

**MODELO FUNCIONAL PARA MEDIR LA CONDUCTIVIDAD EN PELÍCULAS  
DELGADAS SEMICONDUCTORAS EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE  
CELDA SOLARES**

**ANDRÉS MAURICIO ARIZA PICÓN  
JOHANNY ALEXIS TORRES DUARTE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA  
Y DE TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2018**

**MODELO FUNCIONAL PARA MEDIR LA CONDUCTIVIDAD EN PELÍCULAS  
DELGADAS SEMICONDUCTORAS EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE  
CELDA SOLARES**

**ANDRÉS MAURICIO ARIZA PICÓN  
JOHANNY ALEXIS TORRES DUARTE**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para  
Optar al título de INGENIERO ELECTRICISTA.**

**DIRECTORA DEL TRABAJO DE GRADO**

**Mónica Andrea Botero Londoño**

**Dra. en Ciencias Física**

**CODIRECTORA DEL TRABAJO DE GRADO**

**María Alejandra Mantilla Villalobos**

**Dra. en Ingeniería Electrónica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA  
Y DE TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2018**

## DEDICATORIA

*A mis padres Martha Liliana Duarte Landinez y Ángel María Torres Flórez*  
**Johanny Alexis Torres Duarte**

*A mi madre Irma Picón Martínez, la razón de mi vida y de todo lo que hago; por su  
paciencia, apoyo incondicional y amor infinito.*

**Andrés Mauricio Ariza Picón.**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Dra. Mónica Andrea Botero Londoño, por su incondicional acompañamiento, dirección y consejos brindados durante el desarrollo del proyecto.

A la Dra. María Alejandra Mantilla Villalobos, por sus aportes y consejos para la elaboración de este proyecto.

Al grupo de investigación GISEL por su aporte económico y préstamo de equipos necesarios para realización del proyecto.

Al profesor Gerardo Gordillo, Jennifer Estrada, Camilo Otálora y al Grupo de Materiales Semiconductores y Energía Solar (GMS&ES), de la Universidad Nacional de Colombia, por la donación de la película delgada semiconductor utilizada en este proyecto.

A Fabián Solano por su colaboración en la impresión 3D del equipo utilizado en el proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	16
1. OBJETIVOS .....	18
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
2. MARCO TEÓRICO .....	19
2.1 SEMICONDUCTORES .....	19
2.1.1 Conductividad eléctrica .....	19
2.2 CONDUCTIVIDAD EN SEMICONDUCTORES.....	21
2.3 TIPOS DE MEDICIÓN.....	22
2.3.1 Método de las dos puntas. ....	22
2.3.2 Método de las cuatro puntas. ....	24
2.3.3 Método de Van Der Pauw. ....	26
2.4 CONTACTOS A PRESIÓN .....	33
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....	34
3.1 DISEÑO DEL PROTOTIPO .....	34
3.1.1 Materiales.....	36
3.2 EQUIPOS UTILIZADOS.....	39
3.3 CONFIGURACIÓN DE EQUIPOS .....	40
3.3.1 Calibración del Nanovoltímetro. ....	41
3.3.2 Calibración del Picoamperímetro. ....	41
3.4 CONEXIONES .....	42
3.5 TOMA DE MEDIDAS.....	44
3.5.1 Interfaz Nanovoltímetro 2182A.....	44
3.5.2 Interfaz Picoamperímetro 6485. ....	46
3.6 TRATAMIENTO Y CARACTERÍSTICAS DE LAS MUESTRAS .....	49
3.6.1 Lámina de cobre .....	50
3.6.2 Películas delgadas .....	51

3.7 PROCEDIMIENTO para la TOMA DE MEDIDAS .....	54
3.7.1 Procedimiento para las medidas de cobre (Cu) .....	54
3.7.2 Procedimiento para las medidas de silicio (Si) .....	56
3.7.3 Procedimiento para medir Sulfuro de Estaño (SnS) .....	56
3.7.4 Procedimiento para medir Óxido de Zinc (ZnO) .....	57
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	58
4.1 OBTENCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD .....	58
4.1.1 Placa de cobre puro .....	58
4.1.2 Oblea de silicio recubierta con película delgada de platino .....	62
4.1.3 Sulfuro de estaño (SnS) .....	65
4.1.4 Óxido de Zinc (ZnO) .....	69
5. CONCLUSIONES .....	72
BIBLIOGRAFÍA .....	78

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 2.1 Factores de corrección (k) para muestras con los contactos ubicados simétricamente en geometrías bidimensionales. (Rectangular, cuadrada y circular.) .....	30
Tabla 3.1 Comparación de materiales de impresión 3D más utilizados en la actualidad. ....	36
Tabla 3.2 Materiales analizados para la selección de los electrodos.....	37
Tabla 3.3 Equipos utilizados en la medida de conductividad, empleando el método de Van Der Pauw.....	39
Tabla 4.1 Resultados de medidas de conductividad para la placa de cobre puro, con los electrodos ubicados en los extremos de la muestra, empleando el método de Van Der Pauw.....	60
Tabla 4.2 Coeficiente de determinación para las ocho configuraciones, placa de cobre.....	60
Tabla 4.3 Resultados de medidas de conductividad para la placa silicio con película delgada de platino, con los electrodos ubicados en los extremos de la muestra, empleando el método de Van Der Pauw. ....	63
Tabla 4.4 Coeficiente de determinación para las ocho configuraciones, placa de silicio con película delgada de platino.....	63
Tabla 4.5 Resultados de medidas de conductividad para la placa de sulfuro de estaño, con los electrodos ubicados en los extremos de la muestra, empleando el método de Van Der Pauw.....	67
Tabla 4.6 Coeficiente de determinación para las ocho configuraciones, placa de sulfuro de estaño (SnS). ....	68
Tabla 4.7 Resultados de medidas de conductividad para la placa de Óxido de Zinc, el método de Van Der Pauw. ....	70
Tabla 4.8 Coeficiente de determinación para las ocho configuraciones, placa de Óxido de Zinc (ZnO). ....	70

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 2.1. Representación del método de las dos puntas. ....	23
Figura 2.2. Representación del método de las cuatro puntas. ....	25
Figura 2.3 Formas sugeridas en el método de Van Der Pauw, para las medidas. A) Forma de trébol, B) circulares, C) cuadradas, D) rectangulares. ....	27
Figura 2.4 Muestra con los contactos ubicados simétricamente. ....	30
Figura 3.1 Diseño del prototipo en SolidWorks. (Medidas en centímetros). ....	34
Figura 3.2 Montaje de la impresión 3D y los rieles. ....	38
Figura 3.3 Diagrama de bloques para medir conductividad en materiales conductores mediante el método de Van Der Pauw. ....	42
Figura 3.4 Diagrama de bloques para medir conductividad en semiconductores, empleando el método de Van Der Pauw. ....	43
Figura 3.5. Montaje de equipos, utilizado en modelo de medición Van Der Pauw. ....	43
Figura 3.6 Ventana Initialize, configuración de comunicación entre PC y Nanovoltímetro en LabVIEW. ....	45
Figura 3.7 Ventana Read, toma de la medida de tensión del Nanovoltímetro en LabVIEW. ....	46
Figura 3.8 Ventana de configuración entre el picoamperímetro y la computadora. ....	47
Figura 3.9 Ventana Configure meter- ExceLINX- Keithley. ....	48
Figura 3.10 Ventana Meter scan - ExceLINX- Keithley. ....	49
Figura 3.11 Muestra de cobre a) sin tratamiento de limpieza, b) después del tratamiento y c) Ubicación de los electrodos en la muestra de cobre. ....	51
Figura 3.12 Muestra de silicio (Si) a) Recubierta con película delgada de platino y b) Ubicación de los electrodos en la muestra. ....	52
Figura 3.13 a) Muestra de Sulfuro de estaño (SnS) y b) Ubicación de los electrodos en la muestra de Sulfuro de estaño (SnS). ....	53
Figura 3.14 a) Muestra de Oxido de Zinc (ZnO) y b) Ubicación de los electrodos en la muestra de Óxido de Zinc (ZnO). ....	54
Figura 3.15 Medidas para encontrar Ra, en el modelo Van Der Pauw. ....	55

Figura 3.16 Medidas para encontrar Rb, en el modelo Van Der Pauw .....	55
Figura 4.1 Curva I-V, para los datos obtenidos en los extremos de la muestra de cobre puro.....	59
Figura 4.2 Curva I-V, para los datos obtenidos en los extremos de la muestra de Silicio con platino. ....	62
Figura 4.3 Curva I-V, para los datos obtenidos en los extremos de la muestra de Sulfuro de estaño (SnS).....	65
Figura 4.4 Curva I-V, para los datos obtenidos en la muestra de Óxido de Zinc (ZnO). .....	69

## **LISTA DE ANEXOS**

**(Ver anexos adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)**

Anexo A. Medidas e Incertidumbre, placa de cobre puro.

Anexo B. Medidas e Incertidumbre, Silicio con película delgada de platino.

Anexo C. Medidas e Incertidumbre, Sulfuro de estaño (SnS).

Anexo D. Medidas e Incertidumbre, Óxido de Zinc (ZnO).

## RESUMEN

**TÍTULO:** MODELO FUNCIONAL PARA MEDIR LA CONDUCTIVIDAD EN PELÍCULAS DELGADAS SEMICONDUCTORAS EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE CELDAS SOLARES. <sup>1</sup>

**AUTORES:** JOHANNY ALEXIS TORRES DUARTE, ANDRÉS MAURICIO ARIZA PICÓN. <sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVE:** Conductividad, películas delgadas, Van Der Pauw, celdas solares.

### DESCRIPCIÓN:

Se diseñó un prototipo y se implementó el modelo funcional que permite medir la conductividad en películas delgadas semiconductoras, empleadas en la fabricación de celdas solares. El método elegido para la toma de medidas es el procedimiento de Van Der Pauw, ya que permite determinar la conductividad de una muestra, sin importar su forma cuadrada, rectangular o circular, siempre que sea homogénea, sin agujeros; el área de la sección transversal de cada electrodo debe ser bastante pequeña, en relación con el área total de la muestra (el cociente entre el área de la muestra y la sección trasversal de cada electrodo, debe ser mayor o igual a 90) y preferiblemente que los contactos sean ubicados en los extremos de esta. Para la toma de medidas, se empleó un Nanovoltímetro 2182A Keithley, un Picoamperímetro 6485 Keithley, una fuente de tensión Tektronix PS280 y Multímetro mastech my-64.

El modelo cuenta con cuatro electrodos de plata, los cuales son intercambiables por cualquier otro material conductor, ya sea cobre u oro; también cuenta con una base que sirve para dar soporte a las muestras, un apoyo en el que se encuentran unidos los cuatro rieles móviles del prototipo; estos últimos, son de acero inoxidable, garantizando mayor vida útil al equipo y gracias a la longitud de estos, el modelo puede adaptarse a las características de las muestras, adicionando la posibilidad de medir muestras de gran tamaño y de menor área. La desventaja con la que cuenta el montaje es su temperatura de operación, ya que la máxima temperatura que puede alcanzar sin afectarse es de 70°C.

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado

<sup>2</sup> Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones. Directora: Mónica Andrea Botero Londoño. Codirectora: María Alejandra Mantilla Villalobos

## ABSTRACT

**TITLE:** FUNCTIONAL MODEL TO MEASURE CONDUCTIVITY IN SEMICONDUCTORY STRAIGHT FILMS USED IN THE MANUFACTURE OF SOLAR CELLS. <sup>3</sup>

**AUTHORS:** JOHANNY ALEXIS TORRES DUARTE, ANDRÉS MAURICIO ARIZA PICÓN. <sup>4</sup>

**KEYWORDS:** Conductivity, thin film, Van Der Pauw, solar cells.

### DESCRIPTION:

A prototype was designed, and the functional model was implemented to measure conductivity in thin semiconductor films, used in the manufacture of solar cells. The method chosen for taking measurements is the Van Der Pauw procedure, since it allows determining the conductivity of a sample, regardless of its square, rectangular or circular shape, provided it is homogeneous, without holes; the cross-sectional area of each electrode must be quite small, in relation to the total area of the sample (the quotient between the area of the sample and the cross-section of each electrode must be greater than or equal to 90) and preferably that the contacts are located at the ends of this. For taking measurements, a 2182A Keithley Nanovoltmeter, a Keithley 6485 Picoamperimeter, a Tektronix PS280 voltage source and mastech my-64 Multimeter were used.

The model has four silver electrodes, which are interchangeable by any other conductive material, either copper or gold; it also has a base that serves to give support to the samples, a support in which the four mobile rails of the prototype are united; The latter are made of stainless steel, guaranteeing a longer life for the equipment and thanks to the length of these, the model can be adapted to the characteristics of the samples, adding the possibility of measuring large samples and smaller areas. The disadvantage of the assembly is its operating temperature, since the maximum temperature that can be reached without being affected is 70 ° C.

---

<sup>3</sup> Degree work.

<sup>4</sup> Faculty of physicommechanical engineering. School of electrical engineering, electronics and telecommunications. Director: Mónica Andrea Botero Londoño. Co-director: María Alejandra Mantilla Villalobos.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, con el auge de la generación de energía eléctrica a partir de energías limpias, se ha venido presentando un cambio en el sector eléctrico. Algunas formas de obtener la energía eléctrica de forma limpia, son basadas en el uso de los recursos naturales articulados con la ingeniería, por ejemplo; el viento con la generación eólica, las olas del mar con generación mareomotriz, la energía solar con la generación mediante paneles fotovoltaicos; esta última, ha comenzado a jugar un rol importante en la generación de electricidad en varios países, esto, se debe a que la rápida disminución en los costos ha hecho que la electricidad no subsidiada y generada a partir de energía solar fotovoltaica (FV), pueda competir con los costos de los combustibles fósiles, cada vez, en más partes del mundo, trayendo consigo una gran variedad de productos, los cuales requieren de minuciosos estudios en todas sus características, algunas de estas son los paneles solares, inversores, baterías, entre otros<sup>5</sup>.

Los paneles fotovoltaicos están conformados por celdas solares, las cuales, a su vez, están formadas por varias capas de materiales semiconductores, por tanto, es necesario medir parámetros tales como eficiencia, temperatura y conductividad, características que pueden ser encontradas por medio de métodos de medición y modelos. Entre las técnicas de medición más importantes y eficientes, se encuentra el método de Van Der Pauw, utilizado para medir resistividad de materiales conductores y semiconductores; este método de medida está tomando fuerza en varias aplicaciones, como en la caracterización de materiales semiconductores sintetizados con un fin fotovoltaico. Cada vez es más común encontrar aportes a nivel mundial, utilizando este método de medida, tales como el Instituto Politécnico

---

<sup>5</sup> REN21, Renewables 2015 global status report, (Paris: REN21 Secretariat), 2015. 251p.

Nacional de México<sup>6</sup>, Universidad Santiago de Chile<sup>7</sup>, Universidad Nacional de Colombia<sup>8</sup>, Universidad de Connecticut, USA<sup>9</sup>; Universidad estatal de Wright, USA<sup>10</sup>; Universidad de Sathyabama, India<sup>11</sup>. Lo cual, muestra la gran aplicación del método, ya que con este mismo modelo y con leves variaciones, se puede medir el efecto Hall de un material semiconductor; al variar la temperatura, se puede ver el comportamiento de la resistividad en función de esta, obteniendo así la zona óptima de operación de los semiconductores. Después de la revolución tecnológica, los materiales semiconductores tomaron gran importancia, pues debido a sus características particulares, estos pueden comportarse como conductores o aislantes de la corriente eléctrica, según factores externos, como variación en su temperatura y dopado de materiales. Por tanto, se elabora un modelo funcional que permita medir la conductividad en películas delgadas semiconductoras, las cuales, se emplearán en la fabricación de celdas solares. Este, es el primer prototipo fabricado por el grupo de investigación GISEL en este tema. Las medidas se realizan a temperatura y presión ambiental. El prototipo es diseñado de forma tal que, sea versátil y se pueda acomodar al tamaño y forma de la muestra. Los equipos de medida son con los que cuenta el grupo de investigación GISEL.

---

<sup>6</sup> ESTRELLA RODRÍGUEZ, Julio Cesar. Mediciones eléctricas por el método de cuatro puntas en películas delgadas de interés fotovoltaico. Tesis de magister en tecnología avanzada. Altamira: Instituto Politécnico Nacional de México. Centro de investigación en ciencia aplicada y tecnología avanzada unidad Altamira, 2016, 95p.

<sup>7</sup> MICHEA MORA, Sebastián Alfonso. Propiedades magnéticas y efecto hall extraordinario en películas delgadas nanoestructuradas. Tesis de doctorado en ciencias con mención en física. Santiago: Universidad Santiago de Chile. Departamento de física, 2012, 109p.

<sup>8</sup> MELO QUINTERO, Jhon Jaither. Diseño y Construcción de un Sistema de medidas de Efecto Hall DC y AC. Tesis de magister en ciencias-física. Manizales: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, 2011, 188p.

<sup>9</sup> ADNANE L.; GOKIRMAK A. and SILVA H. High Temperature Hall Measurement Setup for Thin Film Characterization. En: American Institute of Physics. Julio, 2016. Vol. 87. No 075117, 6p.

<sup>10</sup> LOOK, C. David, Electrical Characterization of GaAs Materials and Devices. Fairborn: Wright State University. Jhon Wiley & Sons, 1989, 280p. ISBN 0-471-91702-8.

