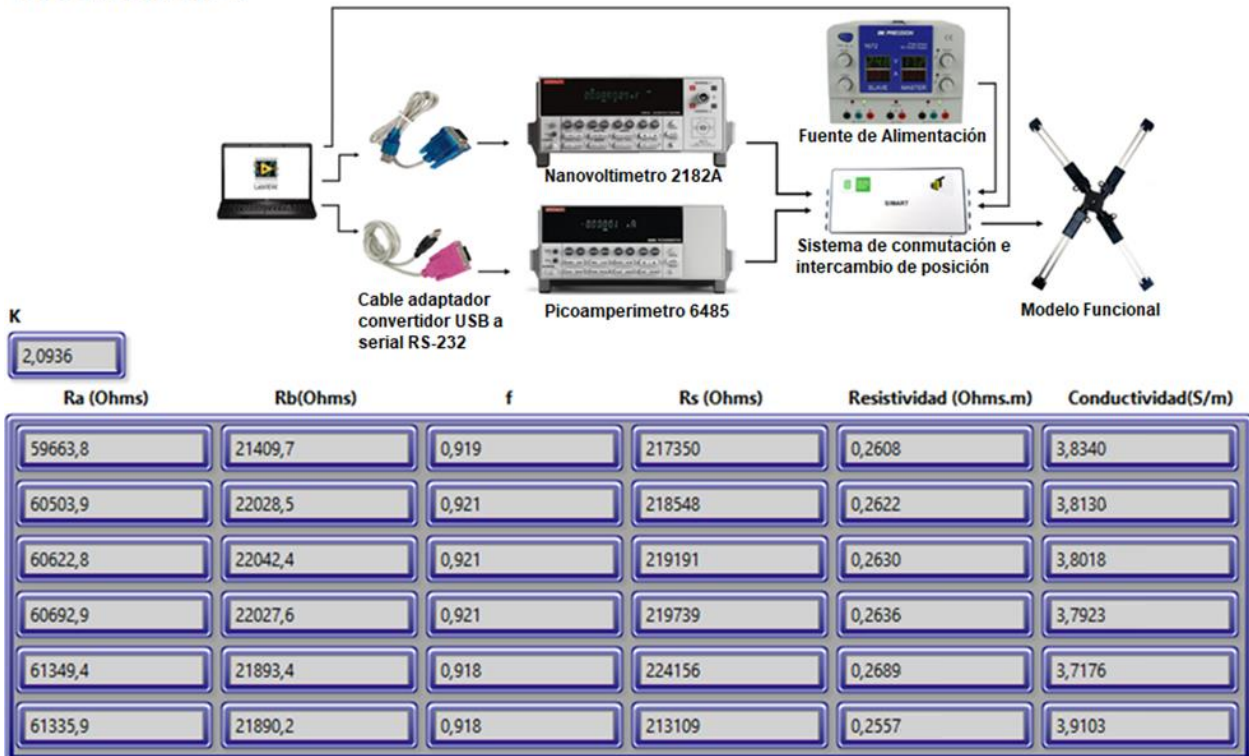


Figura 40. Pestaña de resultados en la interfaz para la muestra de SnS.

En la figura 41 se evidencian dos grupos de curvas correspondientes a Ra y Rb las cuales presentan comportamiento lineal, esto debido al tipo de contacto formado, en este caso tipo óhmico.

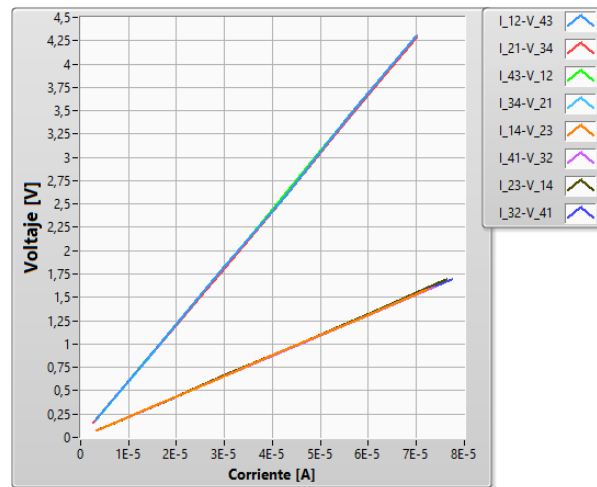


Figura 41. Gráficas Ra-Rb para la muestra de SnS.

**4.3.3 Silicio con película de platino.** El platino de símbolo Pt es un metal de transición con buenas propiedades físicas y eléctricas. El platino no se oxida con el aire, pero reacciona, dependiendo de las condiciones con elementos como el silicio.

Las películas de Silicio con película delgada de platino han sido objeto de investigación debido a la capacidad de estas para formar contactos óhmicos y contactos Schottky en sustratos de silicio, debido a su uso en la fabricación de dispositivos semiconductores (K, 1976).

La muestra de silicio con película de platino cuenta con unas dimensiones de 7.3mm \* 6.3 mm de lado con un espesor de 90nm. En la figura 42 se observa la película delgada y la ubicación de los contactos en la misma.



Figura 42. Muestra de silicio con película de platino.

Los resultados obtenidos de la medición de la película de silicio con película de platino se encuentran condensados en la figura 43, en la cual se evidencia el barrido en tensión aplicado que abarca desde 0.7 V a 4.2 V con pasos de 0.7 V.

