



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL "ADOLFO LÓPEZ MATEOS", ZACATENCO

"SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN
ELÉCTRICA DE MATERIALES POR EFECTO
HALL"

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN COMUNICACIONES Y
ELECTRÓNICA

PRESENTA:

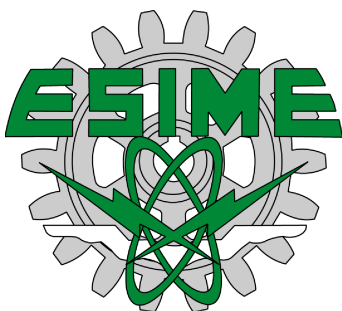
MELISSA ITZEL BALBUENA ALVAREZ

ASESORES

DR. DANIEL JIMÉNEZ OLARTE

DR. JESÚS ROBERTO GONZÁLEZ CASTILLO

DR. JESÚS JAIME MORENO ESCOBAR



CIUDAD DE MÉXICO, JUNIO 2022

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”**

T E M A D E T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN TESIS Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL
DEBERA (N) DESARROLLAR C. MELISSA ITZEL BALBUENA ALVAREZ**

“SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE MATERIALES POR EFECTO HALL”

DESARROLLAR UNA APLICACIÓN PARA EL CONTROL DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES SEMICONDUCTORES MEDIANTE EL EFECTO HALL POR MEDIO DEL SOFTWARE DE CONTROL Y DISEÑO LABVIEW.

- ❖ **INTRODUCCIÓN**
- ❖ **ESTADO DEL ARTE DEL EFECTO HALL**
- ❖ **TÉCNICAS DE MEDICIÓN DEL EFECTO HALL**
- ❖ **SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE MATERIALES POR EFECTO HALL**
- ❖ **EXPERIMENTACIÓN**
- ❖ **CONCLUSIONES**

CIUDAD DE MÉXICO, A 13 DE JUNIO DE 2022.

ASESORES



DR. DANIEL JIMÉNEZ OLARTE



DR. JESÚS ROBERTO GONZÁLEZ CASTILLO



DR. JESÚS JAIME MORENO ESCOBAR



**M. EN C. ITZALÁ RABADÁN MALDA
JEFA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA
EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA**



Autorización de uso de obra

Instituto Politécnico Nacional

P r e s e n t e

Bajo protesta de decir verdad la que suscribe **MELISSA ITZEL BALBUENA ALVAREZ**, manifiesto ser autora y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada **"SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE MATERIALES POR EFECTO HALL"**, en adelante "La Tesis" y de la cual se adjunta copia, *en un impreso y un cd*, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo al **Instituto Politécnico Nacional**, en adelante **EI IPN**, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales o en cualquier otro medio; *para apoyar futuros trabajos relacionados con el tema* de "La Tesis" por un periodo de **12 años** contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a **EI IPN** de su terminación.

En virtud de lo anterior, **EI IPN** deberá reconocer en todo momento mi calidad de autora de "La Tesis".

Adicionalmente, y en mi calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales de "La Tesis", manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por la suscrita respecto de "La Tesis", por lo que deslindo de toda responsabilidad a **EI IPN** en caso de que el contenido de "La Tesis" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México., a 18 de Agosto de 2022.

Atentamente

MELISSA ITZEL BALBUENA ALVAREZ

Agradecimientos

Esta etapa en definitiva ha sido una de las más bonitas, acogedoras y con altibajos, agradezco a la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por recibirme académicamente y deportivamente. Gracias por todo, fue un orgullo pertenecer a esta institución y representarla deportivamente.

A **mi mamá** Julia Álvarez por estar para mí en todo momento, por cuidarme, amarme tanto, confiar en mí, animarme siempre que lo necesite, su enorme apoyo incondicional en todo momento, por sus palabras de aliento y por confiar en mí. Gracias por todo, ¡Te amo infinitamente!

A **mi papá** Maximino Balbuena por apoyarme en todo lo que necesite en todo momento, por estar orgulloso de mí, por sus palabras de aliento, por estar al pendiente de mí siempre y por amarme muchísimo. Gracias por estar siempre para mí. ¡Te amo infinitamente!

A **mi novio** Óscar Flores por estar para mí siempre que lo necesite, por haber formado parte de esta etapa, por confiar en mí, por darme siempre ánimos, por amarme tanto y por procurarme siempre. Gracias por todo. ¡Te amo muchísimo!

A **mi Asesor de tesis** Daniel Jiménez {por apoyarme en todo lo que necesité, por estar al pendiente de mi trabajo, por confiar en mí, por darme ánimos y guiarme de manera exitosa en el desarrollo de este proyecto. ¡Gracias por todo!

A **mis Asesores de tesis** por apoyarme en todo momento y por estar al pendiente de este proyecto. ¡Gracias por todo!

A **mis amigos y familiares**, quienes están para mí en el momento que lo necesito, por apoyarme, por ser mis acompañantes y disfrutar de esta etapa juntos. Gracias por todo.

Melissa Itzel Balbuena Álvarez
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Zacatenco
Instituto Politécnico Nacional, México, 2022

Índice general

Índice de Figuras	I
Índice de Tablas	II
Abstract	III
Resumen	IV

1 Introducción

1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Justificación	3
1.3 Hipótesis	5
1.4 Objetivos	6
1.4.1 General	6
1.4.2 Particulares	6
1.5 Alcance del proyecto	7
1.6 Tesis del proyecto	8

2 Estado del Arte del efecto Hall

2.1 Efecto Hall	9
2.2 Trabajos Relacionados	12
2.2.1 Resistividad eléctrica y efecto Hall en películas delgadas de ZnO depositadas por evaporación reactiva	14
2.2.2 Diseño y construcción de un sistema de medidas de efecto Hall basado en la técnica de Van Der Pauw	15
2.2.3 Diseño e implementación de un sistema de medición de resistividad y efecto Hall para semiconductores	18
2.3 Discusión	21

3 Técnicas de medición del efecto Hall

3.1 Técnica de medición de efecto Hall	23
3.2 Medición de la resistividad por la técnica Van Der Pauw	29

3.3 Instrumentación en la técnica de efecto Hall	35
3.3.1 Equipo electrónico para la caracterización mediante el efecto Hall..	35
3.3.2 Integración de equipos	41
3.4 LabVIEW	45
3.4.1 Introducción	45
3.4.2 Interfaz GPIB	46
4 Sistema de Caracterización Eléctrica de Materiales por efecto Hall	
4.1 Medición de la resistividad	51
4.2 Control de campo magnético	54
4.3 Medición del efecto Hall	56
4.4 Sistema de conmutación	59
5 Experimentación	
5.1 Requerimientos del sistema	61
5.2 Oxido transparente conductor SnO ₂ :F como material a caracterizar	62
5.3 Caracterización eléctrica de SnO ₂ :F	64
5.4 Experimento	67
6 Conclusiones	
6.1 Conclusiones Finales	70
6.2 Contribuciones	71
6.3 Trabajo Futuro	71
A Diagrama de Flujo	72
B Evaluación Económica	73
Referencias	75

Índice de Figuras

1.1	Unidades Académicas.....	<u>2</u>
1.2	Equipos de medición de Efecto Hall.....	<u>4</u>
1.3	Esquema de efecto Hall.....	<u>5</u>
1.4	Análisis del Entorno.....	<u>7</u>
2.1	Línea del Tiempo efecto Hall.....	<u>11</u>
2.2	Modelo de resistividad eléctrica y efecto Hall en películas delgadas.....	<u>15</u>
2.3	Panel del control principal del sistema.....	<u>16</u>
2.4	Modelo Cibernético General del Sistema de Efecto Hall basado en Van der Pauw.....	<u>17</u>
2.5	Esquema de programa de control de resistividad y efecto Hall, trabajo relacionado 2.2.3.....	<u>18</u>
2.6	Programa de control, trabajo relacionado 2.2.3.....	<u>19</u>
2.7	Modelo Cibernético General del Sistema de medición y resistividad para semiconductores.....	<u>19</u>
3.1	Muestra de observación en la técnica de medición de efecto Hall.....	<u>24</u>
3.2	Técnica de medición de efecto Hall.....	<u>25</u>
3.3	Medición del voltaje de Hall.....	<u>25</u>
3.4	Resistividad por el método Van Der Pauw.....	<u>28</u>
3.5	Gráfica de Factor de corrección en el cálculo de la resistividad.....	<u>30</u>
3.6	Convección de mediciones de voltajes en el método de Van Der Pauw.....	<u>32</u>
3.7	Electroimán 3476 GMW Associates.....	<u>33</u>
3.8	Fuente de corriente Kepco modelo MAT55-20.....	<u>34</u>
3.9	Controlador Kepco modelo TMA 4882-27.....	<u>34</u>
3.10	Fuente de Corriente Keithley modelo 220 marca tektronix.....	<u>35</u>
3.11	Electrómetro Keithley modelo 6517B marca tektronix.....	<u>36</u>
3.12	Multímetro Keithley modelo 2000 marca tektronix.....	<u>37</u>
3.13	Sistema de conmutación Keithley modelo 7001 marca tektronix.....	<u>38</u>
3.14	Tarjeta de efecto Hall Keithley modelo 7065 marca tektronix.....	<u>38</u>
3.15	Esquema general de equipos.....	<u>39</u>
3.16	Integración de equipos del efecto Hall.....	<u>41</u>
3.17	Esquema de conmutación de voltajes de Hall.....	<u>42</u>