<sup>11</sup> THIRUMAVALAVANA S.; MANI K. and SAGADEVAN S. Suresh. Studies on Hall Effect and DC Conductivity Measurements of Semiconductor Thin films Prepared by Chemical Bath Deposition (CBD) method. En: Journal of Nano and Electronic Physics. Diciembre, 2015. Vol. 7, no. 4, 4p.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

- Diseñar e implementar un prototipo de modelo funcional que permita obtener la conductividad de películas delgadas semiconductoras empleando el método de Van Der Pauw.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Seleccionar los materiales para la construcción de un modelo funcional que permita determinar la resistencia superficial en películas delgadas semiconductoras.
- Determinar la configuración para ubicar los electrodos en el modelo funcional.
- Fabricar un modelo funcional que permita determinar la conductividad en películas delgadas semiconductoras basado en el método de Van Der Pauw.
- Obtener experimentalmente la resistencia superficial de películas semiconductoras empleadas en la fabricación de celdas solares mediante el método de Van Der Pauw.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 SEMICONDUCTORES

Antes de abordar el concepto de los semiconductores, es preciso recalcar los conceptos más básicos para poder comprender dicha idea.

2.1.1 Conductividad eléctrica. La conductividad eléctrica da la medida de qué tanta corriente eléctrica puede dejar pasar un cuerpo o materia a través de sí misma. La conductividad depende de la estructura atómica y molecular del material en estudio. Su unidad en el sistema internacional (SI) es el siemens por metro (S/m) u  $\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ . Se define matemáticamente como<sup>12</sup>:

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

Donde  $\sigma$  representa la conductividad eléctrica medida en S/m, y  $\rho$ , es la resistividad eléctrica.

El recíproco de la conductividad (resistividad), se simboliza por la letra griega rho ( $\rho$ ); su unidad en el sistema internacional (SI), es el Ohm por metro ( $\Omega\cdot\text{m}$ ). Se define matemáticamente como:

---

<sup>12</sup> ÁLVAREZ R., Ubaldina. Química II, Manual de actividades experimentales para el alumno. México: UNAM, Coordinación del Colegio de Ciencias y Humanidades, 1998. p.56

$$\rho = \frac{R \cdot A}{\ell} \quad (2)$$

Donde A: Área de sección transversal medida en metros cuadrados (m<sup>2</sup>).  $\ell$ : Longitud del material medida en metros (m). R: Valor de la resistencia eléctrica en Ohm ( $\Omega$ ).

La diferencia que existe entre resistividad y resistencia es que la resistividad no depende de la forma o tamaño del material, en cambio la resistencia sí; la resistividad es una propiedad específica del material y la resistencia depende de la longitud y de la sección transversal.

Comprendidas estas ideas, se puede entender mejor sobre los **materiales semiconductores**, como lo son, el silicio (Si), que es uno de los más encontrados en la naturaleza, el germanio (Ge), entre otros; ya que son los que no están definidos ni como conductores, ni como aislantes. Se puede lograr cambiar su conductividad haciendo variaciones en su temperatura, ya sea aumentándola para que se comporte como conductor, o como aislante, disminuyéndola. Todo lo contrario, ocurre con los metales, entre más se aumente la temperatura, menos conductor será el metal, y en cuanto menos temperatura se tenga, mejor conductor será<sup>13</sup>.

Para poder variar la conductividad en un material semiconductor existen varios métodos; uno de ellos ya se dio a conocer, que es por medio de la variación de la temperatura; otra forma es por dopaje, que consiste en introducir impurezas de otros elementos en el semiconductor, dependiendo del tipo de dopaje que se agregue, se

---

<sup>13</sup> SHALÍMOVA, K.V. Física de los Semiconductores. Moscú: Editorial MIR, 1975. p.16-18. ISBN 84-401-0947-4.

obtiene el semiconductor tipo P o tipo N y con esto, poder variar su capacidad de permitir el paso de la corriente; estos son los llamados *semiconductores extrínsecos*<sup>14</sup>. Lo anterior, se aplica a *semiconductores intrínsecos*, que son aquellos sin elementos de otros átomos, sin impurezas y con la misma cantidad de huecos y electrones<sup>15</sup>.

## 2.2 CONDUCTIVIDAD EN SEMICONDUCTORES

La velocidad de desplazamiento o de deriva, es aquella que alcanzan los electrones o huecos dentro del semiconductor, debido al campo eléctrico al que es sometido; estas velocidades se definen como<sup>16</sup>:

$$V_{de} = -\mu_e E ; \quad V_{dh} = \mu_h E \quad (3)$$

Donde  $V_{de}$ , es la velocidad de deriva de los electrones y  $V_{dh}$  es la velocidad de deriva de los huecos;  $\mu_e$  es la movilidad de los electrones y  $\mu_h$  es la movilidad de los huecos, en [ $cm^2/V\cdot s$ ] y  $E$ , es el campo eléctrico aplicado en [ $V/m$ ]. Por esto, la densidad de corriente está definida como<sup>17</sup>:

$$J = -e \cdot V_{de} \cdot n + e \cdot V_{dh} \cdot p = E \cdot e \cdot (\mu_e \cdot n + \mu_h \cdot p) \quad (4)$$

---

<sup>14</sup> *Ibíd.*, p.22

<sup>15</sup> *Ibíd.*, p.19.

<sup>16</sup> SZE, Simón M.; KWOK K. Ng. *Physics of semiconductor Devices*. Third Edition. Taiwan; California: A John Wiley & Sons, Inc., 2006. p.28. ISBN: 978-0-470-06830-4

<sup>17</sup> *Ibíd.*, p.30.

Donde  $n$  es la concentración de electrones,  $p$  la concentración de huecos y  $e$  representa el electrón. Por lo tanto, la conductividad en un semiconductor está dada por:

$$\sigma = e. (\mu_e. n + \mu_h. p) \quad (5)$$

La ecuación (5) es la ecuación general para todos los semiconductores<sup>18</sup>.

Cuando  $n \gg p$  para semiconductores tipo n, se tiene que:

$$\sigma = e. \mu_e. n \quad (6)$$

## 2.3 TIPOS DE MEDICIÓN

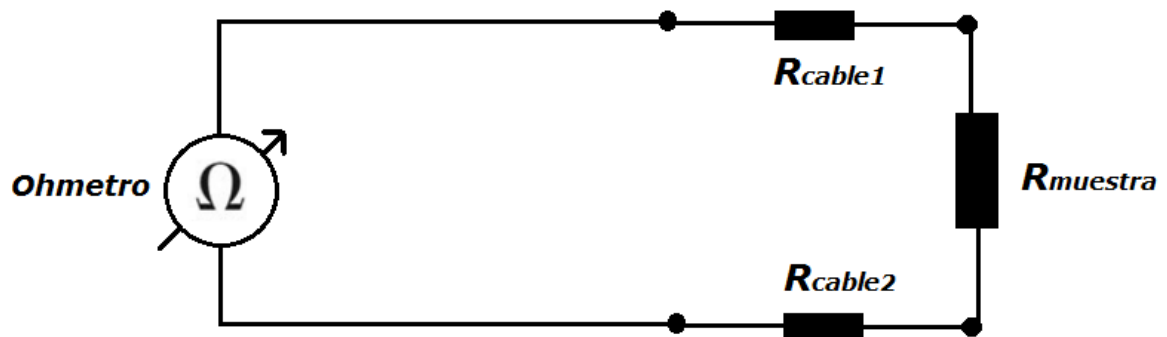
En esta sección se exponen diferentes métodos de medición de resistividad; método de las dos puntas, método de las cuatro puntas, y el método de Van Der Pauw.

2.3.1 Método de las dos puntas. Es el método más básico para medir la resistencia de un material, ya que solo es necesario, un multímetro en la opción de óhmetro y dos terminales que se ponen en contacto con la muestra.

---

<sup>18</sup> KASAP, Safa O. Principles of Electronic Materials and Devices, Third Edition. Boston: McGraw-Hill. 2006. p.380. ISBN 007-29-5791-3.

Figura 2.1. Representación del método de las dos puntas.



*Fuente: Adaptado de GIL, Salvador. Experimentos de física de bajo costo usando TIC's: Medición de resistencias a cuatro puntas o método de Kelvin. [En línea]. Universidad Nacional de General San Martín (Argentina). 2016. (Recuperado el 7 de octubre de 2018.) Disponible en [https://www.fisicarecreativa.com/unsam\\_f3/guias/activ\\_III\\_27q.pdf](https://www.fisicarecreativa.com/unsam_f3/guias/activ_III_27q.pdf).*

Como muestra la figura 2.1, al obtener la resistencia de la muestra, el resultado de la medición es la suma algebraica de las resistencias  $R_{cable\ 1} + R_{cable\ 2} + R_{muestra}$ .

Este resultado es aceptable, si se espera un valor elevado de resistencia de la muestra ( $> 10\ \Omega$ ), ya que, al ser elevado, las resistencias restantes (resistencias en cables y contactos) no toman relevancia en el resultado de la medida.<sup>19</sup>

---

<sup>19</sup> GIL, Salvador. Experimentos de física de bajo costo usando TIC's: Medición de resistencias a cuatro puntas o método de Kelvin. [En línea]. Universidad Nacional de General San Martín (Argentina). 2016. (Recuperado el 7 de octubre de 2018.) Disponible en [https://www.fisicarecreativa.com/unsam\\_f3/guias/activ\\_III\\_27q.pdf](https://www.fisicarecreativa.com/unsam_f3/guias/activ_III_27q.pdf). p.281.

Por el contrario, si el valor esperado de resistencia de la muestra es de pocos mili ohm, este método no es el apropiado para medir una resistencia de esta magnitud, ya que es casi imposible obtener el valor exacto de  $R_{muestra}$ .<sup>20</sup>

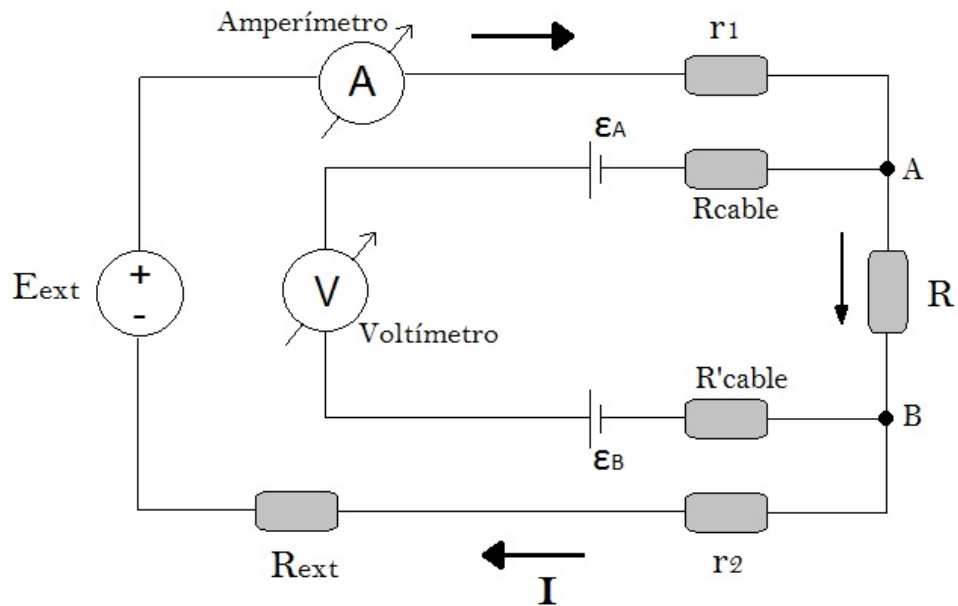
2.3.2 Método de las cuatro puntas. El método de las cuatro puntas es uno de los más utilizados cuando se requiere medir la resistividad de materiales semiconductores, una de las grandes ventajas del método, es con respecto a la configuración de los electrodos, ya que permite eliminar los potenciales que se producen por el contacto de terminales y la resistencia de los conductores utilizados en la medición. Al presentar buena exactitud, el método es ideal para medir resistencias muy pequeñas ( $<10 \Omega$ ).

Este método consiste en medir tensión y corriente a la muestra, por tanto, es necesario contar con cuatro terminales para realizar la medida, a diferencia del método anterior, la configuración consta de la combinación de dos circuitos, como se muestra en la figura 2.2:

---

<sup>20</sup> *Ibíd.*, p.282.

Figura 2.2. Representación del método de las cuatro puntas.



Fuente: Adaptado de GIL, Salvador. *Experimentos de física de bajo costo usando TIC's: Medición de resistencias a cuatro puntas o método de Kelvin.* [En línea]. Universidad Nacional de General San Martín (Argentina). 2016. (Recuperado el 7 de octubre de 2018.) Disponible en [https://www.fisicarecreativa.com/unsam\\_f3/guias/activ\\_III\\_27q.pdf](https://www.fisicarecreativa.com/unsam_f3/guias/activ_III_27q.pdf)

Como se observa en la figura 2.2, por un circuito se hace circular una corriente, que se mide con un amperímetro, y por el otro circuito, se mide tensión. La corriente a circular por el circuito donde se conecta el voltímetro es casi nula, en vista de que los voltímetros tienen una resistencia interna demasiado grande, en comparación con las resistencias presentes en el montaje;  $\varepsilon_A$  y  $\varepsilon_B$  representan las tensiones por los contactos del voltímetro, y  $R_{ext}$  es una resistencia que permite regular el paso de la corriente, para no exponer los equipos y la muestra<sup>21</sup>.

<sup>21</sup> *Ibíd.*, p.283.

2.3.3 Método de Van Der Pauw. Este método de medición fue creado por Leo J. Van Der Pauw, en 1958<sup>22</sup>.

Si se requiere medir el coeficiente Hall y resistividad tanto en semiconductores, como en conductores; este procedimiento es de los más recomendados; ya que permite hacer medidas en muestras con formas no simétricas. El método de Van Der Pauw es de los métodos más útiles y recomendados en la actualidad, ya que también permite determinar el tipo de dopado de un semiconductor, la movilidad de portadores mayoritarios, entre otros.

Para las medidas de resistividad, este método recomienda que la muestra no posea aberturas u orificios en su estructura; también sugiere que el área de contacto de cada electrodo sea bastante pequeña (el cociente entre el área de la muestra y la sección trasversal de cada electrodo debe ser mayor o igual a 90), en comparación con el área total de la muestra y que estén en la periferia de esta. Se sugiere que la muestra sea homogénea, uniforme en su espesor y bastante delgada<sup>23</sup>. La corriente que pasa a través de los contactos debe ser proporcional a la diferencia de potencial aplicada en ellos<sup>24</sup>.

Aunque se permite la aplicación del proceso para muestras con formas arbitrarias, lo más recomendable para obtener mejores resultados según Van Der Pauw, es que sean simétricas, es decir, en forma de trébol (la más aconsejable), cuadradas, circulares y rectangulares, como se muestra en la figura 2.3.

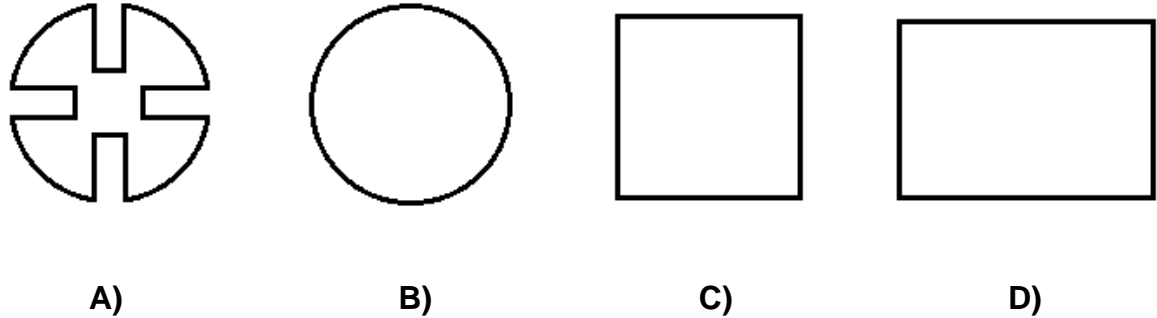
---

<sup>22</sup> PAUW van der, L. J. A method of measuring specific resistivity and Hall Effect of discs of arbitrary shape. En: Philips research Reports. Febrero, 1958. Vol. 13, no. 1, p.1.

<sup>23</sup> *Ibíd.*, p.2.

<sup>24</sup> PIERRET, F. Robert. Advanced Semiconductor Fundamentals, second edition. New Jersey: Pearson Education Inc, 2002. p.196. ISBN: 978-0130617927.

Figura 2.3 Formas sugeridas en el método de Van Der Pauw, para las medidas. A) Forma de trébol, B) circulares, C) cuadradas, D) rectangulares.



*Fuente: Adaptado de LLONTOP LÓPEZ, Paul David. Implementación de un sistema de medición de resistividad eléctrica de películas delgadas semiconductoras a bajas temperaturas. Tesis de magister en física. Lima: Universidad católica del Perú. Escuela de posgrado, 2017, p.32.*

Según L. J. van der Pauw<sup>25</sup>, para la aplicación del método, se debe tomar una lámina plana, completamente sin agujeros, y se le proporciona cuatro pequeños contactos en la periferia, ubicados de forma arbitraria; posteriormente, se aplica una corriente ( $I_{1,2}$ ) en los puntos 1 y 2 de la muestra y se mide la diferencia de potencial entre los puntos 4 y 3 ( $V_3 - V_4$ ), de tal forma que:

$$R_{12,43} = \frac{V_4 - V_3}{I_{12}}; \quad R_{23,41} = \frac{V_4 - V_1}{I_{23}} \quad (7)$$

---

<sup>25</sup> PAUW van der, L. J. A method of measuring the resistivity and hall coefficient on lamellae of arbitrary shape. En: Philips technical review. 1958. Vol. 20, no. 8, p.220.