El rango de resistividades presentado en (Da Silva et al., 2007), donde se estudia la resistividad en películas delgadas de silicio con película de platino por haz de iones enfocado es de  $0.7 \Omega \cdot \text{cm}$  hasta  $7 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ , al realizar la conversión a metros y calculando su inverso, el rango de la conductividad de estas películas esta entre 142.85 S/m hasta 142.85 kS/m. El valor promedio de la conductividad obtenido de la tabla de resultados presentada en la figura 39 es de 32.70 kS/m. El hecho de que valor promedio de conductividad obtenido se encuentre dentro del rango corrobora el funcionamiento de la interfaz mediante la aplicación del método de Van der Pauw.

### Resultados

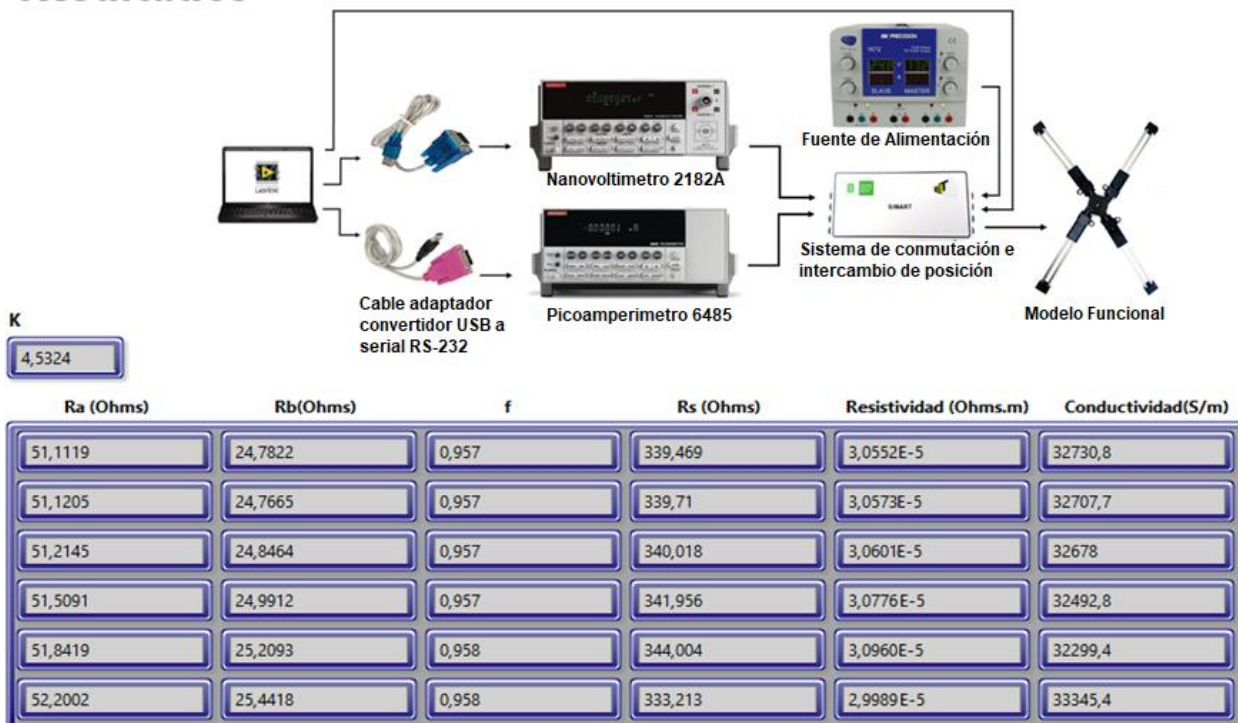


Figura 43. Pestaña de resultados en la interfaz de la muestra de silicio con película de platino.

En la figura 44 se observan que las curvas correspondientes a las 8 configuraciones propuestas por el método de Van der Pauw, estas están divididas en dos grupos de 4 curvas, las cuales representan Ra y Rb respectivamente evidenciando un comportamiento lineal debido al tipo de contacto que forma la película con los electrodos, este caso un contacto tipo óhmico.

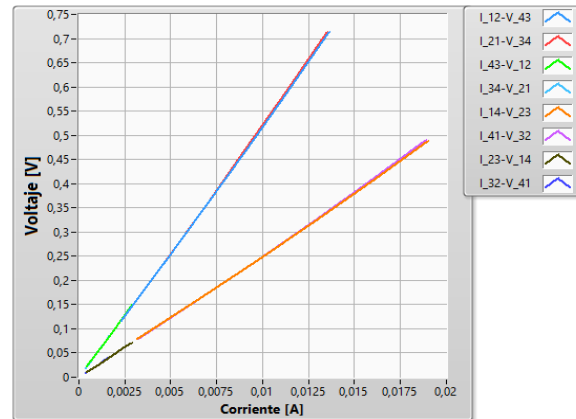


Figura 44. Gráficas Ra-Rb para la muestra de silicio con película de platino.

**4.3.4 Película de Óxido de Zinc (ZnO).** El Óxido de Zinc (ZnO) es un material semiconductor, debido a sus características físicas (ópticas y eléctricas) ha despertado gran interés en el desarrollo de dispositivos fotovoltaicos. Por ser un material de costo relativamente bajo puede emplearse como elemento estructural de cualquier tipo de celda fotovoltaica (Norton et al., 2004).

La muestra de óxido de zinc cuenta con unas dimensiones de 2.4cm \* 1.3 cm de lado con un espesor de 350nm. En la figura 45 se observa la película delgada y la ubicación de los contactos en la misma.