3.18	Interfaz GPIB.....	44
4.1	Portamuestras.....	46
4.2	Detalle del Portamuestras y del brazo que permite colocarlo en el campo magnético.....	47
4.3	Modelo Cibernético General del Sistema de Caracterización Eléctrica de Materiales por Efecto Hall.....	49
4.4	Panel de Usuario del sistema desarrollado.....	49
4.5	Modelo Cibernético General de la medición de resistividad por medio de la técnica de Van Der Pauw.....	50
4.6	Diagrama de flujo de la medición de resistividad.....	52
4.7	Equipo para la producción de campo magnético.....	54
4.8	Modelo Cibernético General para la generación de campo magnético.....	55
4.9	Diagrama de flujo de la medición de efecto Hall.....	57
4.10	Cálculo de generación de campo magnético.....	58
4.11	Detalle de la conexión de instrumentos y muestra para medir el voltaje de Hall.....	60
5.1	Estructura básica de una celda solar de película delgada.....	63
5.2	SnO ₂ :F sobre sustrato de vidrio.....	64
5.3	Panel de control con parámetros de entrada y resultados eléctricos.....	65
5.4	Sistema de medición de cuatro puntas para calcular la resistividad.....	66
5.5	Gráfica de dispersión por código de nivel para la variable Corriente.....	68
5.6	Gráfica ANOVA en el análisis de la varianza.....	68
A.1	Diagrama General del Sistema de Caracterización Eléctrica de Materiales por efecto Hall.....	74
B.1	Diagrama de flujo de efectivo del Sistema de Caracterización Eléctrica de Materiales por efecto Hall.....	76

Índice de Tablas

2.1	Efecto de la presión parcial de oxígeno sobre las propiedades eléctricas de películas delgadas de ZnO.....	<u>14</u>
2.2	Comparativa entre los trabajos relacionados.....	<u>20</u>
3.1	Convección de mediciones para la medición de los ocho voltajes de Hall.....	<u>26</u>
3.2	Mediciones.....	<u>40</u>
5.1	Parámetros eléctricos del SnO ₂ :F medido por otros autores (1).....	<u>62</u>
5.2	Parámetros de entrada para caracterizar una muestra de SnO ₂ :F.....	<u>64</u>
5.3	Parámetros eléctricos medidos para una muestra de SnO ₂ :F.....	<u>65</u>
5.4	Variables a analizar.....	<u>67</u>
5.5	Caracterizaciones realizadas en el Sistema de Caracterización Eléctrica de Materiales por efecto Hall.....	<u>67</u>
5.6	Add caption	

Abstract

In the elaboration of solar cells it's important to make an electrical characterization of the materials that one wishes to work with to develop them; this is why the Hall effect has an important role in their making. One of the problems found at the Instituto Politécnico Nacional (IPN), is that in the year 2021 there is limited commercial equipment that can measure the Hall effect, hence the making of these systems. In the Superior School of Physics and Mathematics there is the following equipment: two sources of power used for different functions, electrometer, multimeter, commutation system, Hall effect card and an electromagnet, all of which work together as a Hall effect system. In the following work a program of control in LabVIEW language was developed, which allows the operation of this equipment forming the System of Electrical Characterization of the Hall effect controlled with a GPIB interface, enabling to make measurements with the Hall effect and Van Der Pauw techniques. With the integration of this equipment and the implementation of the LabVIEW programed system, the characterization of semiconducting materials was done to obtain different properties like; density and mobility, resistivity of the material and the type of conductor (n o p). To evaluate the system a thin film of tin oxide is characterized doped with Fluor (SnO_2F), which is used widely in the development of solar cells. This control program allows posterior modifications for the integration of new equipment, modifications of the existing techniques and new characterization techniques. Keywords: Characterization of Materials, Hall effect, Programming language.

Resumen

En la elaboración de celdas solares es importante llevar a cabo una caracterización eléctrica de materiales con los que se desea desarrollar la celda solar, es por ello que el efecto Hall tiene un papel importante en la elaboración de la misma. Una de las problemáticas que se encontró dentro del Instituto Politécnico Nacional (IPN), es que para el 2021 solo se cuentan con muy pocos equipos de medición de efecto Hall comercial y por ello el surgimiento de este sistema. En la Escuela Superior de Física y Matemáticas se cuenta con los siguientes equipos: dos fuentes de corriente empleadas con diversas funciones, electrómetro, multímetro, sistema de conmutación, tarjeta de efecto Hall y un electroimán, los cuales en conjunto forman un sistema de efecto Hall. En este trabajo se desarrolla un programa de control en el lenguaje de LabVIEW que permite la operación de estos equipos formando el Sistema de Caracterización Eléctrica de efecto Hall controlados mediante una interfaz GPIB, permitiendo realizar mediciones mediante la técnica de efecto Hall y la técnica de Van Der Pauw. Con la integración de estos equipos y la implementación del sistema programado en LabVIEW se realiza la caracterización de materiales semiconductores obteniendo diversas propiedades como la densidad y su movilidad, resistividad del material y tipo de conductor (n o p). Para evaluar el sistema se caracteriza una película delgada de Óxido de Estaño dopado con Flúor (SnO₂:F) la cual se ocupa ampliamente en el desarrollo de celdas solares. Este programa de control permite modificaciones posteriores para la integración de nuevos equipos, modificaciones de las técnicas existentes y nuevas técnicas de caracterización. Palabras Clave: Caracterización de Materiales, efecto Hall, Lenguaje de Programación.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Planteamiento del problema

Dentro del Instituto Politécnico Nacional (IPN), en las unidades de la Ciudad de México (CDMX) solo se cuenta con dos equipos de medición comerciales de efecto Hall: en el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA) Unidad Legaria en el poniente de la CDMX y en el Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV) Unidad Zacatenco al norte de CDMX. En conjunto ambos centros de investigación dan servicio a más de 100 investigadores y estudiantes aproximadamente, de otras unidades académicas del IPN, como la Escuela Superior de Física y Matemáticas (ESFM), la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME), la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE), el Centro de Nanociencias, Micro y Nanotecnología (CNMN-IPN) y servicios externos que ofrecen, mostrado en la Figura [1.1](#).

Para el año 2021, existe una saturación en los equipos existentes y derivado de ello se necesita hacer fila ya que los equipos no se dan abasto. Los dos equipos con los que se cuenta son comerciales por lo cual no se pueden abrir o modificar, lo deseable es tener un equipo que realice la medición de efecto Hall el cual sea escalable y modulable, y por lo tanto en un futuro sea capaz de realizar mediciones basadas en el efecto Hall como el *foto-efecto Hall*.

Solo se miden algunas muestras derivado a la saturación que tienen los equipos existentes, conforme a ello no se definen algunos comportamientos y en el caso del resto de las muestras se hace la suposición de que tienen un comportamiento similar al semiconductor que se caracteriza. Esto afecta directamente a los investigadores de la ESFM, ESIME, ESIQIE, CNMN-IPN, que no cuentan con un equipo de efecto Hall y que requieran de ese servicio para caracterizar materiales semiconductores.