Por lo tanto, la relación que existe entre  $R_{12,34}$  y  $R_{23,41}$  es<sup>26</sup>:

$$e \frac{-\pi R_{12,34}.t}{\rho} + e \frac{-\pi R_{23,41}.t}{\rho} = 1 \quad (8)$$

Donde t es el espesor de la muestra y  $\rho$  es la resistividad del material. La ecuación (8), se desarrolla para un caso especial, un semiplano infinito y con los contactos ubicados de forma arbitraria en su periferia. Van Der Pauw logró desplegar esta ecuación, para cuando se requiere aplicar a cualquier lámina finita, sin importar su forma, teniendo en cuenta su falta de simetría y ubicando los contactos en la periferia de la muestra de forma simétrica, por lo tanto, se tiene que<sup>27</sup>:

$$\rho = k. t. \frac{R_{12,34} + R_{23,41}}{2} . f \left( \frac{R_{12,34}}{R_{23,41}} \right) \quad (9)$$

Donde k es el factor de corrección, f es el factor de geometría y t el espesor de la muestra. Si se requiere tener resistividad volumétrica en función de la resistencia superficial, se tiene que<sup>28</sup>:

---

<sup>26</sup> LLONTOP LÓPEZ, Paul David. Implementación de un sistema de medición de resistividad eléctrica de películas delgadas semiconductoras a bajas temperaturas. Tesis de magister en física. Lima: Universidad católica del Perú. Escuela de posgrado, 2017, p.33.

<sup>27</sup> PAUW. Op. cit., p.221.

<sup>28</sup> CONDE MENDOZA, Luis Ángel. Implementación de un sistema de medición de resistividad eléctrica en películas delgadas semiconductoras por el método de Van der Pauw. Tesis de magister en física. Lima: Universidad católica del Perú. Escuela de posgrado, 2017, p.33.

$$\rho = R_s * t \quad (10)$$

Donde  $R_s$ , es resistencia superficial de la muestra y  $t$  es el espesor de la misma. Reemplazando la ecuación (10) en la ecuación (8), se puede obtener el valor de  $R_s$ , usando métodos numéricos. Según la ecuación (9) y (10), la resistencia superficial, sería tal que:

$$R_s = k \cdot \frac{R_{12,34} + R_{23,41}}{2} \cdot f\left(\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}}\right) \quad (11)$$

❖ Factor de corrección ( $k$ ): Obteniendo la longitud lateral de la muestra, con respecto a la distancia entre los electrodos y la medida del lado más largo de la misma, se puede calcular el valor de corrección  $k$ . Gracias a Green y Gunn<sup>29</sup>, se facilita el cálculo teniendo en cuenta la tabla 2.1:

---

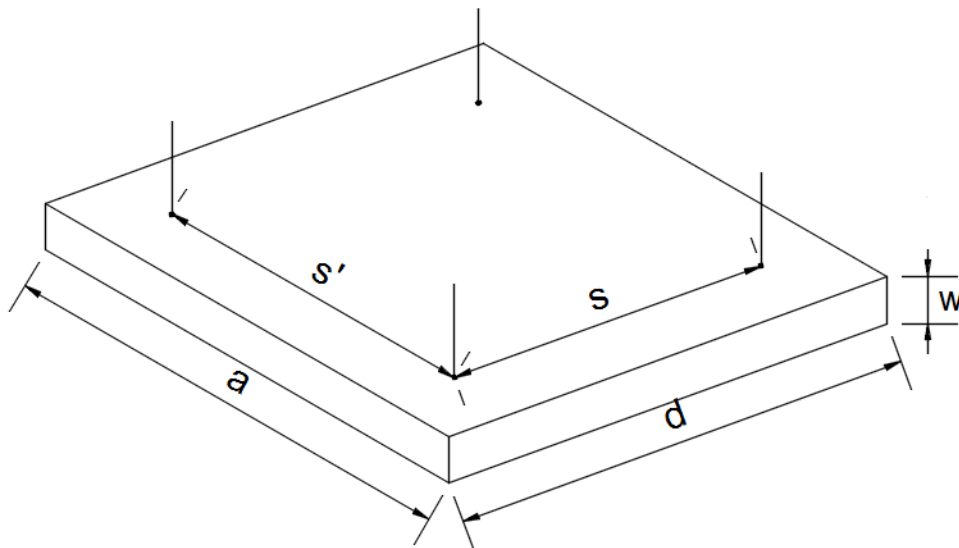
<sup>29</sup> GREEN, M. A.; GUNN, M. W. The evaluation of geometrical effects in four-point probe measurements. Brisbane: Solid-State Electronics, Vol 14. 1971, p.1167-1177.

Tabla 2.1 Factores de corrección (k) para muestras con los contactos ubicados simétricamente en geometrías bidimensionales. (Rectangular, cuadrada y circular.)

Side length or diameter Probe spacing = $\frac{d}{s}$	Circular specimen	Rectangular specimen (Fig. 2)				
		$a/d = 1.0$	$a/d = 1.2$	$a/d = 1.5$	$a/d = 2.0$	$a/d = 4.0$
1.0		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	3.0939	3.0418
1.75	4.6778	4.8526	4.2321	3.8710	3.7070	3.6658
2.0	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
3.0	6.0052	6.2516	6.1273	6.0373	5.9896	5.9773
4.0	6.8803	7.0969	7.0662	7.0350	7.0156	7.0102
5.0	7.4739	7.6504	7.6495	7.6392	7.6306	7.6281
7.0	8.1442	8.2581	8.2694	8.2696	8.2680	8.2673
10.0	8.5795	8.6434	8.6528	8.6551	8.6550	8.6549
$\rightarrow \infty$	9.0647	9.0647	9.0647	9.0647	9.0647	9.0647

Fuente: Tomada de M.A. Green and M.W. Gunn. *The evaluation of geometrical effects in four-point probe measurements. Solid-State Electronics, Vol 14. University of Queensland, Brisbane, Australia. 1971. p. 1173.*

Figura 2.4 Muestra con los contactos ubicados simétricamente.



*Fuente: Adaptado de M.A. Green and M.W. Gunn. The evaluation of geometrical effects in four-point probe measurements. Solid-State Electronics, Vol 14. University of Queensland, Brisbane, Australia. 1971. p. 1168.*

Cuando la muestra es un cuadrado, es decir, cuando  $d/s = 1$ , la fórmula de  $k$ , se puede aproximar a<sup>30</sup>:

$$k = \frac{\pi}{\ln(2)} \quad (12)$$

Por lo tanto, entre más diferencia de longitud haya entre los lados de la muestra y entre más lejos estén ubicados los electrodos de la periferia, se notará mayor cambio en el factor de corrección  $k$ .

❖ Factor de geometría ( $f$ ): Este factor es necesario, debido a la falta de simetría de las muestras y depende de la relación entre las resistencias características  $R_{12,34}/R_{23,41}$ . Según Llontop<sup>31</sup>, entre más simétrica sea la muestra, es decir,  $R_{12,34} = R_{23,41}$ , el factor de geometría  $f$ , se acercará a 1 y se podrá despejar mediante la siguiente ecuación:

---

<sup>30</sup> CONDE. Op. cit., p. 24.

<sup>31</sup> LLONTOP LÓPEZ, Paul David. Implementación de un sistema de medición de resistividad eléctrica de películas delgadas semiconductoras a bajas temperaturas. Tesis de magister en física. Lima: Universidad católica del Perú. Escuela de posgrado, 2017, p.33.

$$\frac{R_{12,34} - R_{23,41}}{R_{12,34} + R_{23,41}} = \frac{f}{\ln(2)} \cdot \operatorname{arcosh} \left( \frac{e^{\frac{\ln(2)}{f}}}{2} \right) \quad (13)$$

La solución de la ecuación (13), se realiza mediante el método de Newton-Raphson. A partir de la ecuación (7), Van Der Pauw propone el teorema de la reciprocidad, este consiste en que  $R_{12,34}$  debe ser igual o aproximadamente a  $R_{23,41}$  y la solución de la resistencia característica sería el promedio entre estos; por lo tanto,  $R_{34,12}$  debe ser igual o aproximado a  $R_{41,23}$  y la resistencia característica se halla de la misma forma. Con lo anterior se obtiene 4 medidas de resistencia; luego, si se cambia la polaridad de las fuentes, se puede obtener cuatro medidas nuevas, es decir, las mismas cuatro medidas anteriores, pero con la polaridad invertida (Ver figuras 3.15 y 3.16); esto se hace para eliminar los efectos de resistencias en los contactos<sup>32</sup>, por lo tanto, para hallar las resistencias características  $R_A$  y  $R_B$  con mejor precisión, se tiene<sup>33</sup>:

$$R_A = \frac{R_{12,43} + R_{21,34} + R_{43,12} + R_{34,21}}{4}; \quad (14)$$

$$R_B = \frac{R_{32,41} + R_{23,14} + R_{41,32} + R_{14,23}}{4}$$

---

<sup>32</sup> VIDAL SALGADO, Luis Eduardo. Diseño y construcción de un sistema de medidas de efecto Hall basado en la técnica de Van Der Pauw. Tesis de magister en Ciencias-física. Manizales: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ciencias y administración, 2006, p.25.

<sup>33</sup> CONDE MENDOZA, Luis Ángel. Implementación de un sistema de medición de resistividad eléctrica en películas delgadas semiconductoras por el método de Van Der Pauw. Tesis de magister en física. Lima: Universidad católica del Perú. Escuela de posgrado, 2017, p.31.

## 2.4 CONTACTOS A PRESIÓN

Existen varias clases de contactos, entre los más utilizados se encuentran; por soldadura, a presión, fusión puntual o pintura conductora<sup>34</sup>.

Para el presente caso, se hace uso de los contactos a presión, debido a que el uso de contactos por soldadura o pintura conductora, pueden perjudicar la película y limita la muestra a un único uso e impide otro tipo de estudios para futuros proyectos, ya que al intentar limpiar la pintura conductora o extraer los restos de estaño por soldadura, se puede eliminar la fina capa semiconductor. El método por fusión puntual, tiene el mismo inconveniente de las técnicas mencionadas anteriormente, dado que se disuelve la muestra en el punto de contacto y por otro lado, no se cuenta con las cámaras de evaporación necesarias para la realización de los contactos puntuales, por tal razón, se opta por los contactos a presión; por lo tanto, dependiendo de la prueba en particular, se les da forma a los electrodos de plata o cobre (el prototipo fue diseñado teniendo en cuenta este fin, por lo que se facilita dicho trabajo), y se ubican con las puntas unidas al carro móvil, de tal forma que al momento de ubicarlos en la muestra, quedarán a suficiente presión para empezar a realizar el procedimiento de Van Der Pauw. (Ver figura 3.1)

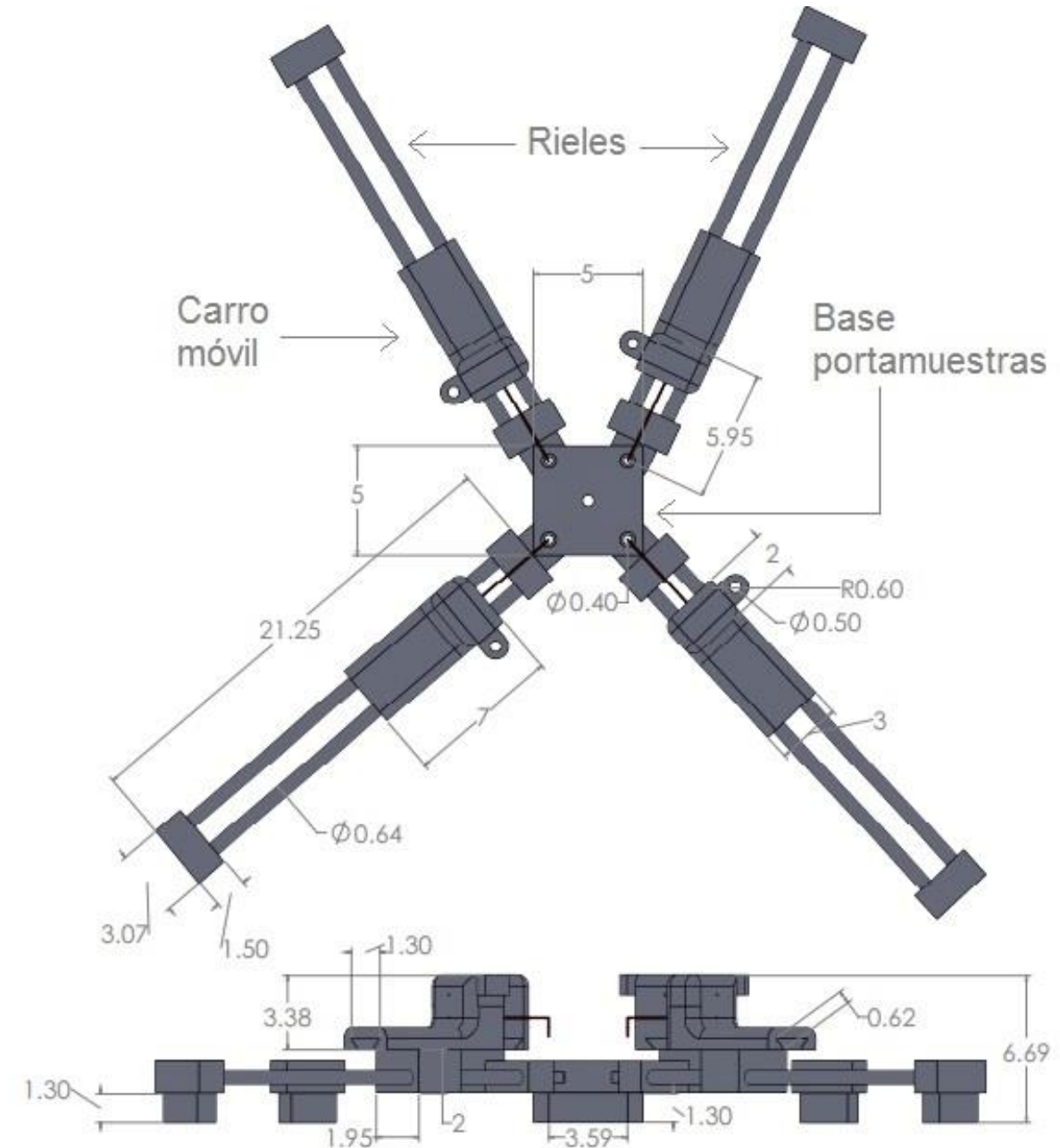
---

<sup>34</sup> VIDAL. Op. cit., p. 32.

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 DISEÑO DEL PROTOTIPO

Figura 3.1 Diseño del prototipo en SolidWorks. (Medidas en centímetros).



Tomando como premisa la versatilidad, se realiza un diseño para la aplicación del modelo de medida de Van Der Pauw, que pueda ajustarse a las características presentadas por las muestras, tales como el tamaño y asimetría.

El prototipo cuenta con un rango amplio para adecuarse a muestras desde un tamaño de 0,5 [cm] hasta 20 [cm] de lado; además, no es necesario que la muestra sea simétrica, ya que, el prototipo se puede acomodar a su forma. También cuenta con dos orificios en cada carro móvil, los cuales se utilizan para variar la altura de los electrodos.

Está compuesto por cuatro carros móviles, ensamblados sobre respectivos rieles, los cuales, permiten el desplazamiento de cada carro de forma independiente; todo 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 carros móviles se puedan desplazar hacia adelante o atrás.

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 carros móviles (ver figura 3.1).

En los siguientes ítems, se explica la selección de los materiales para cada una de las partes del prototipo.

3.1.1 Materiales. Para cada material seleccionado, se hace una minuciosa elección, tal y como se explica a continuación:

❖ Cuerpo del prototipo: El cuerpo del equipo fue elaborado por medio de una impresora 3D, por lo tanto, se seleccionó el material de impresión más conveniente en este caso para su fabricación; entre los materiales más utilizados que se encuentran en el mercado, se tienen: materiales en cerámica, los polvos metálicos, ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), PLA (Ácido Poliláctico), Nailon (poliamida); estos, los más empleados, pues existen muchas variedades en la actualidad.

Tabla 3.1 Comparación de materiales de impresión 3D más utilizados en la actualidad.

Material	Densidad	Dureza	Precio	Conductor	Dificultad en la elaboración	Temperatura a fusión (°C)
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	Alta	Alta	Medio	No	Alta	240
Los polvos metálicos	Alta	Alta	Alto	Si	Alta	500
Materiales en cerámica	Alta	Alta	Alto	No	Alta	700
Nailon (poliamida)	Alta	Alta	Medio	No	Alta	242
<b>PLA (Ácido Poliláctico)</b>	<b>Alta</b>	<b>Alta</b>	<b>Bajo</b>	<b>No</b>	<b>Baja</b>	<b>180</b>

Los carros (alto 3 [cm], largo 7 [cm], ancho 2,5 [cm]) y la base (5 [cm] x 5 [cm]) están fabricados en PLA (Ácido Poliláctico); elaborados en impresora 3D con densidad del 50% y su temperatura máxima de operación es de 70°C. Aunque presenta una temperatura máxima de trabajo menor, que la de los

materiales indicados anteriormente, se seleccionó este, por su bajo costo y por su elaboración menos compleja que los otros disponibles. (Ver tabla 3.1).