Figura 45. Película de ZnO.

Los resultados obtenidos de la medición de la película de ZnO se encuentran condensados en la figura 46, en la cual se evidencia el barrido en tensión aplicado que abarca desde 5 V a 5.5 V con pasos de 0.5 V.

El valor promedio de conductividad obtenido fue de 1.8611 S/m. Para realizar la confirmación del debido funcionamiento de la interfaz, se corrobora que este valor se encuentra dentro del rango de resistividades presentado en (Spin-coating, 2016), donde se estudia la resistividad en películas delgadas de ZnO por sol-gel. En este el rango de resistividades varía desde 0.1  $\Omega$ .cm hasta 100  $\Omega$ .cm, al realizar la conversión a metros y calculando su inverso, el rango de la conductividad de estas películas esta entre 1 S/m hasta 1000 S/m.

### Resultados

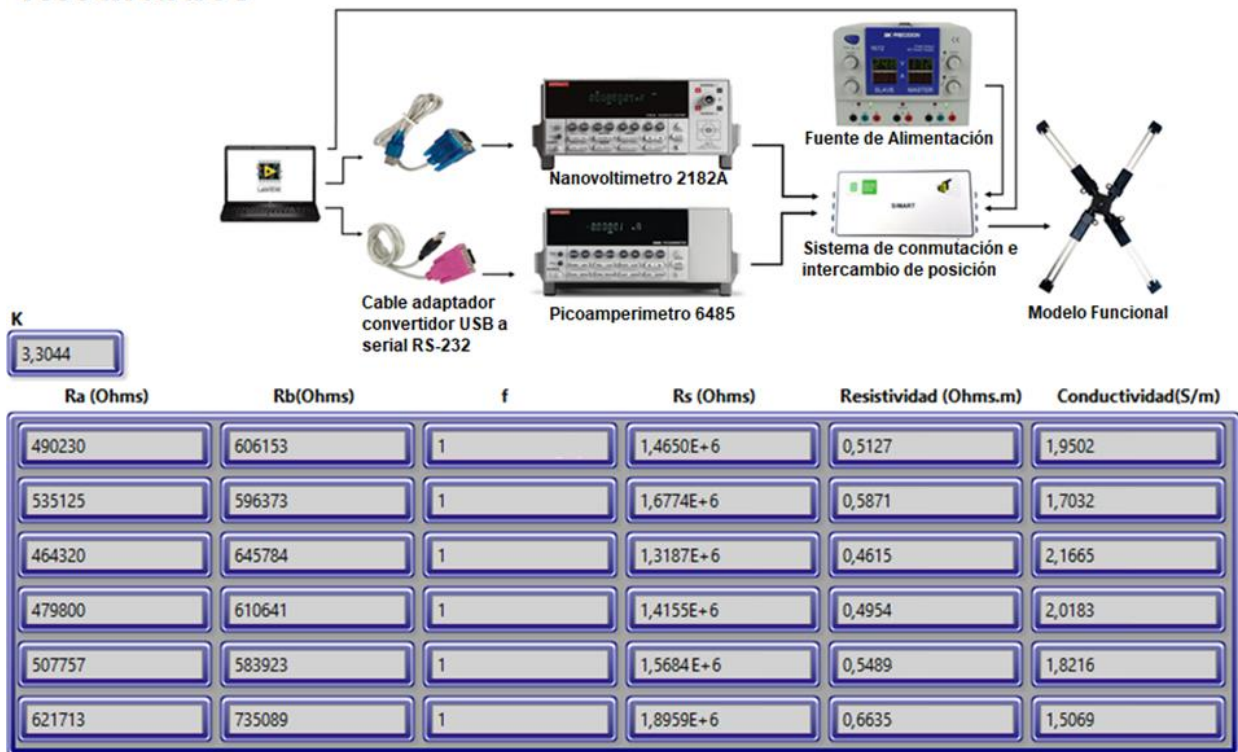


Figura 46. Pestaña de resultados en la interfaz de la muestra de ZnO.

En la figura 47 se observan las curvas correspondientes a las 8 configuraciones propuestas por el método de Van der Pauw, estas están divididas en dos grupos de 4 curvas, las cuales representan Ra y Rb respectivamente. Los dos grupos de curvas presentan un comportamiento lineal, evidenciando el comportamiento de tipo óhmico de los contactos.

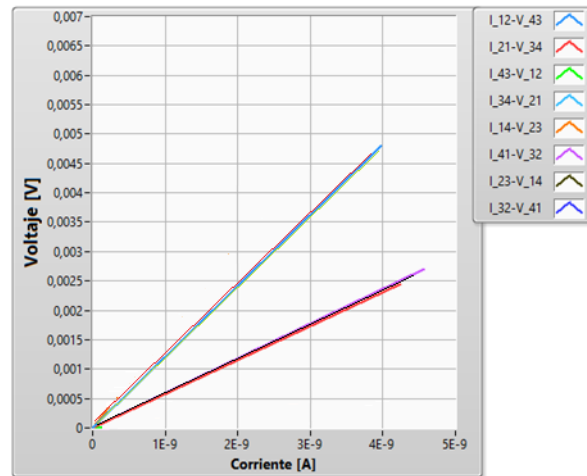


Figura 47. Gráficas Ra-Rb para la película de ZnO.