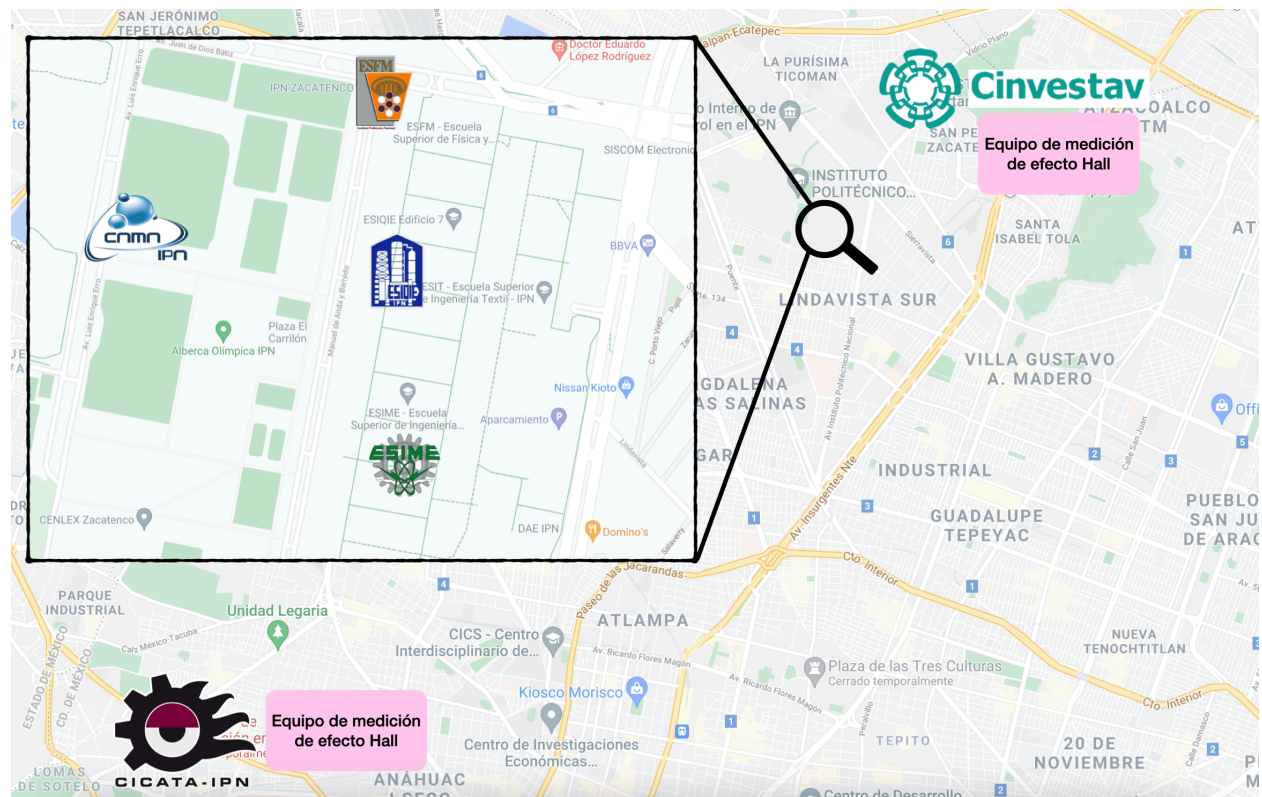


Figura 1.1: Mapa de Unidades Académicas (2)

1.2 Justificación

Para los desarrolladores de celdas solares es muy importante conocer las propiedades eléctricas de los materiales que forman la celda solar porque estos valores influyen en su desempeño.

El grupo de investigación en estado sólido y celdas solares de la ESFM desarrolla celdas solares de película delgada de diferentes tecnologías como son: Teluro de Cadmio (CdTe), Selenuro de antimonio (Sb_2Se_3) y Cobre-Indio-Galio-Selenio (CIGS) que son tecnologías actuales, donde hay un área muy grande de oportunidad para hacer aportaciones y presentar avances en la tecnología.

La medición del efecto Hall es una técnica con la cual pueden obtenerse las propiedades eléctricas de un semiconductor como la **concentración de portadores, movilidad de portadores, el tipo de semiconductor (n o p) y la resistividad del material.**

Por un lado, la puesta en funcionamiento del sistema de efecto Hall de la ESFM incrementará la infraestructura de equipos de caracterización del IPN permitiendo tener caracterizaciones eléctricas de materiales a los investigadores del IPN y de otras Instituciones que colaboran con el IPN en el desarrollo de celdas solares, como lo es la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM) que ha colaborado frecuentemente en proyectos de investigación con el IPN.

Por otra parte, los equipos de caracterización del CICATA y CINVESTAV son de tipo comercial por lo que hacer modificaciones se vuelve algo difícil. Es por ello, que para la implementación de nuevos métodos de medición, como el foto-efecto Hall (efecto Hall asistido por luz), es necesario obtener otras propiedades eléctricas de los materiales. Esto es una innovación en este campo de investigación dado que, el sistema propuesto desarrolla un programa de control el cual se puede modificar con nuevas configuraciones de los equipos.

Es importante mencionar que todos los equipos electrónicos que forman parte del sistema de efecto Hall cuentan con una Interfaz de Comunicación de Bus de Propósito General (General Purpose Interface Bus, GPIB) hacia la computadora y las mismas compañías fabricantes de los equipos desarrollan controladores para operarlos a través de LabVIEW.

Actualmente, la ESFM cuenta con fuente de corriente, Voltmetro, tarjetas de adquisición de datos (DAQ) y campo magnético, es decir cuenta con todos los instrumentos necesarios para configurar un sistema completo de medición de efecto Hall, sin embargo, no se cuenta con un programa de control que coordine a cada uno de estos equipos electrónicos para llevar a cabo la medición.

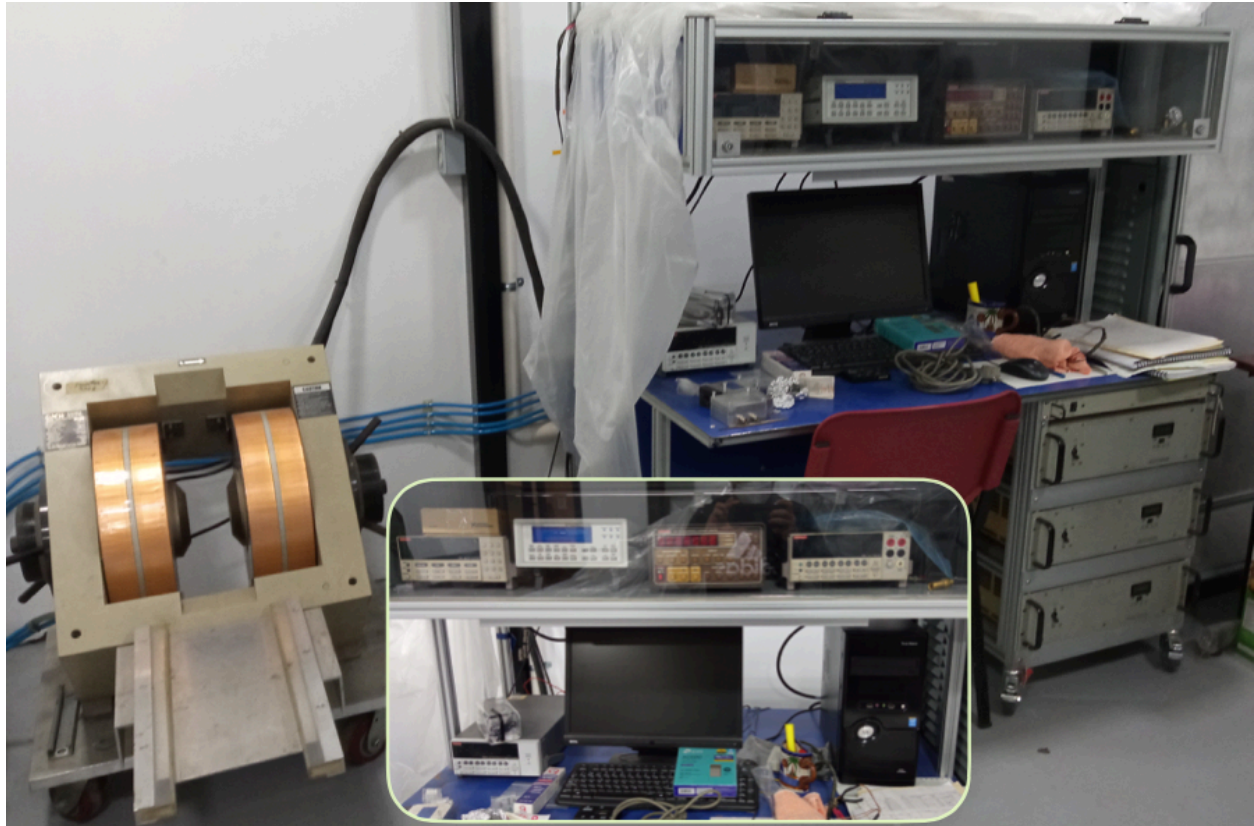


Figura 1.2: Equipo de medición de *Efecto Hall* de la ESFM - IPN

1.3 Hipótesis

Es posible desarrollar un programa de control en lenguaje gráfico de LabVIEW que permita coordinar la operación de los equipos de medición necesarios en el efecto Hall para obtener los parámetros eléctricos de muestras semiconductoras que desarrollan los investigadores de la ESFM, ESIME, ESIQIE y otros centros de investigación que estudian materiales semiconductores. En la Figura 1.3 se muestra un esquema de efecto Hall, donde es detallado su conectividad y equipo que lo conforma.