❖ Electrodo: El equipo cuenta con cuatro electrodos de diámetro de 0,75 [mm], longitud de 6 [cm], área de sección transversal de  $4,41786E-07$  [m] y con una resistencia de  $1,2720E-06$  [ $\Omega$ ].

Tabla 3.2 Materiales analizados para la selección de los electrodos.

Material	Resistividad [ $\Omega$ .m]	Electronegatividad	Costo
<b>Plata</b>	<b>1,59E-08</b>	<b>1,93</b>	<b>Medio</b>
Cobre	1,71E-08	1,9	Bajo
Oro	2,22E-08	2,54	Alto
Aluminio	2,82E-08	1,61	Bajo
Hierro	9,71E-08	1,83	Bajo

La plata es material seleccionado para la elaboración de los electrodos, con una pureza de 96%, pues, aunque no cuenta con un costo tan reducido como el del hierro o aluminio, cuenta con la menor resistividad de los metales seleccionados en la tabla 3.2. Aunque el cobre presenta un costo inferior, la plata presenta una resistividad menor. La mayor desventaja del cobre es su rápida oxidación (con tan solo una hora expuesto al ambiente, muestra tramos de óxido en los electrodos), por tal razón, se opta por la plata, y con esto, se evita lijar y limpiar el material cada vez que se realizan las medidas.

❖ Rieles: Cuentan con 18,7 [cm] de longitud, diámetro de media pulgada y son de acero inoxidable. Es el material de más rápida elección, ya que es utilizado ampliamente en la elaboración de rieles y cuenta con gran resistencia a la corrosión, esto es favorable, ya que puede ser engrasado con el fin de facilitar

el desplazamiento de los carros, y como valor agregado, da un agradable aspecto visual al prototipo.

En la figura 3.2, se presenta una foto del prototipo implementado y se pueden observar todos los materiales seleccionados y debidamente ensamblados (cuatro rieles en acero inoxidable, cuatro carros móviles en PLA, y la base central que da unión a los cuatro rieles y a la vez da soporte a la muestra).

Figura 3.2 Montaje de la impresión 3D y los rieles.



Entre los equipos utilizados para medir la conductividad utilizando el método de Van Der Pauw, se necesita; un picoamperímetro, un nanovoltímetro, un multímetro, una fuente de tensión, y conexión de los equipos con el PC. A continuación, se explicará con más detalle, cada uno de estos elementos.

### 3.2 EQUIPOS UTILIZADOS

En la tabla 3.3 se listan los equipos empleados en las medidas. Además, se emplearon dos cables RS232-USB, los cuales permiten la comunicación del nanovoltímetro y picoamperímetro con el PC.

Tabla 3.3 Equipos utilizados en la medida de conductividad, empleando el método de Van Der Pauw.

Equipos	Características relevantes
Fuente de tensión PS280 Tektronix	Rangos: 0-30 [V] $\pm$ (0,5% de lectura + 2 dígitos). 0-2 [A] $\pm$ (0,5% de la lectura + 2 dígitos). Dos medidores de pantalla con panel de 3 1/2 dígitos.
Nanovoltímetro 2182A Keithley	Rangos: DCV1 (Canal 1): Cuenta con cinco rangos de medición (10 [mV], 100 [mV], 1 [V], 10 [V] y 100 [V]) y puede medir el voltaje de 1n [V] a 120 [V]. Las lecturas de escala completa para cada rango de voltaje son $\pm$ 20% de la medida. Resolución de pantalla: 3 1/2 dígitos a 7 1/2 dígitos.

<p>Picoamperímetro 6485 Keithley</p>	<p>Rangos:</p> <p>Único canal :(2 [nA] hasta 20 [mA])</p> <p>Las lecturas de escala completa para cada rango de medición son <math>\pm 5\%</math> de la medida.</p> <p>Resolución de pantalla:</p> <p>3 1/2 dígitos a 6 1/2 dígitos.</p>
<p>Multímetro mastech my-64</p>	<p>Rangos:</p> <p>VDC:200 [mV] / 2 [V] / 20 [V] / 200 [V] (0,5%+ 2).</p> <p>IDC:2 [mA] / 20 [mA] / 200 [mA] (1,2% + 3); 20 [A] (2,0% + 5).</p> <p>Resolución de pantalla:</p> <p>3 1/2 dígitos</p>

### 3.3 CONFIGURACIÓN DE EQUIPOS

Antes de realizar alguna medida, sea de tensión o corriente; se deben calibrar los equipos de medida, debido a que las corrientes y tensiones que se manejan son pequeñas, del orden de  $10^{-5}$ . Esta calibración es indispensable, debido a que la medida obtenida tiene más exactitud. Este procedimiento se debe realizar cada vez que se enciende el equipo y se van a tomar datos.

3.3.1 Calibración del Nanovoltímetro. Después de encender el equipo de medida, es necesario presionar la tecla LOCAL, esta, hace referencia, a que el usuario va a manejarlo directamente, sin uso de alguna interfaz computacional; posteriormente, se presiona el botón ACAL, el cual, cuenta con dos opciones: FULL ACAL, que calibra los rangos de 10 [mV] y 100 [V], y LOW-LVL (bajo nivel) ACAL, que solo calibra el rango de 10 [mV]. Se escoge alguna de estas alternativas, dependiendo del rango de tensión que se vaya a utilizar; este proceso tarda alrededor de 5 minutos. Es de aclarar, que este procedimiento se realiza con las pinzas de medida desconectadas, esto, para no interferir con la calibración<sup>35</sup>.

3.3.2 Calibración del Picoamperímetro. Esta calibración es más sencilla y rápida, en comparación con la anterior, ya que, el equipo cuenta con solo un canal para medir corriente y tarda menos de dos minutos en realizarse. Los pasos para la calibración de la medida son<sup>36</sup>:

1. Presionar ZCHK y se activa la verificación de cero (se muestra el mensaje "ZC").
2. Seleccionar el rango que se utilizará para la medición.
3. Presionar ZCOR para habilitar el cero correcto (se muestra el mensaje "ZZ").
4. Presionar ZCHK para deshabilitar la comprobación de cero.
5. Finalmente, se pueden tomar lecturas de la pantalla.

El mensaje "CZ" indica que la lectura mostrada es cero corregida.

---

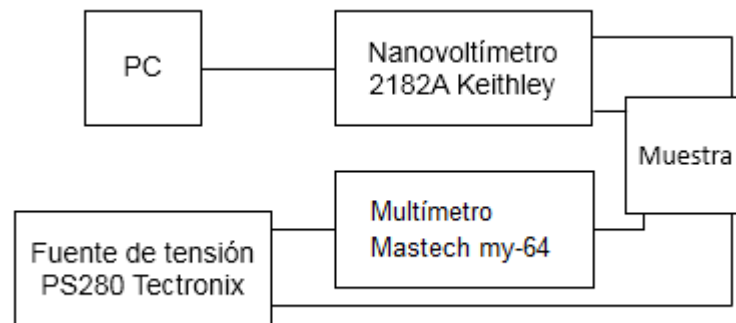
<sup>35</sup> KEITHLEY INSTRUMENTS, INC. Model 2182 and 2182A Nanovoltmeter User's Manual. Cleveland, 2004. Document number: 2182A-900-01 Rev. A. p.2-5.

<sup>36</sup> KEITHLEY INSTRUMENTS, INC. Model 6485 Picoammeter Instruction Manual. Cleveland, 2001. Document number: 6485-901-01 Rev. A. p.2-14

### 3.4 CONEXIONES

En la figura 3.3, se muestra el diagrama de bloques utilizado en el proceso de medida en materiales conductores. Se alimenta la muestra por dos extremos, mediante la fuente de tensión PS280 Tektronix<sup>37</sup>, mientras que, en los extremos opuestos, se lee la caída de tensión con el Nanovoltímetro 2182A Keithley. La fuente de tensión aplica una diferencia de potencial a la muestra, y también arroja en pantalla la corriente suministrada a esta, la cual es verificada con el Multímetro mastech my-64 en modo de amperímetro. Los datos de voltaje son visualizados en la pantalla de la computadora, gracias a la conexión RS232–USB, que existe entre el Nanovoltímetro y el PC.

Figura 3.3 Diagrama de bloques para medir conductividad en materiales conductores mediante el método de Van Der Pauw.



Para medir conductividad en semiconductores, la conexión tiene una ligera variante en comparación con la anterior, ya que es utilizada cuando las corrientes a medir son menores a 20 [mA], debido a que la fuente de tensión no puede mostrar en pantalla la corriente suministrada en vista a su baja resolución (3 ½ dígitos en

---

<sup>37</sup> TEKTRONIX INC. PS280 & PS283, DC Power Supplies, user manual. Wilsonville, 1991. Document number: 070-8355-03. 44p.

pantalla), por tanto, se incluye un picoamperímetro conectado en serie con la fuente de tensión, y con esto, poder visualizar la corriente inyectada. (Ver figura 3.4). La caída de tensión es tomada de igual forma al caso anterior y en esta ocasión, con dos comunicaciones RS232-USB; una proveniente del nanovoltímetro y otra del picoamperímetro. (Ver figura 3.5).

Figura 3.4 Diagrama de bloques para medir conductividad en semiconductores, empleando el método de Van Der Pauw.

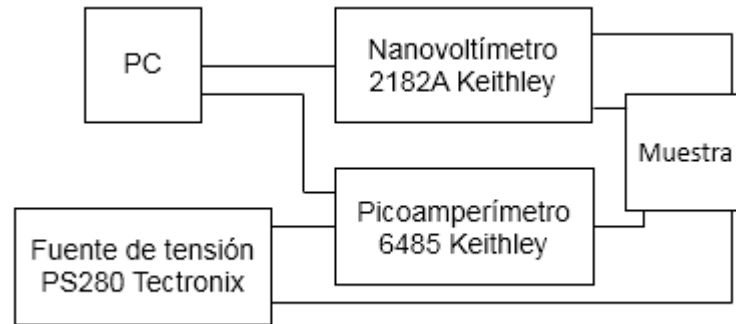


Figura 3.5. Montaje de equipos, utilizado en modelo de medición Van Der Pauw.



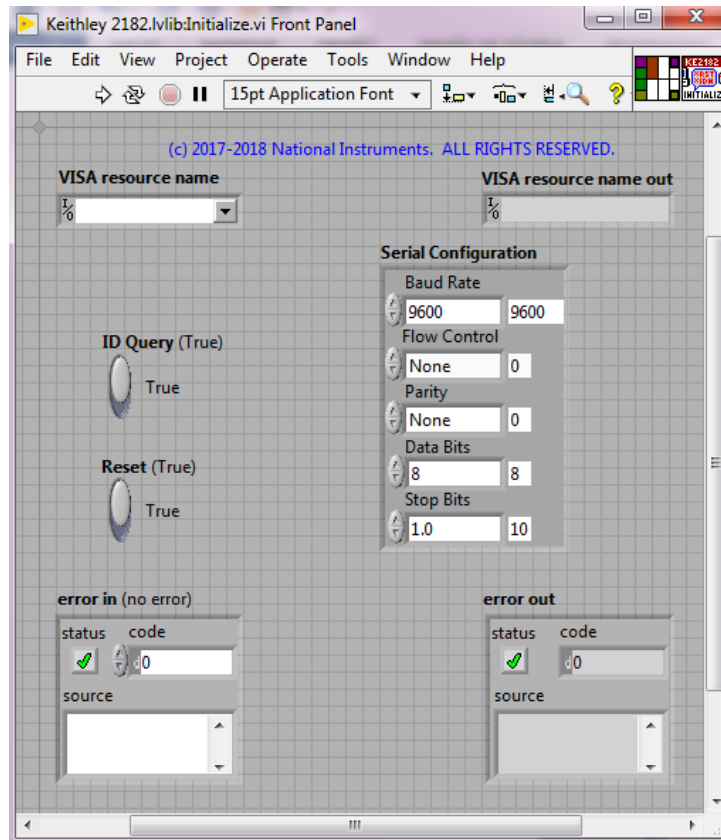
### 3.5 TOMA DE MEDIDAS

Una vez realizada la configuración de los equipos de medida y terminado el montaje para la medición, se procede con la toma de medidas, esto, se hace por medio de una interfaz entre el usuario y la computadora, brindada por el fabricante (Keithley-National Instruments), gracias a la comunicación RS-232 entre el PC y los equipos de medida. Antes de continuar, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

1. En cada medida se toman 50 muestras, esto tarda un tiempo de 50 segundos, por tanto, se toma una muestra por segundo, esto se hace con la intención de obtener resultados más precisos y reproducibles.
2. El valor de  $R_a$  y  $R_b$  se calcula de la ecuación (14), gracias a los valores obtenidos por las medidas de las figuras 3.15 y 3.16; para cada una de las muestras el cálculo de  $R_a$  y  $R_b$  es idéntico.
3. En todos los casos, obteniendo los valores de  $R_a$  y  $R_b$  (resistencias características), son remplazados en la ecuación (9), y se encuentra un valor para la resistividad ( $\rho$ ), donde el inverso de este, es la conductividad eléctrica del material.

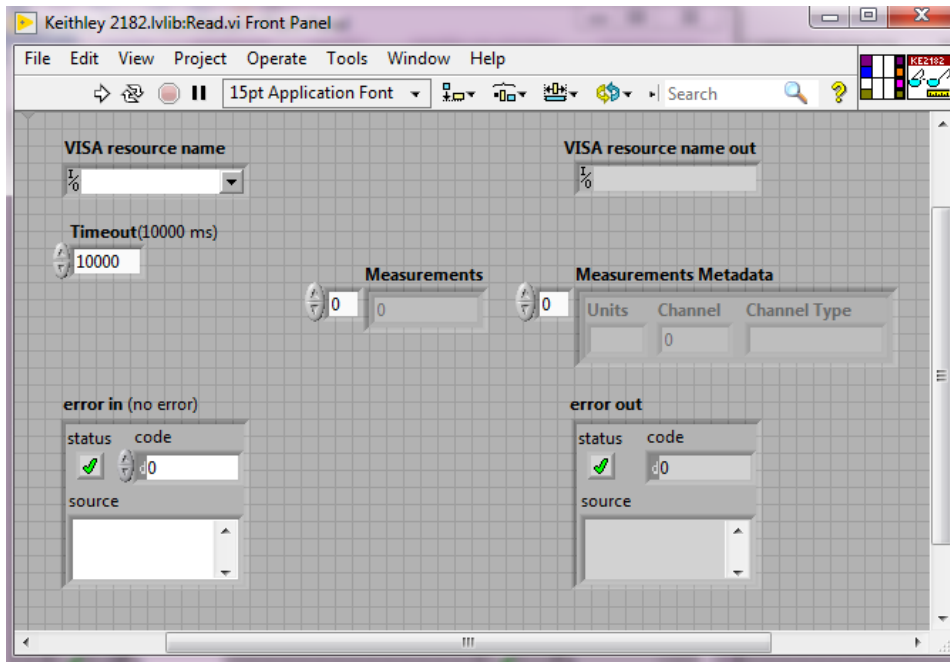
3.5.1 Interfaz Nanovoltímetro 2182<sup>a</sup>. El manejo remoto del equipo de medida se realizó gracias al programa para la medida de tensión en LabVIEW, proporcionado por National Instruments. En la primera configuración se realiza la inicialización del programa, en esta ventana se configura la comunicación entre el equipo de medida y el computador, gracias a ventana *Initialize*. (Ver figura 3.6).

Figura 3.6 Ventana Initialize, configuración de comunicación entre PC y Nanovoltímetro en LabVIEW.



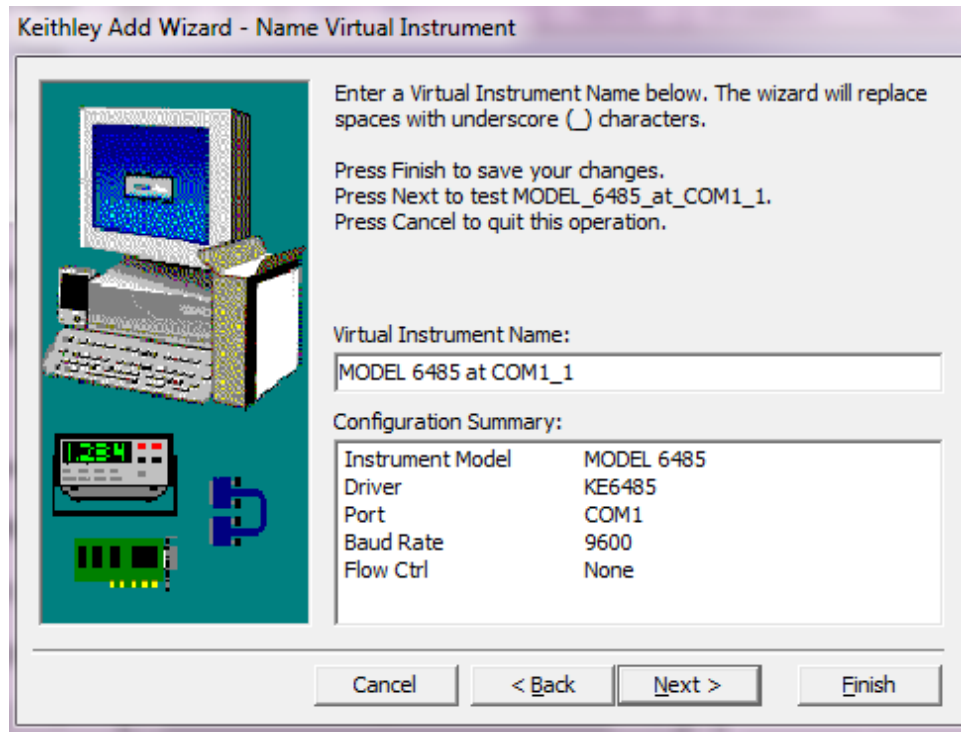
El segundo paso, es tomar la medida, en esta ventana se puede escoger el puerto de comunicación, velocidad en la toma de la medida y visualización de esta. Esto se puede realizar en la ventana *Read*. (Ver figura 3.7).