**4.3.5 Oblea de Silicio.** Una oblea es una fina lámina de material semiconductor, que es fabricada en diámetros que varían aproximadamente desde 1 pulgada hasta 11.8 pulgadas con un grosor del orden de los nanómetros, se obtienen del corte de grandes cilindros de material semiconductor y luego son pulidas.

El silicio es un material semiconductor abundante, de gran importancia en la industria debido a su uso como material básico para la fabricación de celdas solares y variedad de dispositivos semiconductores.

La muestra de oblea de silicio cuenta con unas dimensiones de 4.5cm de diámetro con un espesor de 200um. En la figura 48 se observa la película delgada y la ubicación de los contactos en la misma.



*Figura 48.* Oblea de Silicio.

- Modificación de los contactos.

En el proceso de medición de conductividad de los semiconductores un aspecto importante a considerar es el tipo de contacto que se forma debido a la juntura metal-semiconductor.

Puesto que se busca un contacto de tipo óhmico, de forma que la resistencia del contacto sea muy baja y no se vean afectadas las características eléctricas por la existencia del contacto metálico, en la sección (2.1.4) se especifican las condiciones para formar un contacto de este tipo.

Debido a que la oblea de Silicio con la que se cuenta para la medición es tipo P, hace necesario que el metal del que se encuentran fabricados los contactos posea ciertas características, específicamente que el valor de su función de trabajo sea mayor al del valor de la función de trabajo del semiconductor, es decir mayor que la función de trabajo del silicio.

El metal seleccionado fue el tungsteno (W) debido a que cuenta con una función de trabajo con un valor de 5.22 eV, mientras que el silicio posee un valor de 4.85 eV (Vaxa Software, n.d.).

En la Figura 49 se observa la ubicación de los pequeños cuadros de tungsteno que entra en contacto el modelo funcional y la oblea de silicio.



Figura 49. Oblea de silicio con los contactos de Tungsteno.

Los resultados obtenidos de la medición de la oblea de silicio encuentran condensados en la figura 50, en la cual se evidencia el barrido en tensión aplicado que abarca desde 0.7 V a 1.2 V con pasos de 0.1 V.

En la figura 50 se evidencia el comportamiento óhmico esperado de la unión de los contactos con el semiconductor a través de las curvas correspondientes a Ra y Rb.

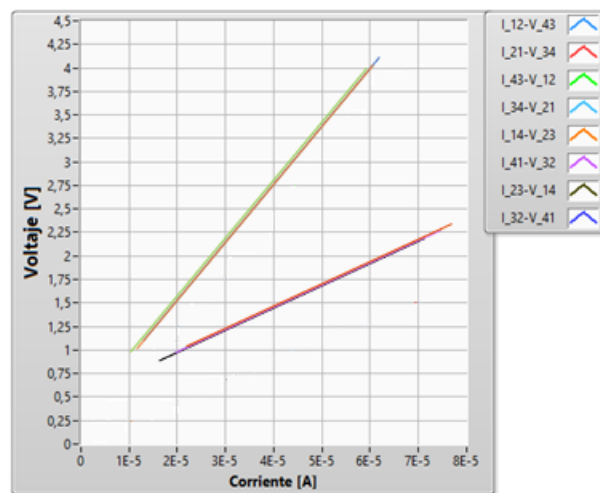


Figura 50. Gráficas Ra-Rb para la oblea de silicio.

La oblea de silicio tipo P utilizada en el cálculo del valor de conductividad presenta un valor promedio de resistividad de  $0.0034 \Omega \cdot \text{cm}$ , tal como se observa en los valores de la tabla que se encuentra en la figura 51, dicha oblea fue adquirida mediante una compra online y en su hoja de

especificaciones presenta un rango para el valor de resistividad que abarca desde 0.002  $\Omega \cdot \text{cm}$  a 3  $\Omega \cdot \text{cm}$  (Standars, 2014) y puesto que el valor calculado mediante la interfaz se encuentra dentro de estos valores, se corrobora su funcionamiento.