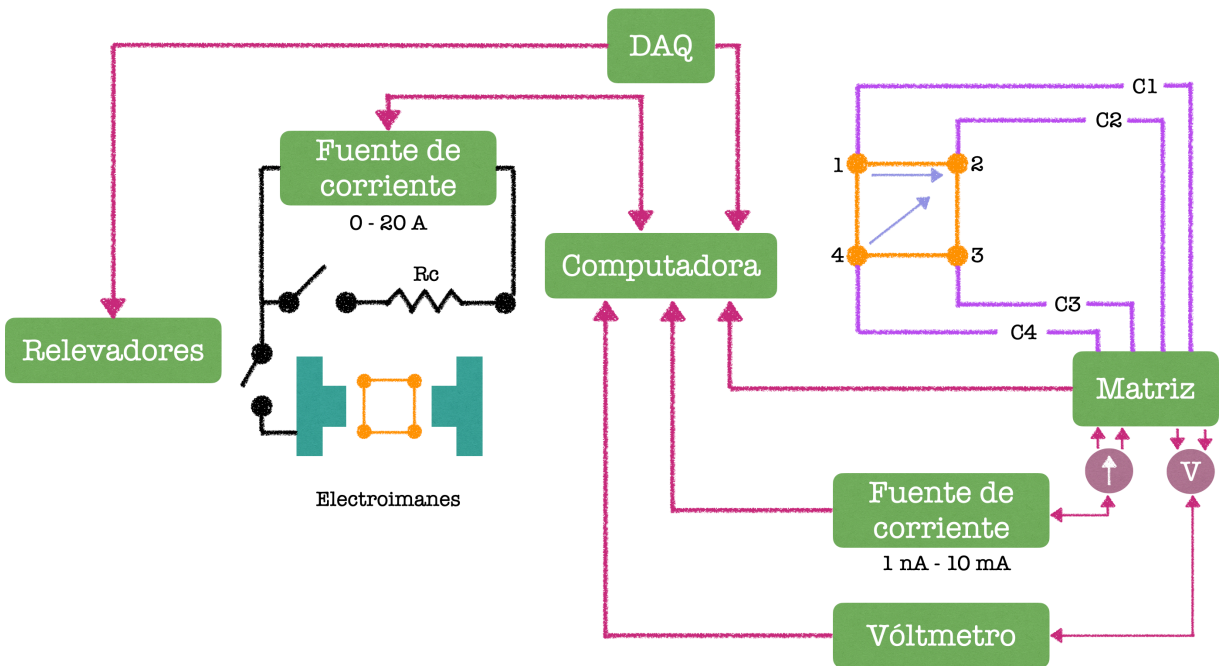


Figura 1.3: Esquema de efecto Hall

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Desarrollar una aplicación para el control de un sistema de caracterización de materiales semiconductores mediante el Efecto Hall por medio del software de control y diseño LabVIEW.

1.4.2 Particulares

- Analizar trabajos relacionados con sistemas de efecto Hall.
- Estudiar los fundamentos del efecto Hall, el método de Van Der Pauw y su instrumentación.
- Desarrollar una aplicación en LabVIEW que permita realizar mediciones de efecto Hall para obtener parámetros eléctricos de materiales semiconductores mediante el control de equipo electrónico propio de un sistema de efecto Hall.
- Evaluar la aplicación de control por efecto Hall comprobando cada uno de los requerimientos propuestos, verificar la eficacia del programa de control con el usuario final proponiendo posibilidad de nuevas técnicas de medición.

1.5 Alcance del proyecto

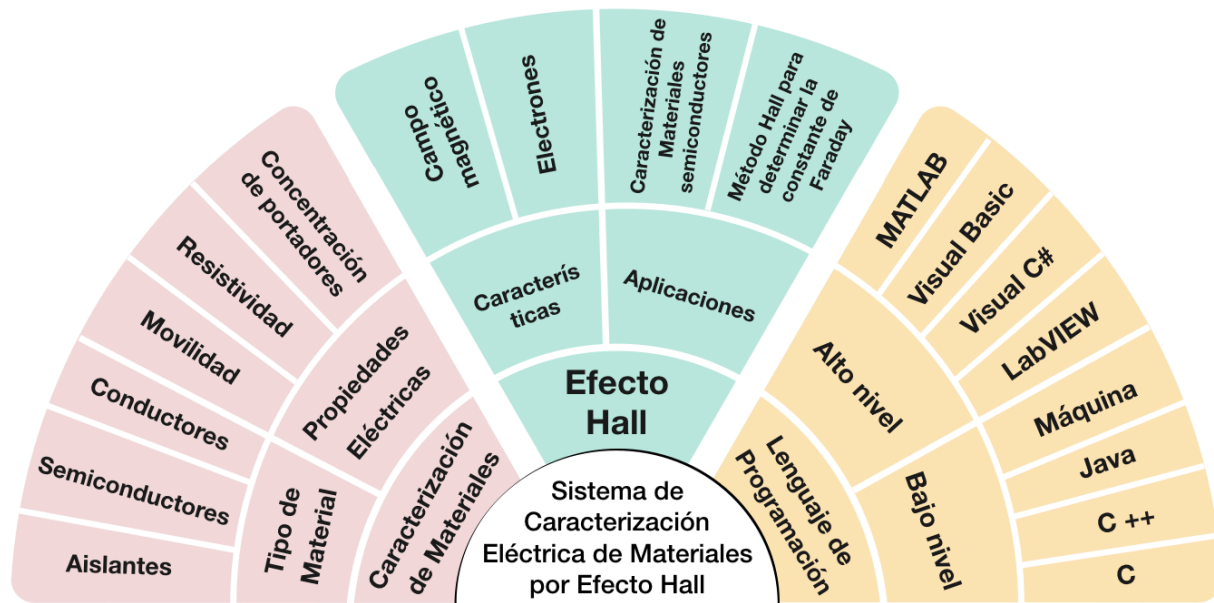


Figura 1.4: Análisis del Entorno

El sistema de medición a desarrollar sería un sistema similar a los ya existentes, pero tendrá la opción de ser modificado para poder incorporar implementaciones a futuro es decir será moduable.

Se prevé que por las características de los equipos y del programa de control pueda cubrir la demanda de los investigadores de ESIME, ESIQIE, ESFM, CNMN-IPN.

Es importante mencionar que todos los equipos electrónicos que forman parte del sistema de efecto Hall tiene una interfaz GPIB hacia la computadora, y las mismas compañías fabricantes de los equipos han desarrollado controladores para operar los equipos a través de LabVIEW, es por ello que se decide desarrollar la aplicación en LabVIEW.

En la Figura 1.4 se muestran las palabras claves de este sistema, en el cual se efectúa el efecto Hall con la aplicación de caracterización de materiales semiconductores obteniendo propiedades como su concentración de portadores, resistividad y movilidad en un lenguaje gráfico de LabVIEW.

1.6 Tesis del Proyecto

Los materiales semiconductores que se utilizan para el desarrollo de las celdas solares deben ser caracterizados, entre esas caracterizaciones se tienen las ópticas y las eléctricas. Dentro de estas la medición de efecto Hall es fundamental para obtener las propiedades eléctricas del semiconductor.

Para optimizar el desempeño de las celdas solares se utilizan diferentes técnicas de crecimiento de los materiales o para una técnica se varían los parámetros de crecimiento con el fin de obtener diferentes propiedades ópticas y eléctricas de los materiales que forman la celda solar. Luego, las películas delgadas semiconductoras se caracterizan para evaluar la influencia de algún parámetro de crecimiento por ejemplo, en sus propiedades eléctricas. Aquí, es de suma importancia la necesidad de contar con un sistema de medición de efecto Hall.

En el presente sistema se retoma un poco de la historia del efecto Hall descubierto por Edwin Herbert Hall, se elabora un análisis de trabajos relacionados buscados en diversos repositorios realizando un breve resumen de cada uno de ellos.

Se explica de manera detallada la técnica de medición de efecto Hall mencionando la geometría de medición y convección de mediciones, obteniendo de esta manera los coeficientes de Hall, concentración de portadores y movilidad de Hall. Así también es plasmada la medición de resistividad por el método de Van Der Pauw donde nos otorga una medición basada en un método a cuatro puntas. Se detalla la instrumentación en la técnica de efecto Hall, mostrando cada uno de los componentes y funcionamiento dentro del sistema. Además se menciona el lenguaje de programación en la que es desarrollado.

Es elaborado un proceso metodológico incluyendo modelos cibernéticos para el proceso de la caracterización de materiales. Finalmente se realiza una experimentación sobre Óxido de estaño dopado con Flúor ($\text{SnO}_2:\text{F}$).

Capítulo 2

Estado del Arte del efecto Hall

2.1 Efecto Hall

El efecto Hall es un fenómeno electromagnético que implica la formación de una diferencia de potencial entre dos extremos de una muestra que se encuentra dentro de un campo magnético. Las cargas en movimiento dentro del material son desviadas de su trayectoria inicial por efecto del campo magnético lo que genera una acumulación de carga y a su vez una diferencia de potencial. El valor de la diferencia de potencial depende de las propiedades eléctricas del material a caracterizar, por lo que el efecto Hall es ampliamente utilizado para la caracterización eléctrica de materiales.