Figura 3.7 Ventana *Read*, toma de la medida de tensión del Nanovoltímetro en LabVIEW.



3.5.2 Interfaz Picoamperímetro 6485. Primero se verifica la conexión entre el medidor y la computadora, configurando el puerto y la velocidad de trasmisión. (Figura 3.8) Primero se elige “add” en “operations” en la primera ventana; a continuación “next” y se elige el tipo de conexión, que en este caso es “Serial”; ahora “next” y se elige la velocidad de transmisión, que para el caso es 9600; el control de flujo, que para el caso es “none”, a continuación, en “next”, ahora se elige el driver del modelo, y se escoge el del picoamperímetro (KE6485 – MODEL 6485), posteriormente “next” y “finish” para finalizar. Con esto, queda verificada la conexión entre el PC y el medidor.

Figura 3.8 Ventana de configuración entre el picoamperímetro y la computadora.



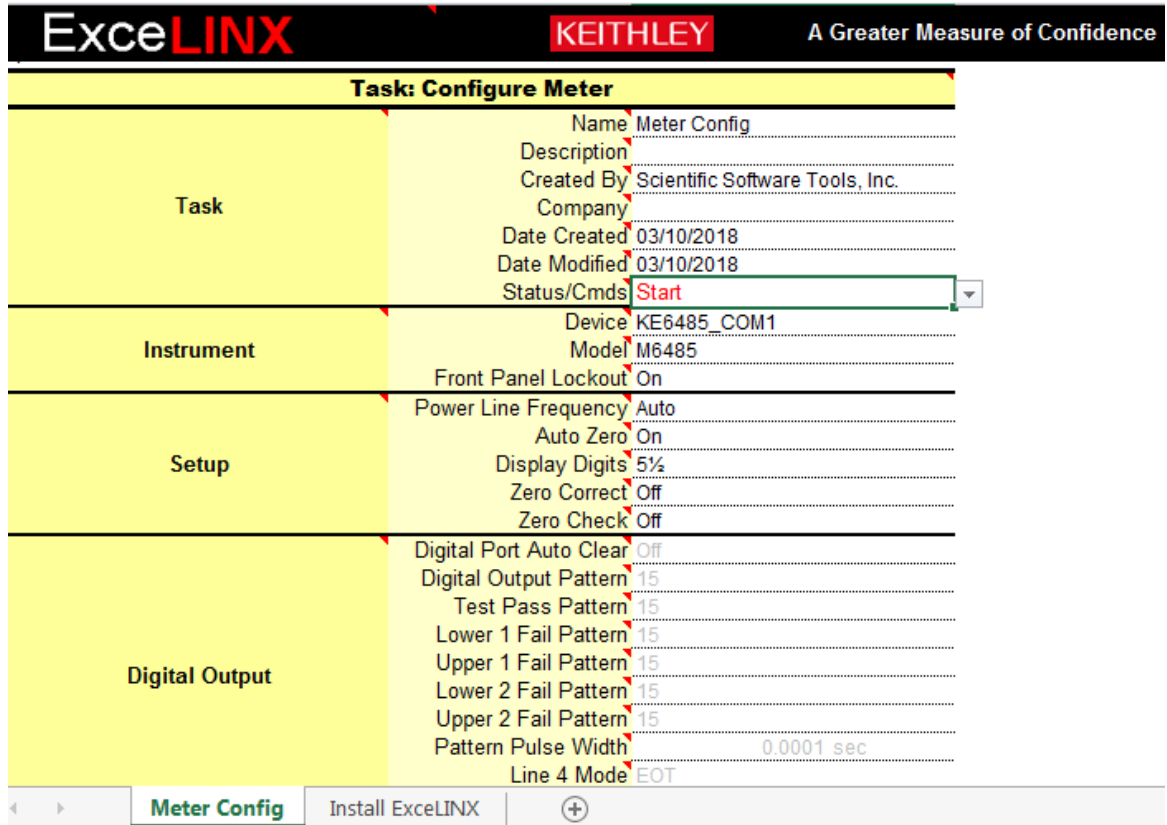
Para la operación remota del picoamperímetro, el fabricante proporciona la herramienta ExceLINX- Keithley, que de forma similar al nanovoltímetro, presenta dos ventanas para su conexión<sup>38</sup>.

En la figura 3.9, se muestra la primera ventana, *Configure meter*, en la cual se escoge el modelo del equipo y también permite realizar la calibración mencionada en la sección 3.3.2. Para elegir el modelo correcto desde ExceLINX, en la pestaña “Device” se toma “KE6485\_COM1” (depende del puerto al que esté conectado el cable RS232 a USB); en la pestaña “Model” se elige la opción M6485 y finalmente en “Status/Cmds” se elige “Start” y se cliquea en cualquier parte del programa.

---

<sup>38</sup> KEITHLEY INSTRUMENTS, INC. ExceLINX software for the Model 6485, 6487 and 6514. Cleveland. 2013. 22p.

Figura 3.9 Ventana Configure meter- ExceLINX- Keithley.



El segundo paso, es tomar la medida por medio de la ventana *Meter scan* (ver figura 3.10), donde también se puede escoger tiempo y número de medidas. Para escoger el número de medidas en la pestaña “Count” de Arm Trigger, se elige el número de datos que se requiera obtener durante la prueba.

Figura 3.10 Ventana Meter scan - ExceLINX- Keithley.

Task: Meter Scan	
Task	Name Meter Scan
	Description
	Created By Scientific Software Tools, Inc.
	Company
	Date Created 03/10/2018
	Date Modified 03/10/2018
	Status/Cmds Start
Configuration	Worksheet Meter Config
Arm Trigger	Scan Mode Run Once
	Source Immediate
	Count 1
	Timer
	Bypass Never
Sample Trigger	Source Immediate
	Count 1
	Delay 0 sec
	Bypass Never
	Layer Done None
	Measurement Done None
Data Location	Worksheet Meter Scan
	Starting Col A
	Starting Row 41
	Organize By Rows
	Autoincrement Use one table

Navigation: Meter Scan | Meter Config | Install ExceLINX

### 3.6 TRATAMIENTO Y CARACTERÍSTICAS DE LAS MUESTRAS

En este ítem se presentan las características y el debido tratamiento que se le aplica a las muestras de placa de cobre, silicio recubierto con película delgada de platino, Sulfuro de Estaño (SnS) y Óxido de Zinc (ZnO).

3.6.1 Lámina de cobre. El cobre es un metal, con número atómico 29, grupo 11, con periodo 4, el símbolo químico es Cu<sup>39</sup>. La lamina cuenta con un espesor de 1 [mm] y dimensiones de 3,5 [cm] x 3,5 [cm].

La muestra asimétrica es cortada de tal forma que obtenga una simetría cuadrada, esto es lo ideal, según plantea Van Der Pauw; posteriormente, se hace la limpieza de la muestra, debido a que el cobre, al estar expuesto al ambiente se auto protege, formando una fina capa de óxido, por tal razón, se aplica un baño con una solución a base de vinagre y cloruro de sodio (NaCl), la cual remueve el óxido de la muestra, dejándola limpia; luego es lavada con abundante agua para remover cualquier resto de la solución, posteriormente, es secada con hisopos, para finalmente aplicar etanol, el cual se deja evaporar de forma natural<sup>40</sup>. En la figura 3.11 se muestra la placa de cobre antes y después de realizar el tratamiento de remoción de óxido, y la ubicación de los electrodos.

La limpieza de la muestra es necesaria debido a la falta de continuidad presentada en la lámina, cuando está recubierta por la capa de óxido.

---

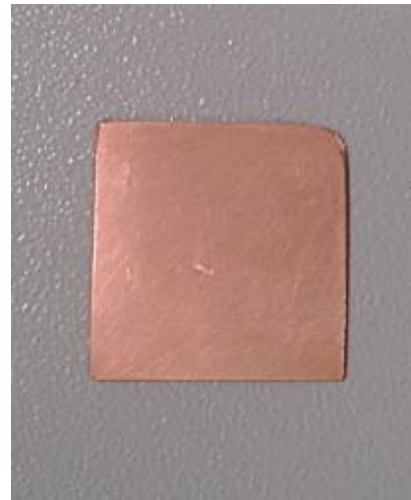
<sup>39</sup> ARTINEZ RODRIGUEZ, Ricardo. Fundamentos teóricos y prácticos de la histoquímica. España: Editorial CSIC. 2008. p.98. ISBN: 978-84-00-08672-5

<sup>40</sup> UNILEVER. ¿Cómo limpiar cobre? [En línea] Argentina. 2018. (Recuperado 10 de octubre de 2018) Disponible en: <https://www.cleanipedia.com/ar/limpieza-de-pisos-y-superficies/como-limpiar-cobre.html>.

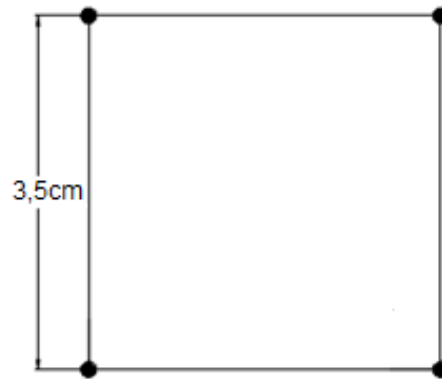
Figura 3.11 Muestra de cobre a) sin tratamiento de limpieza, b) después del tratamiento y c) Ubicación de los electrodos en la muestra de cobre.



a)



b)

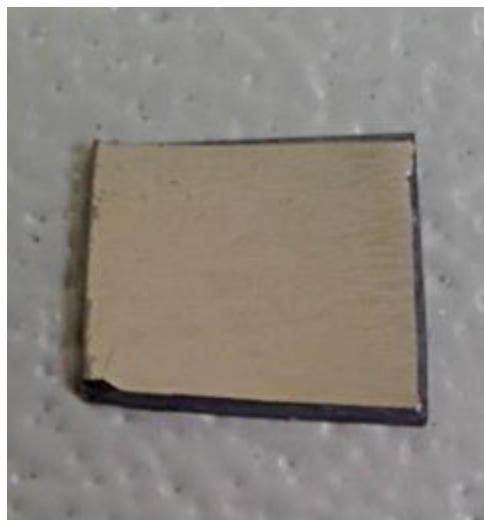


c)

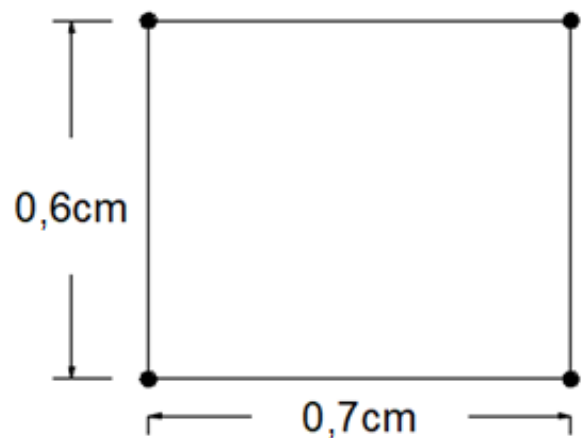
3.6.2 Películas delgadas. El tratamiento de limpieza es más sencillo que en el caso anterior, debido a que los semiconductores no se oxidan tan fácilmente como el cobre, por lo tanto, se omite el procedimiento de remoción de óxido y únicamente son limpiados con hisopos secos, ya que cualquier otra sustancia aplicada, puede remover la fina capa semiconductor.

❖ Oblea de silicio recubierta con película delgada de platino: El silicio es un metaloide, grupo 14, periodo 3, número atómico 14, y es de los elementos más abundantes en la superficie terrestre; y su símbolo es Si. El platino es un metal, grupo 10, con periodo 6, número atómico 78, siendo de los más abundantes, su símbolo es Pt<sup>41</sup> Las medidas de la muestra de silicio recubierta con una película delgada de platino son de 0,7 [cm] x 0,6 [cm] y 90 [nm] de espesor. (Ver figura 3.12).

Figura 3.12 Muestra de silicio (Si) a) Recubierta con película delgada de platino y b) Ubicación de los electrodos en la muestra.



a)



b)

❖ Película delgada de Sulfuro de Estaño (SnS): El Sulfuro de Estaño es un compuesto con símbolo SnS, con propiedades adecuadas para usarse como capa absorbente en celdas solares de película delgada. Las características de

---

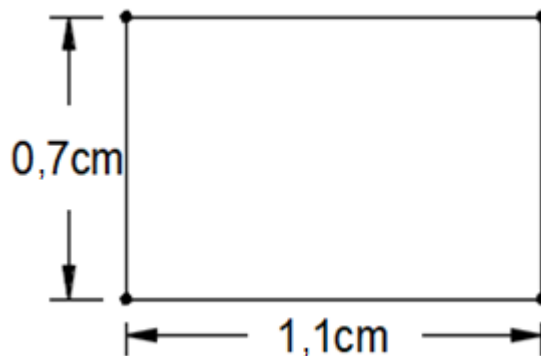
<sup>41</sup> Ibid., p.97

la muestra de Sulfuro de Estaño (SnS) son de 1,1 [cm] x 0,7 [cm] y 1,2 [ $\mu\text{m}$ ] de espesor<sup>42</sup>. (Ver figura 3.13).

Figura 3.13 a) Muestra de Sulfuro de estaño (SnS) y b) Ubicación de los electrodos en la muestra de Sulfuro de estaño (SnS).



a)



b)

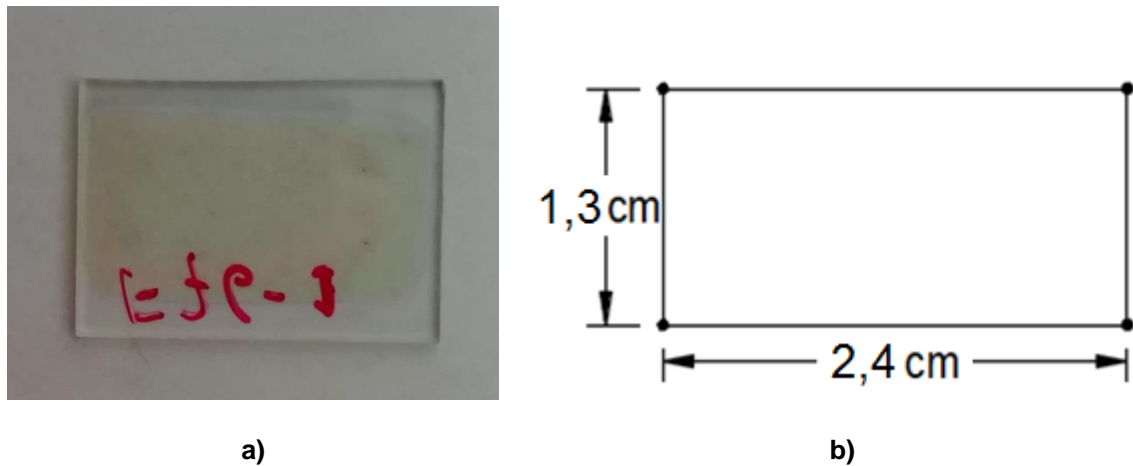
❖ Óxido de Zinc (ZnO): Es un semiconductor que puede ser empleado como capa TCO (óxido conductor transparente en celdas solares de película delgada)<sup>43</sup>, con símbolo ZnO. La muestra cuenta con dimensiones de 2.4 [cm] x 1.3 [cm] y espesor de 350 [nm]. (Ver figura 3.14).

---

<sup>42</sup> BOTERO LONDOÑO, Mónica Andrea. Síntesis y caracterización de nuevos materiales no tóxicos empleados como capa buffer y capa absorbente en la fabricación de celdas solares. Tesis de doctora en ciencias - Física. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Departamento de física. 2008. p.31.

<sup>43</sup> HURTADO MORALES, Mikel Fernando. Síntesis y caracterización de películas delgadas del semiconductor  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  y su uso como capa absorbente en celdas solares. Tesis de Doctorado en Ciencias – Química. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ciencias. 2014. p.12.

Figura 3.14 a) Muestra de Óxido de Zinc (ZnO) y b) Ubicación de los electrodos en la muestra de Óxido de Zinc (ZnO).



### 3.7 PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA DE MEDIDAS

3.7.1 Procedimiento para las medidas de cobre (Cu). Inicialmente se selecciona un material conductor, por tener conductividad conocida. Dicha placa, cuenta con dimensiones de 3,5 [cm] x 3,5 [cm] y espesor de 1 [mm].

Se realiza una inyección de corriente en el rango de 0 [A] a 1 [A], con pasos de 0,2 [A], es decir, en total se inyectan 5 corrientes diferentes, estas son elevadas, ya que el material en estudio es buen conductor; esta variación se hace con el fin de observar la curva I-V (tensión vs corriente).