## Resultados

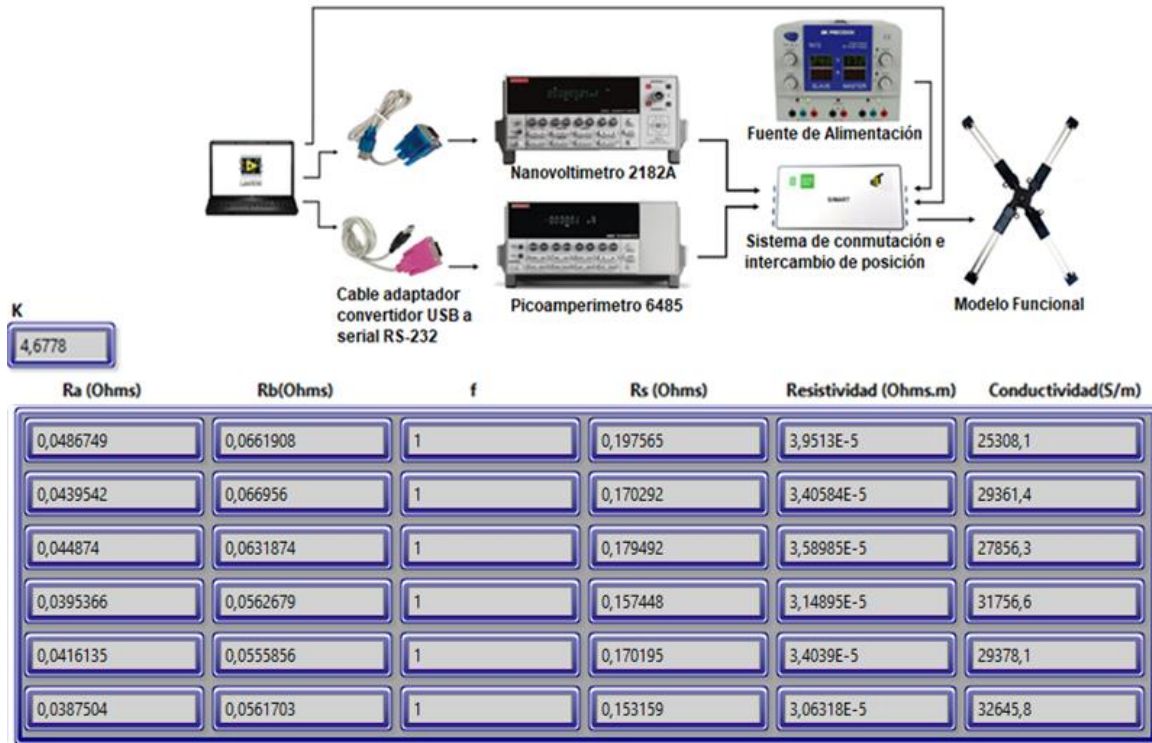


Figura 51. Pestaña de resultados en la interfaz de la obleas de silicio.

### 4.4 Errores en el proceso de medición

En el proceso de medición diversos factores como las limitaciones presentadas por los instrumentos, el método de medición y la influencia de la persona que la realiza, afectan en el resultado obtenido, generando una diferencia entre el valor verdadero de la magnitud y la cantidad obtenida luego de medir.

Para el cálculo del error en la medición en este proyecto se consideró el efecto de la utilización del sistema de conmutación e intercambio de posición, además del error debido a la posición de los contactos obteniendo un porcentaje de error de 2.23 % y 1.92E-03 % respectivamente,

evidenciando que al ser un error no mayor del 3% el sistema de medición presenta resultados confiables.

- Error por utilización del sistema de conmutación e intercambio de posición.

Con el fin de estimar el error producido al utilizar el sistema de conmutación e intercambio de posición, el cálculo de la conductividad de la película delgada de FTO se realizó dos veces, la primera de ellas haciendo uso del sistema de conmutación cuyos resultados se encuentran en la sección 4.3.1 y la segunda de ellas sin hacer uso del sistema de conmutación.

En la figura 52 se presentan los resultados de la medición de la conductividad sin el uso del sistema de conmutación e intercambio de posición.

### Resultados

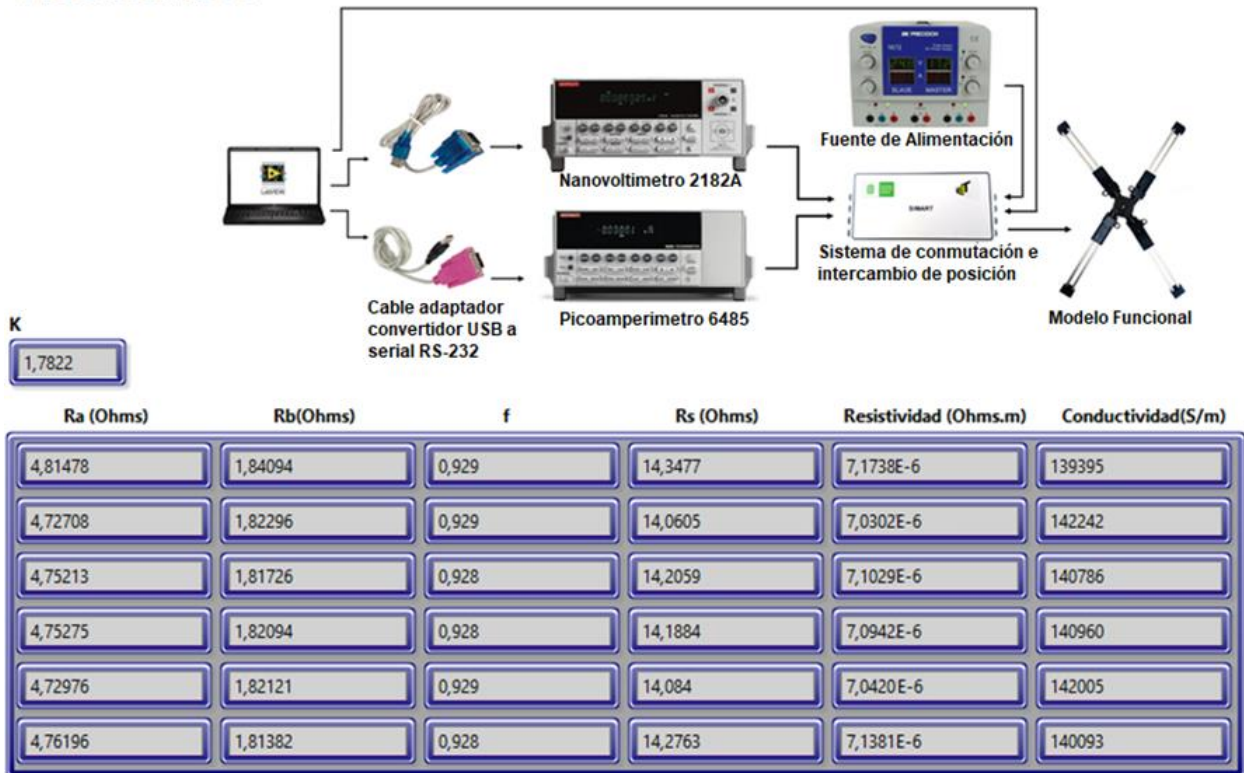


Figura 52. Pestaña de resultados en la interfaz para la película delgada de FTO sin hacer uso del sistema de conmutación.