El efecto Hall fue descubierto por el físico Estadounidense Edwin Herbert Hall en 1879 durante el desarrollo de su tesis de doctorado en física con la dirección de Henry A. Rowland, este efecto fue nombrado en su honor.

Edwin Herbert Hall estudió en la Universidad John Hopkins, posterior a ello laboró en la Universidad de Harvard como profesor en donde desempeñó el resto de su carrera hasta 1921, ahí inició su investigación en termoeléctricas en donde elaboró diversos libros de texto de física y manuales de laboratorio, los cuales fueron distribuidos por todo el mundo.

La motivación de Hall fue el intentar validar la observación de Maxwell y con la influencia de otro artículo en donde habla acerca de un imán que actúa sobre una corriente en un conductor fijo de la misma manera como actúa cuando este se mueve libremente, cabe mencionar que el asesor de tesis de Hall había intentado realizar un experimento basado en esto aunque sin éxito alguno.

Hall decidió realizar diversos experimentos con un dispositivo el cual esta formado de un alambre de plata germana en espiral de manera plana entre dos discos delgados de caucho, este dispositivo era colocado entre los polos de un electroimán, su colocación es de tal manera en la que las líneas de fuerza magnética puedan atravesar el espiral en ángulos rectos como primer experimento, al paso de las pruebas y resultados negativos fue que Rowland sugirió cambiar por láminas de oro montadas sobre una placa de vidrio. Derivado de esto y con un éxito obtenido, Hall mencionó en su artículo “El fenómeno observado era lo que esperaba”.

La acción de un imán establecido en una lámina de oro que tenga una fuerza electromotriz en ángulos rectos de la fuerza primaria electromotriz, dicha fuerza no se manifiesta por sí misma en condiciones ordinarias si su circuito estuviese incompleto. Una vez se complete el circuito mediante el galvanómetro de Thomson es cuándo fluye corriente, la corriente del galvanómetro dependerá de la resistencia del mismo, las conexiones y la distancia que esta entre ambos puntos de la lámina donde se encuentran los extremos del alambre en el galvanómetro.

En la época en la que fue estudiado el Efecto Hall, el experimento generó la tensión Hall, la cual es generada en extremos de una placa metálica donde es detectado un aumento en la resistencia en el conductor derivado a un campo magnético, esta idea ya había sido planteada por diferentes científicos entre ellos William Thomson.

Este efecto permite dar cuenta del signo de los portadores de carga analizados en diferentes metales, esto empleando una densidad de portadores p y su signo de la carga ya sea positivo o negativo. Anterior a esto creían que los portadores de carga eran negativos, aunque algunos de los materiales eran de naturaleza positiva.

Parte de su sustento teórico proviene de la Electrodinámica Clásica en donde una carga eléctrica que es sometida a una acción simultánea de un campo magnético y un campo eléctrico experimente fuerza. Esta fuerza obtenida es colineal con el campo eléctrico pero es opuesta a la fuerza magnética.

El Efecto Hall esta dividido por Efecto Hall Clásico y Efecto Hall Cuántico el cual fue descubierto por Klaus von Klitzing quien recibió el Premio Nobel de Física en 1985. El descubrimiento del Efecto Hall es que cuenta con una explicación involucrando a portadores de carga y esto se llevó a cabo 18 años antes del descubrimiento del electrón.

(3) (4)

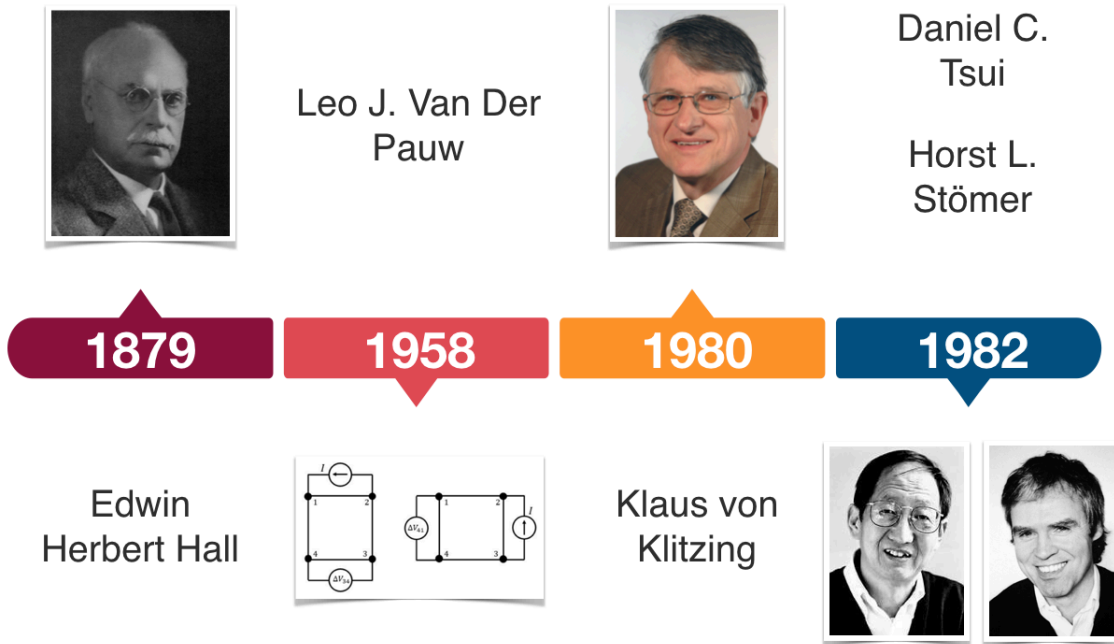


Figura 2.1: Línea del tiempo de avances científicos relacionados con el *efecto Hall*

2.2 Trabajos Relacionados

Llevando a cabo una búsqueda bibliográfica en diversas bases de datos de los repositorios de la UNAM, REDIB, repositorio Institucional de la Universidad de Colombia y Dspace, fueron encontrados diversos trabajos relacionados a nuestra palabra clave efecto Hall:

- Medidas de efecto hall y resistividad en aleaciones magnéticas amorfas basadas en CoFe por Melo Quintero Jhon, Rosales Rivera Andrés y Giraldo Daza Helver, 2010 [\(5\)](#)
- Diseño y construcción de un sistema de medidas de efecto hall basado en la técnica de Van Der Pauw por Vidal Salgado Luis Eduardo, 2008 [\(6\)](#)
- Resistividad eléctrica y Efecto Hall en películas delgadas de ZnO depositadas por evaporación reactiva por Fredy Giovanni Mesa Rodriguez y Carlos Andrés Arredondo Orozco, Octubre 2010 [\(7\)](#)
- Efecto Hall y estudio de fotovoltaje superficial transiente (SPV) en películas delgadas de Cu_3BiS_3 por F. Mesa, A. Dussan, B.A. Paez Sierra, H. Rodriguez Hernández. [\(8\)](#)
- Diseño e implementación de un sistema de medición de resistividad y efecto Hall para semiconductores por Martínez Ascencio, Eduardo Ulises, 2013 [\(9\)](#)
- Estudios Del Efecto Hall Cuántico en Heteroestructuras Semiconductoras Desarrolladas en México para Reproducir la Unidad de Resistencia Eléctrica por Hernández Marquez Felipe Leon, Enero 2009

En la búsqueda relacionada con la palabra clave caracterización de materiales se encontraron los siguientes:

- Diseño e implementación de un sistema de caracterización para microsensors de efecto hall por F. López Huerta, G. Rojas Nava, B. S. Soto Cruz y A. L. Herrera Maya, Octubre 2012 [\(10\)](#)
- Aplicaciones de radiometría fototérmica infrarroja en la caracterización de materiales semiconductores y metálicos por Rojas Rodríguez Ignacio, Octubre 2008 [\(11\)](#)

- Obtención y caracterización de celdas solares CdTe/CdS por la técnica CSVT a partir de materiales sinterizados por Santoyo Morales José Guadalupe, Octubre 2015 (12)
- Síntesis y caracterización de materiales compuestos por zeolitas y modificadas con cerio para la absorción de CO₂ por Camacho Inzunza Alan Alexis, Mayo 2018 (13)

En la búsqueda relacionada con la palabra clave se encontraron los siguientes:

- Uso de lenguajes de programación para desarrollar el razonamiento lógico matemático en los niños por Franklin Daniel Aguilar Enríquez, 2019 (14)
- Introducción a la programación utilizada en máquinas fresadoras de control numérico con lenguaje de programación Heidenhain TNC por Alvarado Hernández Felipe, Abril 2014 (15)
- Programa en lenguaje gráfico Ladder para la operación de seguridad en un quemador industrial por Palacios Vázquez Francisco Javier Ica, Junio 2017 (16)
- Unidad para supervisión y control de medición de efecto hall con LabView® por Rodríguez Hernán, Jiménez L Camilo, 2008 (17)

Las palabras clave de este trabajo de manera independiente, cada una de ellas puede constituir un área de la física o de la ingeniería, por lo que los trabajos que incluyen algunas o todas las palabras clave en conjunto son los mostrados abajo y de estos se realizará una discusión.