En este caso, la corriente es mostrada en la pantalla de la fuente de tensión PS280, pero es verificada con el multímetro mastech my-64 y la tensión es medida con el Nanovoltímetro 2182A. La conexión se puede observar en la figura 3.3. La

representación gráfica del modelo de Van Der Pauw, se muestra en las figuras 3.15 y 3.16:

Figura 3.15 Medidas para encontrar  $R_a$ , en el modelo Van Der Pauw

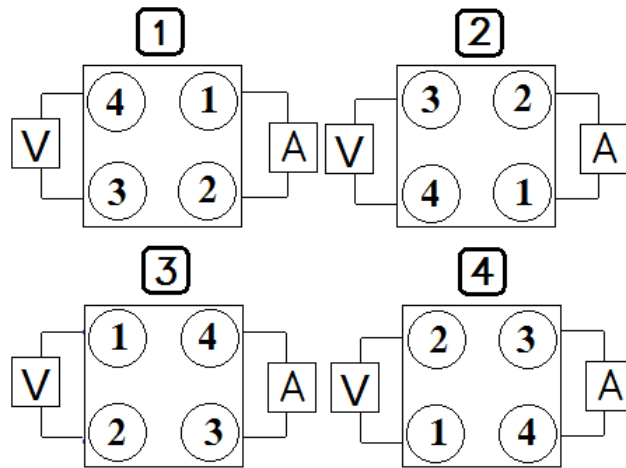
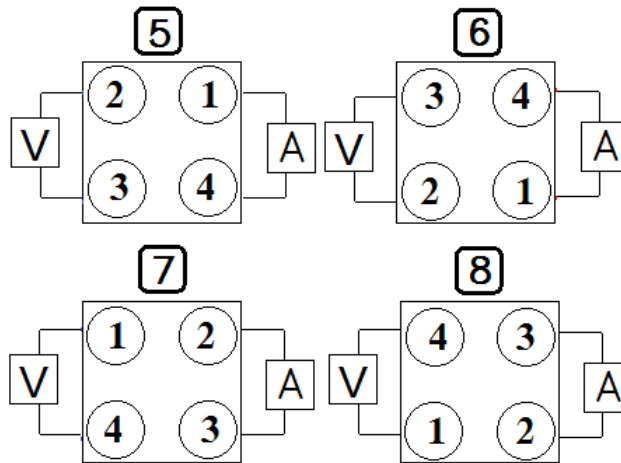


Figura 3.16 Medidas para encontrar  $R_b$ , en el modelo Van Der Pauw



3.7.2 Procedimiento para las medidas de silicio (Si). Ahora, se puede proceder a medir la conductividad en semiconductores. Se inició con una oblea de silicio con dimensiones de 1 [cm] x 1 [cm], pero no presentó conducción. Una de las formas de lograr liberar electrones de la capa de valencia para permitir su conducción, es aumentar la temperatura del material, pero el presente trabajo se centra en hallar la conductividad de las películas semiconductoras, pero a temperatura ambiente, por tanto, a una temperatura de 25 °C no es posible hacer fluir una corriente en este semiconductor. Después de aplicar una diferencia de tensión en la muestra, no se observa ningún flujo de corriente, ni caída de tensión en el semiconductor, ya que se comporta como un aislante a esta temperatura. Por tanto, se decidió realizar medidas a silicio recubierto con una película delgada de platino de 90 [nm] de espesor.

Luego de determinar la conductividad a la muestra de silicio recubierta con platino, se procede a medir Sulfuro de estaño (SnS) y Óxido de Zinc (ZnO), logrando medir su conductividad a temperatura ambiente.

3.7.3 Procedimiento para medir Sulfuro de Estaño (SnS). Se da paso al propósito de estudio, el cual es encontrar la conductividad de películas delgadas semiconductoras, en este caso se mide una muestra de sulfuro de estaño (SnS), con dimensiones de 1,1 [cm] x 0,7 [cm] y espesor de 1,2 [μm].

Se aplica una diferencia de potencial en los extremos de la muestra, con la fuente de tensión PS280, la cual hace fluir una corriente por dicha película, a diferencia de la muestra de cobre, no es posible dejar una corriente inyectada controlada, debido a la naturaleza del material (semiconductor); por lo tanto, para observar la corriente inyectada es necesario incluir un picoamperímetro, en serie con la fuente de tensión PS280, tal y como se muestra en la figura 3.4.

Para obtener la curva de I-V (corriente vs tensión), se varía la tensión aplicada de 1,5 [V] a 31,5 [V], con pasos de 5 [V]; este, es el rango total suministrado por la fuente de tensión PS280.

3.7.4 Procedimiento para medir Óxido de Zinc (ZnO). La película posee dimensiones de 2,4 [cm] x 1,3 [cm] y espesor de 350 [nm]. Al ser un material semiconductor, se realiza el mismo procedimiento del caso anterior.

Para la obtención de la curva I-V, se varia la tensión aplicada desde 0 [V] a 25 [V], con pasos de 5 [V].

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

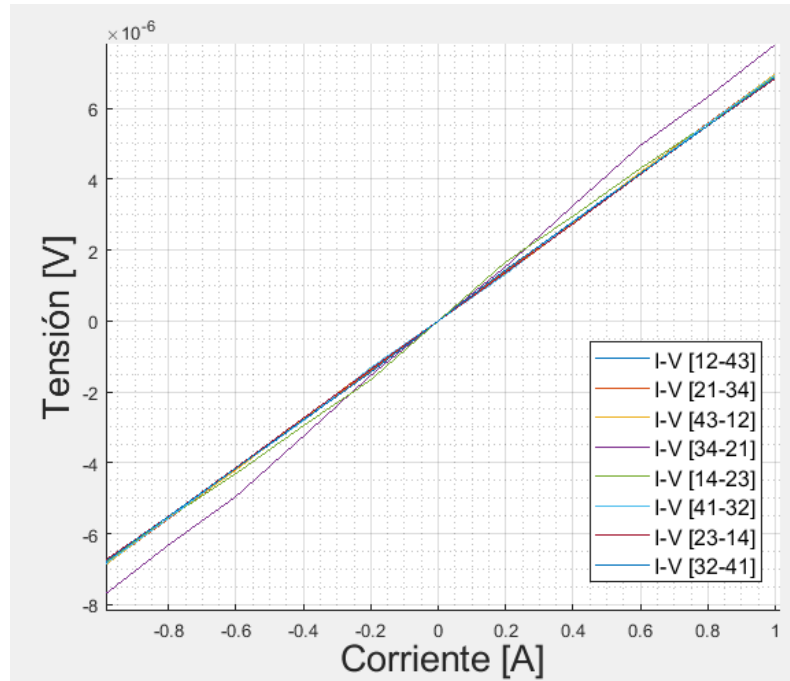
En esta unidad, se exponen los resultados obtenidos en la placa de cobre, la muestra de silicio recubierta con película delgada de platino y las películas delgadas de semiconductoras de SnS y ZnO, haciendo uso del prototipo diseñado para medidas de conductividad empleando el método de Van Der Pauw.

### 4.1 OBTENCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD

Los datos se adquirieron empleando el procedimiento expuesto en el capítulo 3. Las gráficas presentadas en esta sección corresponden a los datos de dispersión obtenidos para las muestras de cobre, silicio con película delgada de platino, SnS y ZnO; no se aplica regresión lineal a ninguna de estas, con el fin de apreciar las posibles variaciones de conductividad obtenidas y con esto, calcular la incertidumbre.

4.1.1 Placa de cobre puro. La placa cuenta con 3.5 [cm] de lado y 1 [mm] de espesor. Para esta configuración se ubican los electrodos en los extremos de la muestra, se observa el comportamiento de las ocho curvas de tensión vs corriente; cada una de estas, corresponde a una configuración, de las ocho usadas en el método de Van Der Pauw.

Figura 4.1 Curva I-V, para los datos obtenidos en los extremos de la muestra de cobre puro.



Se puede observar el comportamiento lineal en las curvas I-V, esto comprueba el comportamiento óhmico de los contactos de plata; la linealidad se puede comprobar observando el coeficiente de determinación (ver tabla 4.2). Sin embargo, se observa que una de las ocho curvas obtenidas, en este caso la curva I-V [34-21], presenta una desviación con respecto a las demás, esto se debe a ligeras variaciones presentadas al ubicar los electrodos en los extremos de la muestra; tales variaciones de distancia, se encuentran en el orden de los 0,5mm; es de aclarar, que al ser la primera aproximación del prototipo, no se cuenta con un sistema que acomode las puntas automáticamente o que estén siempre fijas, dicha localización se realiza manualmente, esta es una de las desventajas presentadas al ajustar las puntas por presión y no por otro método como se explicó en la sección 2.4.

Tabla 4.1 Resultados de medidas de conductividad para la placa de cobre puro, con los electrodos ubicados en los extremos de la muestra, empleando el método de Van Der Pauw.

CONDUCTIVIDAD Placa de Cobre (3,5x3,5 cm)					
Corriente [A]	0,2	0,4	0,6	0,8	1
<b>Ra [Ω]</b>	2,8311E-07 ±1,9076E-07	1,1572E-06 ±1,5966E-07	2,6284E-06 ±1,4399E-07	4,6005E-06 ±6,9315E-08	7,1651E-06 ±6,7164E-08
<b>Rb [Ω]</b>	2,8927E-07 ±2,9335E-07	1,1298E-06 ±1,3927E-07	2,5119E-06 ±9,6443E-08	4,4273E-06 ±8,1441E-08	6,8870E-06 ±7,3284E-08
<b>k</b>	4,5324	4,5324	4,5324	4,5324	4,5324
<b>f</b>	0,9979	0,9977	0,9956	0,9963	0,9962
<b>Rs [Ω]</b>	1,2944E-06 ±7,9134E-07	5,1708E-06 ±4,7902E-07	1,1598E-05 ±3,9101E-07	2,0382E-05 ±2,4146E-07	3,1723E-05 ±2,2441E-07
<b>Conductividad [S/m]</b>	<b>7,7255E+08</b> ±4,7230E+08	<b>1,9339E+08</b> ±1,7916E+07	<b>8,6224E+07</b> ±2,9070E+06	<b>4,9062E+07</b> ±5,8120E+05	<b>3,1523E+07</b> ±2,2300E+05
<b>Error relativo</b>	1229 %	232,6 %	48,31 %	15,61%	45,78 %

Tabla 4.2 Coeficiente de determinación para las ocho configuraciones, placa de cobre.

Configuración	I-V [12-43]	I-V [21-34]	I-V [43-12]	I-V [34-21]	I-V [14-23]	I-V [41-32]	I-V [23-14]	I-V [32-41]
Coeficiente de determinación	1	0.9999	0.9999	0.9986	0.9981	0.9998	1	0.9999

La Tabla 4.1 muestra que, para cada punto del barrido, se presentan varios resultados para la conductividad del cobre, lo cual sería equivocado, pues la conductividad eléctrica de un material a temperatura ambiente no depende de características como tamaño o forma. Las diferentes conductividades encontradas varían, esto porque se asume un valor constante de corriente en las medidas, pero no es del todo cierto, ya que dicho valor debe ser tomado como el promedio de 50 muestras, al igual que se hizo con la medida de tensión; se realizó de esta forma por la limitación en los equipos de medida, debido a que las corrientes medidas en este caso son superiores a 20 [mA], y este es el límite máximo que puede medir el

picoamperímetro, por esto, se toma la decisión de medir la corriente con un multímetro (mastech my-64) en la opción de amperímetro, este cuenta con baja resolución (3 ½ de dígitos) y los pequeños cambios no se pueden apreciar. Dichos cambios se exponen a continuación:

Al comparar la lectura de corriente medida con el picoamperímetro 6485 y una medida con el multímetro mastech my-64, se obtiene un error elevado, debido al truncamiento de las cifras realizado por el equipo de menos resolución, en este caso el multímetro, por ejemplo:

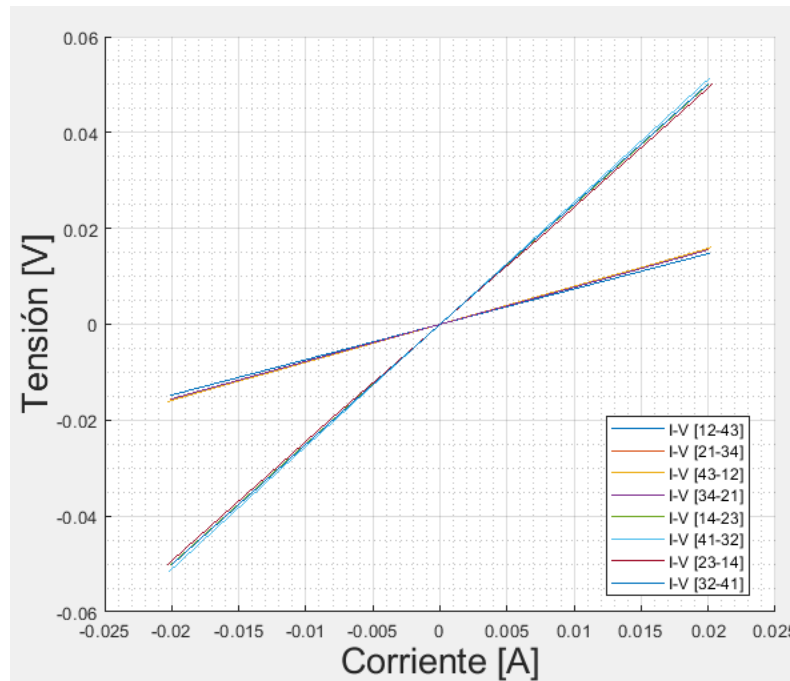
Lectura del picoamperímetro 6485: 0,388912E-02 [A].

Lectura del multímetro mastech my-64: 0,421E-02 [A].

En este caso se toma una medida cambiando el equipo, obteniendo un error relativo en la medida del 8,2507%, por tal razón los resultados de Ra y Rb obtenidos en la Tabla 4.1, no son confiables por el error introducido en el truncamiento de cifras significativas debido a la baja resolución del multímetro; de modo que al no ser confiables los valores de Ra y Rb, de igual forma, no lo son los valores de conductividad encontrados, esto se puede observar en los errores relativos calculados respecto a la conductividad teórica del cobre (5,81E+07 [S/m]) mostrados de la Tabla 4.1, por tal razón, si se desea medir la conductividad del cobre, es necesario un equipo para medir corriente que tenga un rango de medida mayor a 20 [mA], el cual se pueda conectar al PC, para la toma de varias muestras y que tenga una resolución en el mismo rango del nanovoltímetro que es de 5 ½ dígitos a 7 ½ dígitos, de tal forma que la elección de la lámina de cobre no es la indicada para validar el prototipo.

4.1.2 Oblea de silicio recubierta con película delgada de platino. Muestra con dimensiones de 0,7 [cm] x 0,6 [cm] de lados y 90 [nm] de espesor.

Figura 4.2 Curva I-V, para los datos obtenidos en los extremos de la muestra de Silicio con platino.



En la Figura 4.2 se observan las ocho curvas de dispersión de I-V, a diferencia de los resultados del cobre (ver Figura 4.1), las ocho curvas se encuentran divididas en dos grupos de cuatro; el primer grupo presenta una pendiente promedio de  $0,7700 \pm 0,0010$  [ $\Omega$ ] y el segundo conjunto, una pendiente promedio de  $1,2812 \pm 0,0091$  [ $\Omega$ ], este cambio de pendiente se presenta, por la forma rectangular que tiene la muestra, caso contrario a lo que sucedía en la muestra cuadrada de cobre. El comportamiento lineal de las ocho curvas es evidente, prueba de esto es el cálculo del coeficiente de determinación de la Tabla 4.4.

Tabla 4.3 Resultados de medidas de conductividad para la placa silicio con película delgada de platino, con los electrodos ubicados en los extremos de la muestra, empleando el método de Van Der Pauw.

CONDUCTIVIDAD Silicio con película de platino (0,7x0,6cm)					
Corriente [mA]	4	8	12	16	20
<b>Ra [Ω]</b>	7,6849E-01 ±3,6082E-03	7,6879E-01 ±1,5382E-03	7,7061E-01 ±1,8908E-03	7,7009E-01 ±1,5562E-03	7,7211E-01 ±2,2502E-03
<b>Rb [Ω]</b>	1,2604 ±1,4502E-02	1,2758 ±4,2003E-02	1,2802 ±4,6207E-03	1,2904 ±5,5755E-03	1,2993 ±5,0468E-03
<b>k</b>	3,1443	3,1443	3,1443	3,1443	3,1443
<b>f</b>	0,9530	0,9520	0,9519	0,9511	0,9507
<b>Rs [Ω]</b>	3,0399 ±2,2391E-02	3,0600 ±6,2904E-02	3,0690 ±7,4713E-03	3,0809 ±8,6553E-03	3,0960 ±8,2590E-03
<b>Conductividad [S/m]</b>	<b>3,6551E+06</b> ±2,6923E+04	<b>3,6311E+06</b> ±7,4644E+04	<b>3,6204E+06</b> ±8,8136E+03	<b>3,6064E+06</b> ±1,0131E+04	<b>3,5888E+06</b> ±9,5735E+03

Tabla 4.4 Coeficiente de determinación para las ocho configuraciones, placa de silicio con película delgada de platino.

Configuración	I-V [12-43]	I-V [21-34]	I-V [43-12]	I-V [34-21]	I-V [14-23]	I-V [41-32]	I-V [23-14]	I-V [32-41]
Coeficiente de determinación	1	1	1	1	1	1	1	1

La conductividad teórica del platino es de  $9,5E+06$  [S/m] y la del silicio es de  $4,35E-04$  [S/m]; como muestra la Tabla 4.3, la conductividad promedio obtenida es de  $3,6204E+6 \pm 1,6209E+4$  [S/m], encontrándose entre el rango de conductividades teóricas de los dos elementos, aproximándose más al valor teórico de la conductividad del platino, ya que se encuentra en la escala de  $E+06$  [S/m].