Haciendo uso de los resultados obtenidos se calculó el valor del error relativo (tabla 10) producido al utilizar el sistema de conmutación e intercambio de posición.

Tabla 10

*Cálculo del porcentaje de error en la medición haciendo uso del sistema de conmutación.*

Con sistema de conmutación e intercambio de posición [kS/m]	Sin sistema de conmutación e intercambio de posición [kS/m]	%E
138.11	139.39	0,91
137.93	142.24	3,02
138.25	140.78	1,79
138.22	140.96	1,93
138.24	142.00	2,64
144.44	140.09	3,10

El promedio del porcentaje de error inducido al hacer uso del sistema de conmutación e intercambio de posición fue 2,23 %.

- Error por posición de los contactos en la muestra.

El método de Van der Pauw recomienda la ubicación de los contactos en la periferia de la muestra, en caso de que los contactos no se encuentren exactamente en la periferia, sino ubicados a una cierta distancia respecto a las esquinas, el valor en la medición de la conductividad se ve afectado.

En este trabajo el error inducido por la ubicación de los contactos se calcula debido a que la ubicación de estos es realizada de forma manual, generando diferencias en la ubicación exacta de

los 4 contactos, este valor es calculado por medio de la ecuación (36) propuesta por Koon (Koon, 1989) para determinar la magnitud de dicho error.

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = -2,212\left(\frac{d}{D}\right)^4 \tag{36}$$

Donde d hace referencia a la distancia del extremo de la muestra a la ubicación del contacto, mientras que D es la distancia entre bordes de esta, tal como se observa en la figura 53.

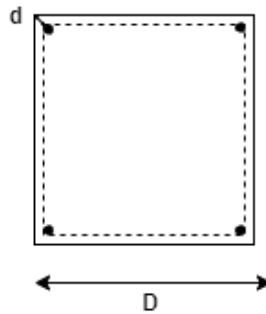


Figura 53. Ubicación de los contactos en la muestra.

En la tabla 11 se observa el valor de la distancia entre los bordes de la muestra, mientras que la distancia del extremo de la muestra al punto en el que se ubican los contactos se encuentra en la tabla 12, además de la tabla 13 donde se encuentra el valor de  $\Delta\rho/\rho$  propio de la ubicación.

Tabla 11

Valores de las distancias entre los extremos de la muestra.

Extremos	Distancia [mm]
1-2	25.8
2-3	26.2
3-4	25.7
4-1	25.9

Tabla 12

*Valores de las distancias de los contactos en los extremos de la muestra.*

Puntas	Extremos [mm]
1	0.99
2	0.89
3	1.1
4	1

Tabla 13

*Cálculo del error  $\Delta P/P$  producido en los extremos de la muestra*

Puntas	Extremos
1	-4.60 E-06
2	-2.82 E-06
3	-7.11 E-06
4	-4.71 E-06
Total	-1.92 E-05

El valor del error total en cada posición se observa en la tabla 14 y es calculado debido a cada uno de los contactos, es decir la suma de los errores generados por cada uno de los contactos.

Tabla 14

*Porcentaje de error debido a las posiciones de los contactos.*

Extremos
1.92E-03%

## 5. Conclusiones

A partir de los objetivos planteados, se presentan las conclusiones obtenidas en el desarrollo del presente trabajo, las cuales evidencian el cumplimiento en su totalidad.

- La interfaz desarrollada en el software labview se presenta como un ejecutable(.exe). Esta fue elaborada de forma que su manejo sea intuitivo y amigable al usuario, permite realizar la implementación del sistema de medición basado en el método de Van der Pauw para el cálculo de la conductividad eléctrica de materiales semiconductores de película delgada, siendo un apoyo didáctico que permite ver el funcionamiento del método mediante sus diversas ventanas.
- El programa posee la opción de configurar los parámetros del puerto serial del pico-amperímetro modelo 6485 y el nano-voltímetro modelo 2182A, con el fin de garantizar el correcto intercambio de información con el computador.
- La interfaz permite la visualización de los datos obtenidos de tensión y corriente adquiridos a lo largo del proceso de medición haciendo uso del pico-amperímetro y el nano-voltímetro, mediante una serie de tablas. Además, estas proporcionan los resultados de los valores de resistencia propias de las configuraciones específicas en la aplicación del método de Van der Pauw.
- El programa cuenta con una ventana de visualización de resultados en la cual se presentan los valores de resistencia superficial, resistividad y conductividad propios de la muestra de estudio, así como los parámetros necesarios para el cálculo de dichos valores.
- La verificación del funcionamiento del sistema implementado se llevó a cabo mediante la medición de 5 muestras de diversos materiales: óxido de estaño dopado con flúor, sulfuro de

estaño, silicio con película de platino, óxido de zinc y oblea de silicio, con resultados de conductividad de 13920 S/m, 3.81 S/m, 32700 S/m, 1.86 S/m y 29339 S/m respectivamente, estos valores obtenidos por medio de la interfaz se encuentran dentro de los rangos especificados en la literatura acerca de las muestras.