- Resistividad eléctrica y Efecto Hall en películas delgadas de ZnO depositadas por evaporación reactiva por Fredy Giovanni Mesa Rodriguez y Carlos Andrés Arredondo Orozco, Octubre 2010 (7)
- Diseño y construcción de un sistema de medidas de efecto hall basado en la técnica de Van Der Pauw por Vidal Salgado Luis Eduardo, 2008 (6)
- Diseño e implementación de un sistema de medición de resistividad y efecto Hall para semiconductores por Martínez Ascencio Eduardo Ulises, 2013 (9)

2.2.1 Resistividad eléctrica y Efecto Hall en películas delgadas de ZnO depositadas por evaporación reactiva

En este trabajo elaborado por Mesa Rodriguez y Arredondo Orozco (7), se evalúa la conductividad eléctrica y la concentración de portadores por medio de la técnica de efecto Hall para películas delgadas de óxido de zinc (ZnO) que fueron sometidas a diferentes cantidades de oxígeno dentro de la cámara de crecimiento.

Dado que las películas delgadas de ZnO son utilizadas en la fabricación de las células solares, es importante evaluar su conductividad eléctrica y su transmitancia. Mientras que el compuesto ZnO se crece a partir de la reacción de vapores de zinc con oxígeno es importante evaluar que cantidad de oxígeno debe contener la cámara de crecimiento para obtener películas delgadas de ZnO de alta conductividad eléctrica y alta transmitancia.

Para la medición de la transmitancia se usó un espectrofotómetro de la marca Perkin Elmer y la concentración de portadores de carga y la conductividad se midió usando un equipo basado en una tarjeta de efecto Hall modelo 7065 de la marca Keithley.

Los resultados de la medición de la resistividad y la densidad de portadores se muestran en la Tabla 2.1. Como se puede observar conforme se incrementa la cantidad de oxígeno dentro de la cámara de crecimiento la resistividad disminuye, es decir, la muestra es más conductora, esto se asocia al aumento de la densidad de portadores de carga. De este trabajo se puede concluir que para tener muestras lo más conductoras posible de ZnO se debe tener una presión de oxígeno de 0.35 mbar dentro de la cámara de crecimiento.

Con el equipo de medición de efecto Hall se puede medir los parámetros eléctricos de las películas delgadas de ZnO y evaluar la dependencia de estos con las características de los equipos de crecimiento de ZnO lo que le permite a los desarrolladores de dispositivos fotovoltaicos optimizar su eficiencia.

Tabla 2.1: Efecto de la presión parcial de oxígeno sobre las propiedades eléctricas de películas delgadas de ZnO (7)

Muestra	$PO_2(\text{mbar})$	$\rho(\Omega \times \text{cm})$	$N(\text{cm}^{-3})$
ZnOF1	0.15	2.7×10^{-3}	1.5119
ZnO72	0.25	3.4×10^{-4}	1.620
ZnO93	0.53	6.4×10^{-4}	1.5119

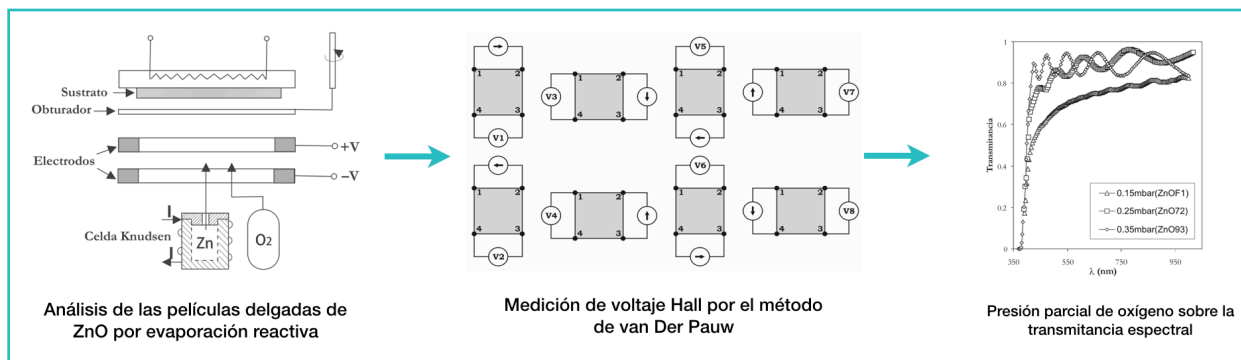


Figura 2.2: Modelo de *resistividad eléctrica y efecto Hall* en películas delgadas de ZnO (7)

2.2.2 Diseño y construcción de un sistema de medidas de efecto Hall basado en la técnica de Van Der Pauw

En trabajo de maestría, elaborado por Luis Eduardo Vidal Salgado (6) de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, se desarrolla un sistema modular y automatizado que permite la medición de la resistividad y efecto Hall a temperatura ambiente.

Los elementos que componen este sistema se muestran en la Figura 2.4. Para proporcionar un campo magnético se utilizó un electroimán capaz de proveer de un campo magnético de hasta 1 Tesla que además tiene incorporado un teslametro para la medición continua del campo. Para medir las diferencias de potencial se utilizó una

fuente-medidor de alta precisión de la marca Keithley que puede suministrar corrientes y medir diferencias de potencial al mismo tiempo. Para llevar a cabo las distintas mediciones de voltaje requeridas por la técnica del efecto Hall se desarrolló un conmutador que se puede controlar por el puerto paralelo de una computadora y que permite hacer conmutaciones automáticas para el suministro de corriente y medición de voltaje requeridas por la técnica.

Dado que se utilizaron algunos equipos comerciales y otros se desarrollaron para los fines específicos de este trabajo la comunicación con todos los instrumentos se llevó a cabo por medio de dos puertos paralelos y una tarjeta GPIB. Así, la fuente-medidor Keithley se controló desde la computadora por medio de la tarjeta GPIB mientras que por el puerto paralelo se controló una fuente de corriente de hasta 20 A requerida por el electroimán y el conmutador.

El control de los equipos, tanto comerciales como los desarrollados por ellos, se llevó a cabo a través de un programa desarrollado en el lenguaje gráfico de LabVIEW, debido a que como Vidal Salgado lo comenta en su trabajo escrito *LabVIEW es muy simple de manejar*, es un programa enfocado a la instrumentación virtual y cuenta con librerías especializadas para el manejo de DAQ y GPIB. Para el diseño del programa de control se tuvieron en cuenta las siguientes condiciones:

- Interfaz amigable con el usuario
- Mantener los equipos seguros en caso de mal manejo del programa por parte del usuario
- Manejo de errores
- Mensajes visuales para el usuario
- Generación de reportes de resultados en formato de texto

Con el sistema desarrollado se realizaron pruebas de calibración y validación. Estas pruebas se realizaron con cintas de cobre y cintas para alarmas dado que sus características eléctricas son conocidas en la literatura.

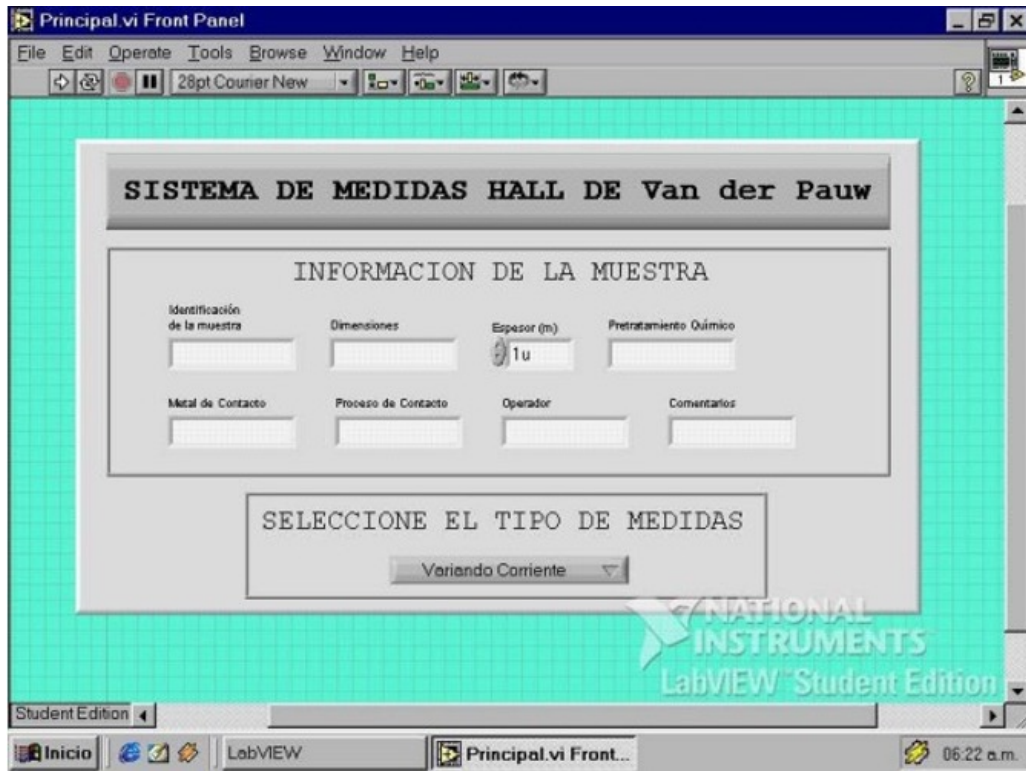


Figura 2.3: Panel de control del software del sistema (6)