Estos resultados se lograron gracias a equipos de medida necesarios, como el nanovoltímetro y picoamperímetro, los cuales pueden tomar las 50 muestras y

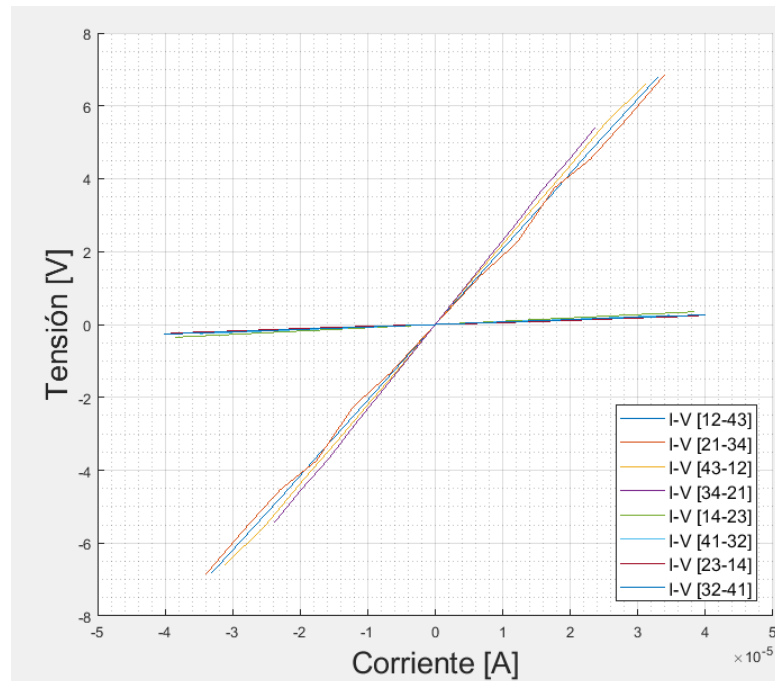
presentan la misma resolución de 5 ½ dígitos a 7 ½ dígitos, por lo que se logró obtener el barrido correspondiente tanto de tensión como de corriente.

Se prefirió el silicio con película delgada de platino para validar el prototipo, ya que cuenta con conductividad menor a la del cobre, material que inicialmente fue seleccionado para validar los resultados; es de recordar, que la conductividad teórica del cobre es de  $5,81E+07$  [S/m] y la del platino  $9,5+06$  [S/m], siendo la conductividad del platino 6,12 veces menor que la del cobre, según esto, el platino tiene resistividad 6,12 veces mayor a la del cobre, presentando mayor oposición al flujo de corriente; según la ecuación (2), entre mayor es la resistividad, mayor es la resistencia, este aumento de la resistencia también es de 6,12 veces, ocasionando una corriente 6,12 veces menor en el platino en comparación con la del cobre, por esta razón, sí es posible medir la corriente inyectada con el picoamperímetro según como lo indica la Figura 3.4.

En la Tabla 4.3, se puede observar la resistencia superficial, con valor promedio de  $3,0692 \pm 6,82E-02$  [ $\Omega$ ] y con variaciones desde  $3,0399 \pm 2,2391E-02$  [ $\Omega$ ] a  $3,0960 \pm 8,2590E-03$  [ $\Omega$ ]; el límite inferior se aleja tan solo 0,95% del promedio y el límite superior se aleja 0,96%, esto proporciona seguridad en los resultados obtenidos y buena precisión, ya que, aunque se hizo un barrido amplio desde 4 [mA] a 20 [mA], la resistencia superficial siempre se mantuvo en el mismo rango, de forma similar ocurre con la conductividad, la cual se obtuvo desde  $3,5888E+06 \pm 9,5735E+03$  a  $3,6551E+06 \pm 2,6923E+04$  [S/m], según esto, el límite superior se aleja tan solo 0,96% del promedio, y el límite inferior se aleja únicamente 0,87% del promedio de conductividad, así que los resultados obtenidos obedecen a lo planteado por Van Der Pauw, ya que la muestra es completamente plana y lisa, los electrodos son ubicados en los extremos de esta, es homogénea y el área de contacto del electrodo es 95 veces más pequeña que el área de la muestra.

4.1.3 Sulfuro de estaño (SnS). La muestra cuenta con medidas de 1,1 [cm] x 0,7 [cm] de lado y 1,2 [ $\mu\text{m}$ ] de espesor.

Figura 4.3 Curva I-V, para los datos obtenidos en los extremos de la muestra de Sulfuro de estaño (SnS).



En la Figura 4.3, se puede apreciar el comportamiento de las curvas de tensión y corriente para la muestra de sulfuro de estaño; dichas curvas presentan los coeficientes de determinación mostrados en la Tabla 4.6, según estos, el comportamiento es lineal, pese a que las gráficas presentan cambios de pendiente durante el barrido de corriente, ya que la gráfica muestra los valores de resistencias de las ocho configuraciones planteadas por Van Der Pauw, punto a punto, es decir, la dispersión de los datos, pero no se realizó una regresión lineal, esto con el fin de poder observar el comportamiento de las resistencias a medida que se aumenta la tensión de alimentación.

La grafica (Figura 4.3), presenta dos grupos de cuatro curvas cada uno, debido a la forma rectangular de la muestra de SnS, las pendientes promedio presentadas por estos dos grupos son,  $2,1443E+05 \pm 2,6915E+03$  [ $\Omega$ ] y  $3,94E+03 \pm 1,04E+02$  [ $\Omega$ ] respectivamente; las diferencias entre dos curvas pertenecientes al mismo grupo se deben a pequeñas discrepancias entre la ubicación de los electrodos, al momento de realizar los cambios de configuraciones, estos pequeños cambios son del orden de 0,5 [mm].

Tabla 4.5 Resultados de medidas de conductividad para la placa de sulfuro de estaño, con los electrodos ubicados en los extremos de la muestra, empleando el método de Van Der Pauw.

CONDUCTIVIDAD SnS - Sulfuro de Estaño (11x7mm)								
Tensión aplicada [V]	31.5	26.5	21.5	16.5	11.5	6.5	1.5	
<b>Ra</b> [ $\Omega$ ]	2,1198E+05 $\pm$ 4,8590E+03	2,1340E+05 $\pm$ 5,7058E+03	2,1436E+05 $\pm$ 3,1886E+03	2,1765E+05 $\pm$ 2,4977E+03	2,1139E+05 $\pm$ 5,3790E+03	2,1635E+05 $\pm$ 6,8619E+03	2,1585E+05 $\pm$ 1,4365E+04	
<b>Rb</b> [ $\Omega$ ]	4,0732E+03 $\pm$ 1,5200E+01	4,0755E+03 $\pm$ 1,7104E+01	4,0603E+03 $\pm$ 4,6360E+01	4,0430E+03 $\pm$ 1,2384E+02	4,0641E+03 $\pm$ 2,6875E+02	3,9259E+03 $\pm$ 2,6143E+02	3,3670E+03 $\pm$ 6,1022E+02	
<b>k</b>	2,0491	2,0491	2,0491	2,0491	2,0491	2,0491	2,0491	
<b>f</b>	0,4604	0,4597	0,4587	0,4564	0,4604	0,4538	0,4379	
<b>Rs</b> [ $\Omega$ ]	1,0191E+05 $\pm$ 2,2919E+03	1,0242E+05 $\pm$ 2,6871E+03	1,0264E+05 $\pm$ 1,4986E+03	1,0367E+05 $\pm$ 1,1694E+03	1,0164E+05 $\pm$ 2,5407E+03	1,0241E+05 $\pm$ 3,1924E+03	9,8352E+04 $\pm$ 6,4508E+03	
<b>Conductividad</b> [S/m]	<b>8,1772</b> $\pm$ 1,8390E-01	<b>8,1366</b> $\pm$ 2,1347E-01	<b>8,1186</b> $\pm$ 1,1853E-01	<b>8,0385</b> $\pm$ 9,0677E-02	<b>8,1988</b> $\pm$ 2,0495E-01	<b>8,1376</b> $\pm$ 2,5368E-01	<b>8,4729</b> $\pm$ 5,5573E-01	

Tabla 4.6 Coeficiente de determinación para las ocho configuraciones, placa de sulfuro de estaño (SnS).

Configuración	I-V [12-43]	I-V [21-34]	I-V [43-12]	I-V [34-21]	I-V [14-23]	I-V [41-32]	I-V [23-14]	I-V [32-41]
Coeficiente de determinación	1	0.9981	0.9993	0.9998	0.9999	0.9999	0.9976	0.9999

Los resultados obtenidos en este trabajo están en el rango de resistividades reportados por S.S. Hegde<sup>44</sup>, quienes estudian la resistividad en películas delgadas de SnS sintetizadas por evaporación térmica, variando la temperatura de recocido desde películas sin recocer hasta temperaturas de recocido de 300 °C, los resultados reportan resistividades desde 7,8 hasta 32,5 [ $\Omega$ .cm], realizando la conversión a metros y realizando el inverso, la conductividad sería de 3,08 [S/m] hasta 12,82 [S/m] y el valor obtenido para esta prueba es de  $8,1829 \pm 1,0270E-01$  [S/m], hallándose en el rango obtenido por la literatura. Al encontrarse adentro de este rango, se corrobora que el resultado de conductividad obtenido después de aplicar el método de Van Der Pauw es exacto; la precisión del resultado se puede observar de la siguiente forma: el valor de conductividad obtenido se encuentra en el rango de  $8,0385 \pm 9,0677E-02$  [S/m] hasta  $8,4729 \pm 5,5573E-01$  [S/m] y el valor promedio de la medida es  $8,1829 \pm 1,0270E-01$  [S/m], encontrándose que el valor inferior del rango está alejado apenas 1,76% del valor promedio y que el valor superior del rango se aleja únicamente un 3,54% del valor promedio; y la resistencia superficial, con variaciones desde  $9,8352E+04 \pm 6,4508E+03$  [ $\Omega$ ] a  $1,0367E+05 \pm 1,1694E+03$  [ $\Omega$ ] y con un promedio de  $1,0186E+05 \pm 1,2318E+03$  [ $\Omega$ ], donde el límite inferior se aleja tan solo 3,44% del promedio y el límite superior se aleja 1,77%, estos resultados muestran el nivel de precisión obtenido, a pesar de que el barrido de tensión se hizo en un rango amplio desde los 1,5 [V] hasta los 31,5 [V],

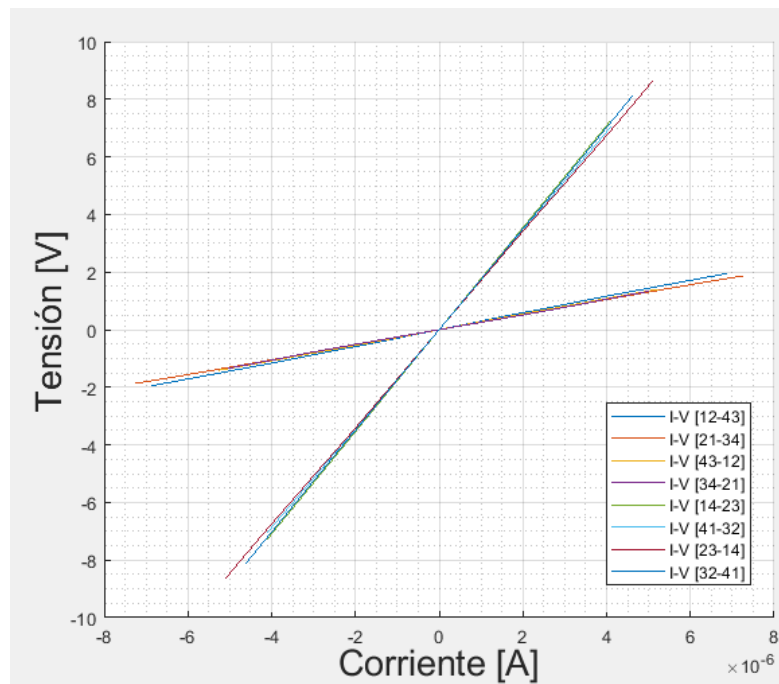
---

<sup>44</sup> HEGDE S.S., KUNJOMANAB A.G., MURAHARIC P., PRASADA B.K., RAMESHC K. Vacuum annealed tin sulfide (SnS) thin films for solar cell applications. En: Science Direct. Diciembre, 2017. Vol. 10. p.83.

los resultados obtenidos fueron precisos y exactos, debido a que nuevamente se cumple con las condiciones de medir una muestra plana, lisa, homogénea, con los electrodos situados en los extremos de la muestra y el área de contacto de los electrodos es 174 veces más pequeña que el área de la muestra.

4.1.4 Óxido de Zinc (ZnO). Con dimensiones de 2,4 [cm] x 1,3 [cm] y espesor de 350 [nm].

Figura 4.4 Curva I-V, para los datos obtenidos en la muestra de Óxido de Zinc (ZnO).



En la Figura 4.4 se observa el mismo fenómeno que en las figuras 4.2 y 4.3, el cual es la división de las ocho curvas en dos grupos, debido a la forma rectangular de la muestra en estudio; el primer grupo de cuatro curvas tiene una pendiente de  $2,7045\text{E}+05 \pm 6,1836\text{E}+02$  [ $\Omega$ ] y el segundo agrupamiento tiene una pendiente de  $8,7230\text{E}+05 \pm 1,9432\text{E}+03$  [ $\Omega$ ], estos cambios de pendiente se deben a que cuatro

medidas de tensión, se hacen por el lado de menor longitud de la muestra y las cuatro restantes, se realizan por el lado de mayor longitud (ver Figura 3,14b); resultando estas últimas, con una caída de tensión mayor, por tal razón mayor resistencia, por lo tanto, se obtienen dos valores de resistencia diferentes (Ra y Rb), como se puede observar en la Tabla 4.5.

Tabla 4.7 Resultados de medidas de conductividad para la placa de Óxido de Zinc, el método de Van Der Pauw.

CONDUCTIVIDAD ZnO – Óxido de Zinc (2,4x1,3cm)					
Tensión aplicada [V]	5	10	15	20	25
<b>Ra [Ω]</b>	2,7220E+05 ±2,6447E+03	2,7067E+05 ±1,2402E+03	2,7030E+05 ±7,4389E+02	2,7032E+05 ±5,2263E+02	2,6876E+05 ±4,4721E+02
<b>Rb [Ω]</b>	8,7144E+05 ±7,5862E+03	8,7253E+05 ±3,4373E+03	8,7272E+05 ±2,0538E+03	8,7257E+05 ±3,0047E+03	8,7225E+05 ±3,4334E+03
<b>k</b>	1,8780	1,8780	1,8780	1,8780	1,8780
<b>f</b>	0,8957	0,8944	0,8941	0,8941	0,8930
<b>Rs [Ω]</b>	9,6191E+05 ±6,7573E+03	9,6009E+05 ±3,0689E+03	9,5960E+05 ±1,8339E+03	9,5954E+05 ±2,5606E+03	9,5682E+05 ±2,9035E+03
<b>Conductividad [S/m]</b>	<b>2,9703</b> ±2,0866E-02	<b>2,9759</b> ±9,5124E-03	<b>2,9774</b> ±5,6902E-03	<b>2,9776</b> ±7,9459E-03	<b>2,9861</b> ±9,0612E-03

Tabla 4.8 Coeficiente de determinación para las ocho configuraciones, placa de Óxido de Zinc (ZnO).

Configuración	I-V [12-43]	I-V [21-34]	I-V [43-12]	I-V [34-21]	I-V [14-23]	I-V [41-32]	I-V [23-14]	I-V [32-41]
Coeficiente de determinación	0.9998	0.9998	0.9999	0.9996	1	1	1	1

Los resultados obtenidos están dentro del rango de conductividades reportado por Velázquez Gonzalo<sup>45</sup>, el cual va desde 1 [S/m] hasta 1000 [S/m], en este caso, el valor de conductividad promedio obtenido en la prueba fue de  $2,9775 \pm 5,3047E-03$  [S/m], también se puede apreciar, la precisión de la medición comparando los valores inferiores y superiores obtenidos para la conductividad, con la conductividad promedio como se muestra a continuación: el valor límite inferior se encuentra alejando tan solo un 0,24% del valor promedio, y el límite superior, únicamente un 0,28% del promedio; y la resistencia superficial, con variaciones de  $9,5682E+05 \pm 2,9035E+03$  [ $\Omega$ ] a  $9,6191E+05 \pm 6,7573E+03$  [ $\Omega$ ]; y con un promedio de  $9,5959E+05 \pm 8,5690E+03$  [ $\Omega$ ], donde el límite inferior se aleja tan solo 0,28% del promedio y el límite superior se aleja 0,24%; estos resultados presentan buena precisión, debido al número de muestras seleccionado para la toma de mediciones, que para el caso, fueron 50 muestras por toma. Se observa que pese al rango de tensión tan amplio que se manejó (5 [V] los 25 [V]), los valores de conductividad presentan una buena precisión; la exactitud se puede observar con el hecho de que tanto se aproxima la medida obtenida al valor teórico, en este caso está dentro del rango expuesto en la literatura, por esto, el resultado es preciso y exacto.

Para esta prueba, también se cumple con las 5 condiciones expuestas por Van Der Pauw para una buena ejecución del método, las cuales son: la muestra debe ser plana, lisa, homogénea, los electrodos fueron ubicados en los extremos de la muestra y el área de la sección transversal de los electrodos es de 706 veces más pequeña que el área de la muestra de Óxido de Zinc (ZnO).