- La interfaz permite la visualización de curvas I-V pertenecientes a Ra y Rb, valores necesarios para el cálculo de la conductividad de películas delgadas.
- Se evidenció la importancia del tipo de contacto formado en la unión metal-semiconductor en el proceso de medición de la conductividad eléctrica de la oblea comercial de silicio, puesto que los datos obtenidos en la medición realizada con los contactos planteados del modelo funcional no presentaron los resultados esperados, por tal razón se realizó una modificación en ellos haciendo uso de Tungsteno en sus puntas para lograr la unión metal-semiconductor de tipo óhmico.

## 6. Recomendaciones

Se sugiere como trabajo futuro implementar diferentes escenarios de medición para el sistema, con el fin de estudiar el comportamiento eléctrico de los materiales semiconductores ante la variación de algunos parámetros. A continuación, enumeramos algunas alternativas.

- Implementación de un control de temperatura para determinar la influencia de ésta sobre la muestra con el fin de estudiar procesos de transporte eléctrico de materiales semiconductores.

- La fotoconductividad permite determinar el comportamiento eléctrico de los materiales semiconductores ante una excitación óptica. Haciendo uso de equipos adicionales tales como lámparas que permiten variar la radiación incidente sobre la muestra.
- Medidas de efecto Hall para determinar la concentración y el tipo de portadores.

**Referencias Bibliográficas**

- Appavou Fabiani, Adam Brown, Bärbel Epp, Duncan Gibb, Bozhil Kondev, Angus McCrone, Hannah E. Murdock, Evan Musolino, Lea Ranalder, Janet L. Sawin, Kristin Seyboth, Jonathan Skeen, F. S. (2019). *Renewables in Cities - 2019 Global Status Report*. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/28496/REN2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttp://www.ren21.net/cities/wp-content/uploads/2019/05/REC-GSR-Low-Res.pdf>
- Ariza Picón, A. M., & Torres Duarte, J. A. (2018). *Modelo Funcional Para Medir La Conductividad En Películas Delgadas Semiconductoras Empleadas En La Fabricación De Celdas Solares*. Universidad Industrial de Santander
- Arrayás, J. L., Manuel & TRUEBA. (2007). *Electromagnetismo, circuitos y semiconductores*. Madrid : Universidad Rey Juan Carlos
- Askeland, D., Fulay, P., & Wright, W. (2012). *Ciencia e Ingeniería de Materiales* (p. 921).
- Burden, L. V., & Accuracy, H. (2013). *Picoammeter specs*. 1–3.
- Carriazo, J. G., Saavedra, M. J., & Molina, M. F. (2017). ¿Hacia dónde debe dirigirse la enseñanza de la Ciencia de Materiales? *Educacion Quimica*, 28(2), 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.eq.2016.10.002>
- Chantararat, N., Chen, Y. W., Hsu, S. H., Lin, C. C., Chiang, M. C., & Chen, S. Y. (2013). Effect of oxygen on the microstructural growth and physical properties of transparent conducting fluorine-doped tin oxide thin films fabricated by the spray pyrolysis method. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2(9), 131–135. <https://doi.org/10.1149/2.005309jss>
- Chwang, R., Smith, B. J., & Crowell, C. R. (1974). Contact size effects on the van der Pauw method for resistivity and Hall coefficient measurement. *Solid-State Electronics*, 17(12), 1217–1227. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(74\)90001-X](https://doi.org/10.1016/0038-1101(74)90001-X)
- Cornils, M., Doelle, M., & Paul, O. (2007). Sheet resistance determination using symmetric structures with contacts of finite size. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 54(10), 2756–2761. <https://doi.org/10.1109/TED.2007.906219>
- Cortez, F., Cercado Mancero, J., Vera Lorenti, A., & Valle Flores, E. (2018). Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia. *Espacios*, 39, 10. <https://www.revistaespacios.com/a18v39n32/a18v39n32p22.pdf>
- Da Silva, M. M., Vaz, A. R., Moshkalev, S. A., & Swart, J. W. (2007). Electrical characterization of platinum thin films deposited by focused ion beam. *ECS Transactions*, 9(1), 235–241. <https://doi.org/10.1149/1.2766894>