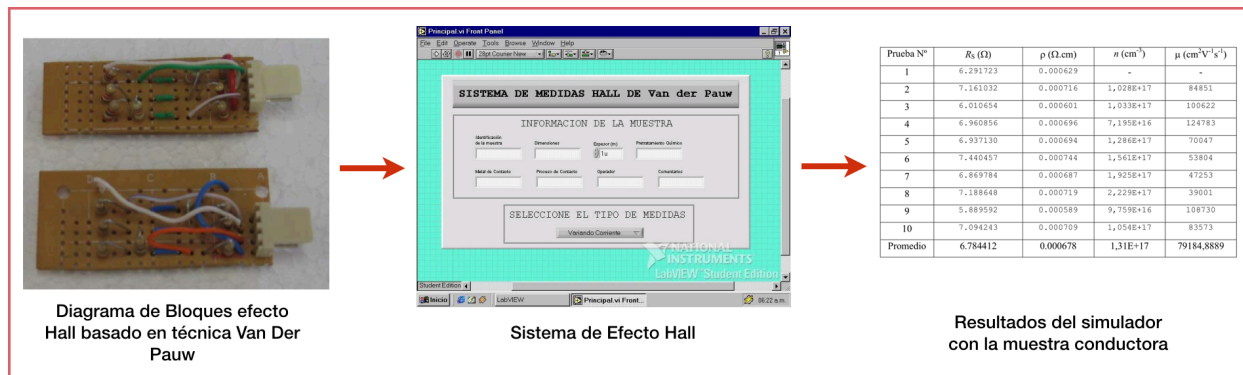


Figura 2.4: Modelo Cibernético General del Sistema de medición de Efecto Hall basado en la técnica de Van der Pauw (6)

2.2.3 Diseño e implementación de un sistema de medición de resistividad y efecto Hall para semiconductores.

En este trabajo de maestría, desarrollado por el Ing. Eduardo Ulises Martínez Ascencio (9) del Instituto de Investigación en Materiales de la UNAM, se desarrolló un sistema de medición de resistividad y efecto Hall utilizando dos multímetros Keithley modelo 2000, una fuente de corriente Keithley modelo 6220 y un pico am- perímetro marca Keithley modelo 6485. Para realizar las conmutaciones requeridas por la técnica de efecto Hall se utilizó un equipo de conmutación comercial marca Keithley modelo 7001.

Este último equipo requiere de una tarjeta adicional para hacer las conmutaciones específicas para la técnica, por tal motivo se utilizó en conjunto con el equipo de conmutación la tarjeta 7012-C que permite conmutar conexiones eléctricas entre cuatro filas y diez columnas. En cada fila o columna esta conectado un elemento indispensable en la técnica y por medio de la con- mutación se van interconectando entre si para obtener diferentes voltajes sobre todos los cuatro contactos de la muestra.

Para generar el campo magnético se ocuparon imanes permanentes de Neodimio por lo que en este trabajo no se requirió de una fuente de corriente de potencia. Adicionalmente se mide la temperatura de la muestra por medio de un termopar y uno de los multímetros Keithley modelo 2000. Dado que todos lo equipos tienen una salida GPIB para el control general del sistema se utilizó una tarjeta GPIB USB-HS de National Instruments y un programa desarrollado en LabVIEW.

Antes de realizar las mediciones de resistividad y efecto Hall se verifica que los contactos sobre la muestra a medir tengan una respuesta lineal con resistencia contacto-muestra constante, que para cualquier valor de corriente y de voltaje la resistencia entre el contacto y la muestra sea la misma, aquí se dice que la unión contacto-muestra cumple la ley de Ohm. Esto hace que la medición realizada se pueda llevar a cabo sin importar la corriente de entrada a la muestra. Si pasa lo contrario se tiene una medición errónea. El presente trabajo pone especial atención en esta caracterización.

Después de validar que la interfaz contacto-muestra cumpla con la ley de Ohm se realiza la medición de resistividad. Por medio del equipo de conmutación 7001 se realizan 8 diferentes conexiones entre los 4 contactos de la muestra a caracterizar sin tener los imanes de neodimio presentes. Por medio del programa de control se inyecta corriente por dos contactos y por los otros dos se lee el voltaje y de acuerdo con las ecuaciones del método Van Der Pauw se calcula la resistividad de la muestra.

Posteriormente se realiza la medición de efecto Hall ahora colocando el imán de Neodimio con el campo magnético en una dirección y posteriormente otras cuatro mediciones de voltaje con el campo magnético en dirección contraria. Para cambiar la dirección del campo magnético manualmente se invierte la posición del imán.

Finalmente, con el sistema de medición de resistividad y efecto Hall se caracterizaron muestras de silicio cristalino tipo p de diferentes espesores a cuál se le colocaron cuatro contactos con pintura de plata. Los resultados de las mediciones se compararon con un modelo matemático de las propiedades eléctricas del silicio tipo p desarrollado por una empresa llamada Solecon Laboratories. Al comparar los resultados experimentales con los calculados se encontraron factores de corrección que se agregaron en el programa de control de LabVIEW.

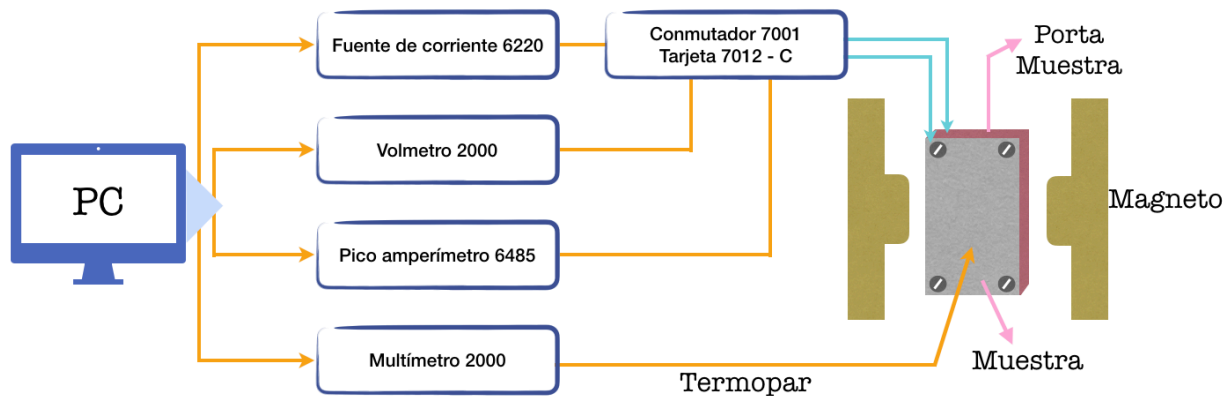


Figura 2.5: Esquema de control del sistema de medición y resistividad de efecto Hall, elaborado con referencia en (9)