---

<sup>45</sup> VELÁZQUEZ NEVÁREZ, Gonzalo Alonso, et al. Optical and Electrical Properties of (002)-Oriented ZnO Films Prepared on Amorphous Substrates by Sol-Gel Spin-Coating. En: Materials Research. Noviembre, 2016. Vol. 19. No 1, p.116.

## 5. CONCLUSIONES

En este capítulo se muestran las conclusiones del trabajo, de acuerdo con los objetivos propuestos.

- Se validó el modelo de medida propuesto por Van Der Pauw, para un material del cual se conociera su conductividad eléctrica. En este caso la validación se realizó a una película delgada de platino, con grosor de 90 [nm], dispuesta sobre una oblea de silicio; en este caso, el rango de conductividad va desde los  $4,35E-04$  [S/m] a  $9,43E+06$  [S/m], dicho límite inferior, corresponde al valor teórico de conductividad del silicio a temperatura ambiente, y el rango superior es el valor teórico de conductividad del platino; el resultado obtenido para esta prueba fue de  $3,6204E+06 \pm 1,6209E+04$  [S/m], encontrándose dentro del rango expuesto en la literatura. El valor hallado, muestra una conductividad en la misma escala de E+06, esto muestra el efecto predominante de la película delgada de platino sobre el silicio.
- Se obtuvo un comportamiento lineal en las curvas I-V durante la validación del modelo con la película delgada de platino, la linealidad se observa con el cálculo del coeficiente de determinación entre la corriente y la tensión, este coeficiente indica la calidad que tiene un modelo para replicar resultados, ya que varía entre 0 y 1. El valor obtenido del coeficiente, con la película delgada de platino fue de 1 en todas las configuraciones, esto demuestra un excelente comportamiento óhmico entre los electrodos y la muestra.
- Se evidenció la importancia de estimar un rango de corriente y de tensión antes de realizar una medida, esta estimación se hace con base en el material que se va a medir; según su naturaleza conductora, semiconductor

o dieléctrica, la no estimación o planificación correcta de los rangos de corriente y tensión que se van a trabajar, conlleva a errores exorbitantes (mayores al 15%) en los resultados de medición; para la validación del prototipo en primera instancia, se optó por una lámina de cobre de 1 [mm] de espesor y conductividad teórica de  $5,81E+07$  [S/m] y las corrientes que se iban a manejar en la toma de medidas, se encontraban en un rango de 20[mA] a 1 [A], dichas corrientes no podían ser tomadas por el medidor de corriente (picoamperímetro), debido a que su máxima escala es de 20 [mA], por lo que en lugar de este, se utilizó un multímetro mastech my-64, que cuenta con resolución de  $3 \frac{1}{2}$  dígitos, en comparación con el picoamperímetro que cuenta con  $7 \frac{1}{2}$  dígitos, esta baja resolución del multímetro, introduce un error del 8,25% al resultado de cada medida, debido al truncamiento de cifras significativas que hace el multímetro, por lo tanto, se concluye que la muestra de cobre no fue la mejor elección para validar el prototipo, debido a la no estimación de corrientes a manejar y la falta de medidores de corriente para valores superiores a los 20 [mA].

- Se observó la dependencia de la resistencia y la forma de la muestra, dado que al cambiar la forma de las películas, las curvas I-V presentaron variaciones en sus pendientes, lo anterior obedece a la teoría, la cual expresa, que la resistencia del material depende de la longitud y área de este, es decir, cuando se midió una muestra cuadrada de cobre de 3,5 [cm] de lado, para una corriente inyectada de 0,8 [A] se obtuvo un único valor promedio de resistencia de  $4,5139E-06 \pm 1,0695E-07\Omega$ , mientras que en la muestra de película delgada de platino con su forma rectangular de 0,7 [cm] x 0,6 [cm], presentó dos valores de resistencia, una de  $7,7002E-01 \pm 0,0010$  [ $\Omega$ ] y otra de  $1,2812 \pm 0,0091$  [ $\Omega$ ], esto ocurre por el cambio en las configuraciones, ya que, en la que se obtiene un resultado de resistencia menor, es debido a que se mide tensión por el lado con menos longitud, en este caso 0,6 [cm] y por el contrario, cuando se mide la caída de tensión por

el lado de mayor longitud, en este caso de 0,7cm, se presenta una mayor caída de tensión y por tanto mayor resistencia, este fenómeno se puede apreciar de igual manera en las muestras de SnS y ZnO, que también son rectangulares, con dimensiones de 1,1 [cm] x 0,7 [cm] y 2,4 [cm] x 1,3 [cm] respectivamente, la muestra de SnS presenta dos resistencias promedio, una de  $2,1443E+05 \pm 2,6915E+03$  [ $\Omega$ ], otra de  $3,94E+03 \pm 1,04E+02$  [ $\Omega$ ] y la muestra de ZnO presenta una resistencia  $2,7045E+05 \pm 6,1836E+02$  [ $\Omega$ ] y otra de  $8,7230E+05 \pm 1,9432E+03$  [ $\Omega$ ].

- Se pudo corroborar la exactitud de los resultados obtenidos aplicando el modelo de medida de Van Der Pauw, comparándolos con valores teóricos encontrados en la literatura, por ejemplo, para la película delgada de platino sobre la oblea de silicio, el rango de conductividad teórico va desde  $4,35E-04$  [S/m] a  $9,43E+06$  [S/m], y el valor obtenido fue de  $3,6204E+06 \pm 1,6209E+04$  [S/m], el cual se encuentra dentro de dicho rango; la muestra de SnS, tiene un rango teórico para la conductividad de 3,08 [S/m] a 12,82 [S/m], el valor de conductividad obtenido para este caso es de  $8,1829 \pm 1,027E-01$  [S/m], encontrándose dentro de este rango, y por ultimo al muestra de ZnO tiene una conductividad teórica entre 1 [S/m] y 1000 [S/m] , el valor obtenido para este caso fue de  $2,9775 \pm 5,3047E-3$  [S/m], encontrándose dentro de dicho rango, todo esto muestra una buena exactitud de la medida para las muestras medidas, ya que, en todas las películas semiconductoras, los resultados se ajustaron a la literatura.
- Se pudo evidenciar la excelente precisión durante todas las medidas de cada una de las muestras semiconductoras (SnS y ZnO) y de igual forma, para la película delgada de platino sobre silicio; para la evaluación de esta precisión, se tuvieron en cuenta dos aspectos, el primero fue hallar el valor del coeficiente de determinación de las ocho configuraciones de cada muestra y

así poder encontrar el grado de relación de las muestras de corriente vs las de tensión, para el caso de la película delgada de platino sobre silicio, se obtuvo un coeficiente con valor de 1 para cada una de las 8 configuraciones; para la muestra de SnS arrojó valores entre 0,9976 y 1, y para la muestra de ZnO, los valores obtenidos estuvieron en el rango de 0,9996 y 1; por tanto, para cada uno de los tres casos, dicho coeficiente indica una excelente correlación de la variables y replicabilidad de resultados. El segundo aspecto que se tuvo en cuenta, fue qué tan alejados se encontraban los límites inferior como superior, del promedio obtenido para el valor de conductividad de cada una de las muestras, los resultados fueron los siguientes; el valor promedio obtenido para la película delgada de platino sobre la oblea de silicio, fue de  $3,6204E+06 \pm 1,6209E+04$  [S/m], su límite inferior se aleja tan solo 0,96% y el superior 0,87%; para la muestra de SnS se obtuvo un valor de conductividad promedio de  $8,1829 \pm 1,027E-01$  [S/m] y su límite inferior se aleja únicamente un 1,76% y el superior tan solo 3,54%; por último, la muestra de ZnO dio como resultado  $2,9775 \pm 5,3047E0-3$  [S/m] y su límite inferior se aleja tan solo 0,24% y su límite superior se aleja únicamente 0,28%; estos resultados muestran una excelente precisión, pese a que en cada una de las pruebas se hizo un barrido amplio de tensión desde 0 [V] a 30 [V], los resultados obtenidos siempre se encontraron en rangos pequeños como los ya mencionados, esta precisión se debe a las 50 muestras por cada medida, tomadas para tensión y corriente.

- Se evidenció la importancia que tiene el tratamiento y limpieza de las muestras, antes de realizar las medidas, ya que, tratándose de medidas superficiales, cualquier suciedad, rayón u óxido presente en algunas de estas, arroja un valor alterado de la medida, por ejemplo, cuando se trató de medir continuidad en el cobre, este no mostraba ningún valor, debido a la capa de óxido que se formaba sobre el metal, por esta razón las muestras

eran manipuladas con pinzas y no directamente con los dedos, para evitar introducir más error en la medida.

- Se puede deducir, que para la obtención de resultados con buena exactitud y precisión, se debe contar con excelentes equipos de medida, que cuenten con la misma resolución, y con esto, no tener inconvenientes de truncamiento de cifras significativas, ya que la exactitud de la medida depende del medidor con el cual sea tomada y la precisión depende del proceso estadístico que se le aplique a la medida, es decir entre mayor sea el número de muestras menor será su desviación estándar y menor su incertidumbre; el número recomendado por la teoría para las muestras es mayor a 12, por ejemplo, en este caso en particular, se encontró que para 12 muestras se tenía una desviación estándar de  $8,3779E-07$ , mientras que para 50 muestras, se obtiene una desviación estándar de  $2,3303E-06$ , esta es una de las razones por la que se obtuvo buena precisión en los resultados.
- Finalmente, se puede concluir que el prototipo es funcional, ya que presenta las condiciones adecuadas para la toma de las medidas en muestras semiconductoras desde 90 [nm] hasta 1,2 [ $\mu\text{m}$ ] de espesor y muestras semiconductoras desde 0,5 [cm] de lado a 3 [cm] de lado. A una temperatura ambiente de 25 °C, se puede medir la conductividad de semiconductores dopados, obteniendo valores dentro de los rangos teóricos; si por el contrario se requiere medir un semiconductor intrínseco como silicio puro, a temperatura ambiente, no está en las capacidades de medir bajo estas condiciones; por otro lado, si también se desea utilizar el prototipo para medir efecto Hall o conductividad en metales, se recomienda adicionar un equipo de medida de corriente que cuente con un rango mayor a los 20 [mA], ya que para los metales, se obtienen corrientes superiores este valor. Se consideró que la resistencia de los electrodos es despreciable en comparación con las

resistencias manejadas al medir películas delgadas semiconductoras, ya que las resistencias manejadas en este trabajo resultaron por el orden de  $E+05[\Omega]$  y la resistencia de los contactos es  $1,2720E-06 [\Omega]$ , insignificante en comparación con las resistencias medidas, pero si se pretende utilizar el prototipo para medir conductividad en conductores, esta resistencia debe tenerse en cuenta, dado que las resistencias en los conductores estarían por el orden de  $E-06$ .

## BIBLIOGRAFÍA

ADNANE L.; GOKIRMAK A. and SILVA H. High Temperature Hall Measurement Setup for Thin Film Characterization. En: American Institute of Physics. Julio, 2016. Vol. 87. No 075117, 6p.

ÁLVAREZ R., Ubaldina. Química II, Manual de actividades experimentales para el alumno. México: UNAM, Coordinación del Colegio de Ciencias y Humanidades, 1998. p.56. ISBN: 9789683665799.

BOTERO LONDOÑO, Mónica Andrea. Síntesis y caracterización de nuevos materiales no tóxicos empleados como capa buffer y capa absorbente en la fabricación de celdas solares. Tesis de doctora en ciencias - Física. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Departamento de física. 2008. 59p.

CONDE MENDOZA, Luis Ángel. Implementación de un sistema de medición de resistividad eléctrica en películas delgadas semiconductoras por el método de Van der Pauw. Tesis de magister en física. Lima: Universidad católica del Perú. Escuela de posgrado, 2017, 80p.

ESTRELLA RODRÍGUEZ, Julio Cesar. Mediciones eléctricas por el método de cuatro puntas en películas delgadas de interés fotovoltaico. Tesis de magister en tecnología avanzada. Altamira: Instituto Politécnico Nacional de México. Centro de investigación en ciencia aplicada y tecnología avanzada unidad Altamira, 2016, 95p.

GIL, Salvador. Experimentos de física de bajo costo usando TIC's: Medición de resistencias a cuatro puntas o método de Kelvin. [En línea]. Universidad Nacional

de General San Martín (Argentina). 2016. (Recuperado el 7 de octubre de 2018.)  
Disponible en [https://www.fisicarecreativa.com/unsam\\_f3/guias/activ\\_III\\_27q.pdf](https://www.fisicarecreativa.com/unsam_f3/guias/activ_III_27q.pdf).

GREEN, M. A.; GUNN, M. W. The evaluation of geometrical effects in four-point probe measurements. Brisbane: Solid-State Electronics, Vol 14. 1971, p.1167-1177.

HEGDE S.S., KUNJOMANAB A.G., *et al.* Vacuum annealed tin sulfide (SnS) thin films for solar cell applications. En: Science Direct. Diciembre, 2017. Vol. 10. p.78–84.

HURTADO MORALES, Mikel Fernando. Síntesis y caracterización de películas delgadas del semiconductor  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  y su uso como capa absorbente en celdas solares. Tesis de Doctorado en Ciencias – Química. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. 2014. 118p.

KASAP, Safa O. Principles of Electronic Materials and Devices, Third Edition. Boston: McGraw-Hill. 2006. p.378-380. ISBN 007-29-5791-3.

KEITHLEY INSTRUMENTS, INC. ExceLINX software for the Model 6485, 6487 and 6514. Cleveland. 2013. 22p.

KEITHLEY INSTRUMENTS, INC. Model 2182 and 2182A Nanovoltmeter User's Manual. Cleveland, 2004. Document number: 2182A-900-01 Rev. A. 144p.

KEITHLEY INSTRUMENTS, INC. Model 6485 Picoammeter Instruction Manual. Cleveland, 2001. Document number: 6485-901-01 Rev. A. 312p.

LLONTOP LÓPEZ, Paul David. Implementación de un sistema de medición de resistividad eléctrica de películas delgadas semiconductoras a bajas temperaturas. Tesis de magister en física. Lima: Universidad católica del Perú. Escuela de posgrado, 2017, 86p.

LOOK, C. David, Electrical Characterization of GaAs Materials and Devices. Fairborn: Wright State University. Jhon Wiley & Sons, 1989, 280p. ISBN 0-471-91702-8.

MARTINEZ RODRIGUEZ, Ricardo. Fundamentos teóricos y prácticos de la histoquímica. España: Editorial CSIC. 2008. p.91-98. ISBN: 978-84-00-08672-5.

MELO QUINTERO, Jhon Jaither. Diseño y Construcción de un Sistema de medidas de Efecto Hall DC y AC. Tesis de magister en ciencias-física. Manizales: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, 2011, 188p.

MICHEA MORA, Sebastián Alfonso. Propiedades magnéticas y efecto hall extraordinario en películas delgadas nanoestructuradas. Tesis de doctorado en ciencias con mención en física. Santiago: Universidad Santiago de Chile. Departamento de física, 2012, 109p.

PAUW van der, L. J. A method of measuring specific resistivity and Hall Effect of discs of arbitrary shape. En: Philips research Reports. Febrero, 1958. Vol. 13, no. 1, p.1-9.

PAUW van der, L. J. A method of measuring the resistivity and hall coefficient on lamellae of arbitrary shape. En: Philips technical review. 1958. Vol. 20, no. 8, p.220-224.

PIERRET, F. Robert. Advanced Semiconductor Fundamentals, second edition. New Jersey: Pearson Education Inc, 2002. P.190-196. ISBN: 978-0130617927.

REN21, Renewables 2015 global status report, (Paris: REN21 Secretariat), 2015. 251p. ISBN 978-3-9815934-6-4.

SCHROPP R. E. I.; y Madan A. Properties of conductive zinc oxide films for transparent electrode applications prepared by rf magnetron sputtering. En: Journal of Applied Physics. Mayo, 1989. Vol. 66. No 5, p2027-2031.

SHALÍMOVA, K.V. Física de los Semiconductores. Moscú: Editorial MIR, 1975. p.18-24. ISBN 84-401-0947-4.

SZE, Simón M.; KWOK K. Ng. Physics of semiconductor Devices. Third Edition. Taiwan; California: A John Wiley & Sons, Inc., 2006. p.30. ISBN: 978-0-470-06830-4.

TEKTRONIX INC. PS280 & PS283, DC Power Supplies, user manual. Wilsonville, 1991. Document number: 070-8355-03. 44p.

THIRUMAVALAVANA S.; MANI K. and SAGADEVAN S. Suresh. Studies on Hall Effect and DC Conductivity Measurements of Semiconductor Thin films Prepared by Chemical Bath Deposition (CBD) method. En: Journal of Nano and Electronic

Physics. Diciembre, 2015. Vol. 7, no. 4, 4p.

UNILEVER. ¿Cómo limpiar cobre? [En línea] Argentina. 2018. (Recuperado 10 de octubre de 2018) Disponible en: <https://www.cleanipedia.com/ar/limpieza-de-pisos-y-superficies/como-limpiar-cobre.html>.

VELÁZQUEZ NEVÁREZ, Gonzalo Alonso, *et al.* Optical and Electrical Properties of (002)-Oriented ZnO Films Prepared on Amorphous Substrates by Sol-Gel Spin-Coating. En: Materials Research. Noviembre, 2016. Vol. 19. No 1, p.113-117.

VIDAL SALGADO, Luis Eduardo. Diseño y construcción de un sistema de medidas de efecto Hall basado en la técnica de Van Der Pauw. Tesis de magister en Ciencias-física. Manizales: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ciencias y administración, 2006, 117p.