- Garcia-Vazquez, V. (2017a). Biased four-point probe resistance. *Review of Scientific Instruments*, 88(11). <https://doi.org/10.1063/1.4995389>
- Graff, J., & Segundo, A. (2009). La evolución de labview: Décadas de desarrollo. *Instrumentation Newsletter*, 21(2), 3
- Green, M.A., & Gunn, M. W. (1971). The evaluation of geometrical effects in four point probe measurements. In *Solid-State Electronics* (Vol. 14, Issue 11). Pergamon. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(71\)90029-3](https://doi.org/10.1016/0038-1101(71)90029-3)
- Green, Martin A. (2015). *Third Generation Photovoltaics : Recent Theoretical Progress*. July.
- Hegde, S. S., Kunjomana, A. G., Murahari, P., Prasad, B. K., & Ramesh, K. (2018). Vacuum annealed tin sulfide (SnS) thin films for solar cell applications. *Surfaces and Interfaces*, 10(August 2017), 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2017.12.003>
- Heo, Y. W., Ivill, M. P., Ip, K., Pearton, S. J., Chisholm, M. F., & Steiner, T. (2008). *ZnO : growth* . . June 2004, 34–40.
- Kao, K. C. (2004). Charge Carrier Injection from Electrical Contacts. *Dielectric Phenomena in Solids*, 327–380. <https://doi.org/10.1016/b978-012396561-5/50016-5>
- K, a D. M. (1976). The Properties of Thin Platinum Silicide Films. *Platinum Metals Review*, 20(1), 9.
- Keithley Instruments, I. (2001). Model 6485 picoammeter. User's Manual, 2–14.
- Keithley Instruments, I. (2004). Model 2182 and 2182a nanovoltmeter. User's Manual , 2–5
- Koon, D. W. (1989a). Effect of contact size and placement, and of resistive inhomogeneities on van der Pauw measurements. *Review of Scientific Instruments*, 60(2), 271–274. <https://doi.org/10.1063/1.1140422>
- Koon, D. W., Bahl, A. A., & Duncan, E. O. (1989a). Measurement of contact placement errors in the van der Pauw technique. *Review of Scientific Instruments*, 60(2), 275–276. <https://doi.org/10.1063/1.1140423>
- Lim, S. H. N., McKenzie, D. R., & Bilek, M. M. M. (2009). Van der Pauw method for measuring resistivity of a plane sample with distant boundaries. *Review of Scientific Instruments*, 80(7). <https://doi.org/10.1063/1.3183503>
- Micoli, I., Edler, F., Pfnür, H., & Tegenkamp, C. (2015). The 100th anniversary of the four-point probe technique: The role of probe geometries in isotropic and anisotropic systems. *Journal of Physics Condensed Matter*, 27(22). <https://doi.org/10.1088/0953-8984/27/22/223201>
- Molina Martínez, J. M., & Jiménez Buendía, M. (2010). Programación gráfica para ingenieros. *Marcombo S.A*

- Norton, D. P., Heo, Y. W., Ivill, M. P., Ip, K., Pearton, S. J., Chisholm, M. F., & Steiner, T. (2004). ZnO: Growth, doping & processing. *Materials Today*, 7(6), 34–40. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(04\)00287-1](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(04)00287-1)
- Pardo Collantes, L. A. B. V. (2006). Fundamentos de electrónica digital. Ediciones Universidad de Salamanca
- Park, C. B. (2011). USB to RS232 Adapter cable Data Sheet. *Future Technology Devices International Limited*, 10, 1–29.
- Perloff, D. S. (1977). Four-point sheet resistance correction factors for thin rectangular samples. *Solid State Electronics*, 20(8), 681–687. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(77\)90044-2](https://doi.org/10.1016/0038-1101(77)90044-2)
- Precision, B. (2005). *Model 1672 triple output power supply contents. User's Manual*, 1–36.
- Reddy, N. K., Ramesh, K., Ganesan, R., Reddy, K. T. R., Gunasekhar, K. R., & Gopal, E. S. R. (2006). Synthesis and characterisation of co-evaporated tin sulphide thin films. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 83(1), 133–138. <https://doi.org/10.1007/s00339-005-3475-y>
- Robert, R., & Berleze, S. M. (2007). *Teorema de van der Pauw* (Issue 1). [www.sbfisica.org.br](http://www.sbfisica.org.br)
- Shackerlford, James, F. (2005). Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros. *Prentice Hall*, 840.
- S.M.Sze, & Ng, K. K. (2007). *Physics of semiconductor devices*. John Wiley Sons.inc., Hoboken.
- Spin-coating, S. S. (2016). *Optical and Electrical Properties of ( 002 ) -Oriented ZnO Films Prepared on Amorphous*. 19(002), 113–117.
- STMicroelectronics. (2015). *STM32F103x8 STM32F103xB: Medium-density performance line ARM®-based 32-bit MCU with 64 or 128 KB Flash, USB, CAN, 7 timers, 2 ADCs, 9 com. interfaces [datasheet]*. August, 1–117.
- Standars, V. (2014). *Resistivity Standard*.
- Tuyen, L. T. C., Jian, S. R., Tien, N. T., & Le, P. H. (2019). Nanomechanical and material properties of fluorine-doped tin oxide thin films prepared by ultrasonic spray pyrolysis: Effects of F-doping. *Materials*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/ma12101665>
- Van der Pauw, L. J. (1958). A Method of measuring specific resistivity and hall effect of disc or arbitrary shape. *Philips Research Reports*, 13(1), 1–9.
- Van der Ziel, A. (1968). *Solid state physical electronics*. Prentice Hall
- Vaxa Software. (n.d.). *Función de Trabajo para el efecto Fotoeléctrico*. [http://www.vaxasoft.com/doc\\_edu/qui/w\\_efe.pdf](http://www.vaxasoft.com/doc_edu/qui/w_efe.pdf)

Viñas, L. P., & Cardona, J. C. (2003). *Dispositivos electrónicos y fotónicos. fundamentos. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL*

Wargo, C., & PChem Associates. (n.d.). Characterization of Conductors for Printed Electronics. In *White Papers* (pp. 1–12).

Wilson, B. (2007). *Introduction to Physical Electronics*. <http://cnx.org/content/col110114/1.4/>

Zwanenburg, F. A., Dzurak, A. S., Morello, A., Simmons, M. Y., Hollenberg, L. C. L., Klimeck, G., Rogge, S., Coppersmith, S. N., & Eriksson, M. A. (2013). Silicon quantum electronics. *Reviews of Modern Physics*, 85(3), 961–1019. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.85.961>