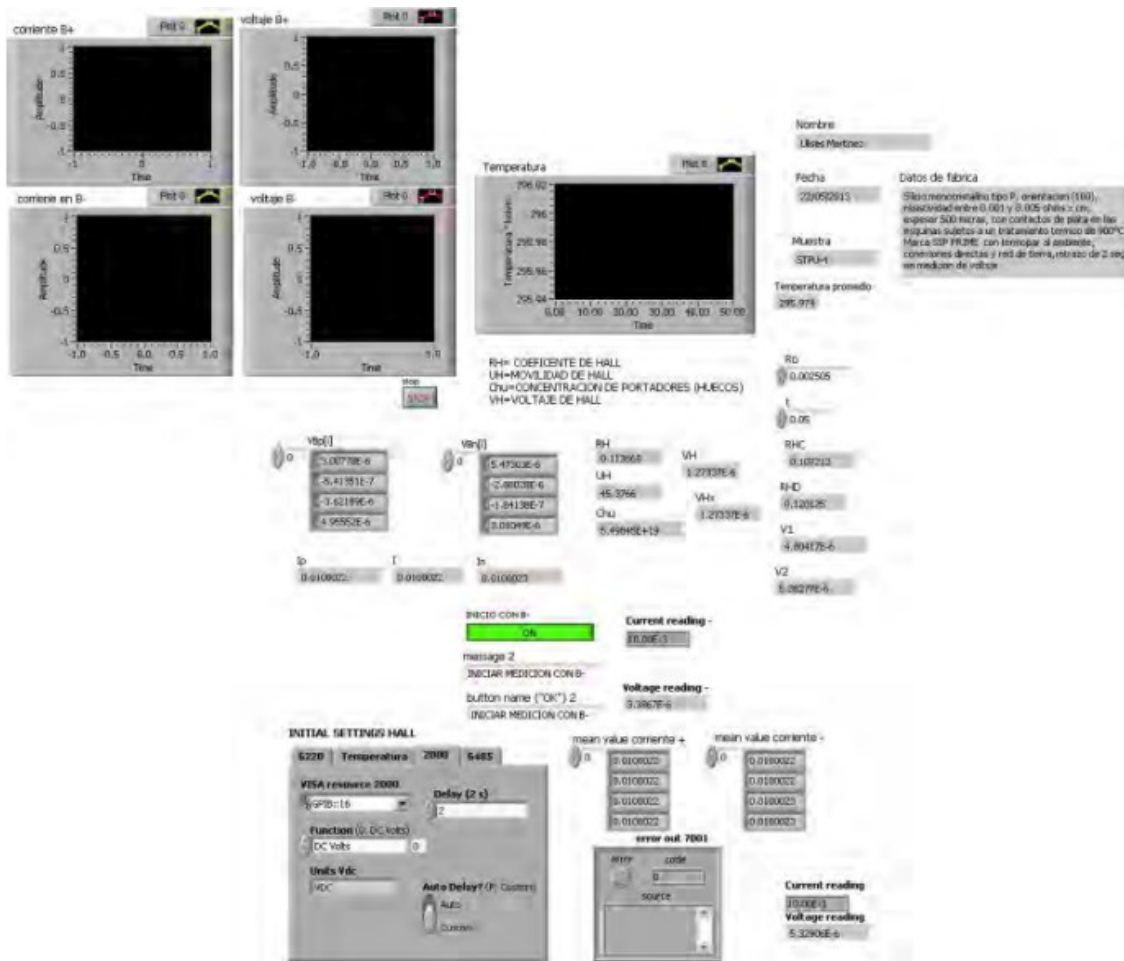


Figura 2.6: Programa de control en LabVIEW (9)

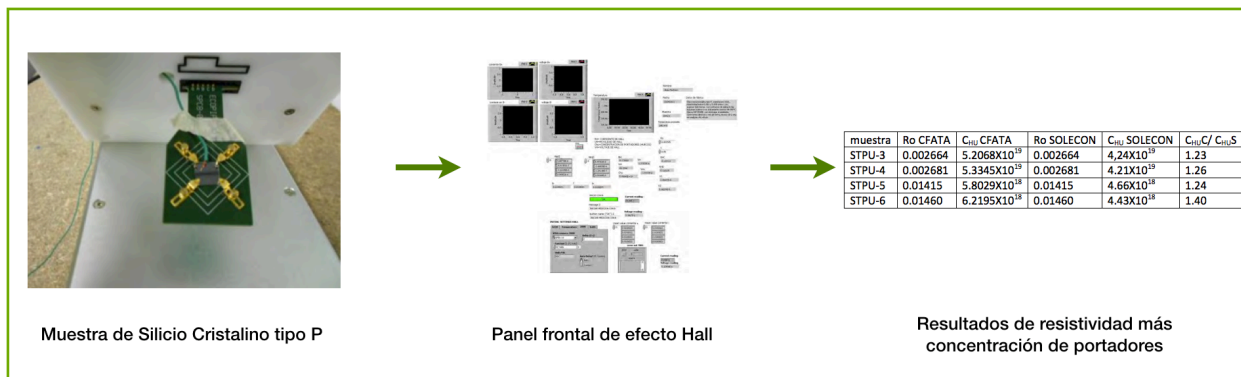


Figura 2.7: Modelo Cibernético General del Sistema de medición Resistividad y Efecto Hall para semiconductores (9)

2.3 Discusión

Tabla 2.2: Comparativa entre los trabajos relacionados.

Características	Mesa Rodríguez et al	Vidal Salgado	Martínez Ascencio	Propuesta
Medición de resistividad por método Van Der Pauw	✓	✓	✓	✓
Uso del electroimán en la medición de efecto Hall		✓		✓
Desarrollo de un programa de control en LabVIEW		✓	✓	✓
Uso del sistema desarrollado para una aplicación real	✓			✓

En la Tabla [2.2](#) Se muestra una comparación entre los trabajos que fueron seleccionados.

A través de la medición de efecto Hall se puede medir la concentración de portadores y la movilidad de los portadores de carga, para llevar a cabo el cálculo se requiere de conocer la resistividad de la muestra. Una técnica muy conocida para medir la resistividad es el de Van Der Pauw, sin embargo, no es el único, por ejemplo, se puede medir por el método de 4 puntas, que en cuestión de implementación es más simple que el método de Van Der Pauw, pero como se observa en la Tabla [2.2](#), los trabajos relacionados usan la técnica de Van Der Pauw, al igual que nosotros. Esto se debe a que, aunque la técnica es más complicada se puede implementar con la configuración de contactos sobre la muestra para la medición de efecto Hall.

La técnica de efecto Hall requiere que la muestra se coloque dentro de un campo magnético, el campo magnético se puede obtener a través de un electroimán o por medio de un imán permanente. La gran diferencia entre ellos radica en la magnitud del campo que se puede alcanzar, por medio de un electroimán se pueden alcanzar campos magnéticos del orden de 1 Tesla mientras que con imanes permanentes el campo es del orden de algunas décimas de Tesla. Tanto en la propuesta de Vidal Salgado como en la nuestra se ocupa un electroimán con el se alcanzan campos de hasta 1 Tesla. Por otra parte, en el sistema que proponemos podemos cambiar el valor de campo magnético e incluso cambiar la polaridad desde la computadora.

Como se puede observar, en todos los trabajos se busca la automatización de la medición y el control por medio de LabVIEW, ya que esto simplifica el uso de los equipos por los usuarios. En nuestro trabajo se propone un programa de control que sea amigable con el usuario y fácil de operar. Por otra parte, los usuarios de estos sistemas con la información obtenida realizan análisis posteriores por lo que en nuestra propuesta, al igual que en la de Vidal Salgado, consideramos que el usuario pueda guardar su información en la computadora o en dispositivos extraíbles.

Finalmente, como se puede observar, nuestra propuesta considera los mismos elementos tomados en cuenta en otros trabajos además dado que este trabajo forma parte de los proyectos de investigadores de ESIME y ESFM que actualmente trabajan en materiales fotovoltaicos y celdas solares, nuestro sistema propuesto será utilizado para la caracterización experimental de materiales utilizados en celda so- lares, en particular óxido de estaño dopado con Flúor ($\text{SnO}_2:\text{F}$) que es un material utilizado como contacto transparente en celda solares.

Capítulo 3

Técnicas de medición del efecto Hall

3.1 Técnica de medición de efecto Hall

Cuando una partícula cargada entra a una región en la que se encuentra un campo magnético entonces sentirá una fuerza magnética que lo desvía de su trayectoria original. Si la partícula cargada es un electrón en movimiento dentro de un material entonces el electrón se desplazará hacia el extremo de la muestra. El efecto Hall se basa en este fenómeno y es muy utilizado en el campo de la caracterización de materiales.

Para explicar el efecto Hall consideremos que tenemos una muestra como la que se presenta en la Figura 3.1, la muestra tiene una longitud L , un ancho d y un espesor t . por dos extremos se hace pasar una corriente eléctrica I que fluye en la dirección positiva. Si la muestra se encuentra dentro de un campo magnético entonces los electrones sufrirán una fuerza magnética que los desviará de su dirección de movimiento original. Los electrones comenzarán a desplazarse a los extremos de la muestra como se representa en la Figura 3.1 por lo que se comenzará a acumular carga negativa en un extremo y por ende carga positiva en el otro extremo.

Esta acumulación de carga continuará hasta que el campo eléctrico transversal E_H , conocido como campo de Hall, generado por la acumulación de cargas en los extremos es de tal magnitud que cancela la fuerza magnética. En este punto las cargas dejan de moverse y se quedan acumuladas en los extremos de la muestra, esto crea una diferencia de potencial, llamado potencial de Hall V_H .

El valor del potencial V_H depende de la concentración de portadores dentro de la muestra n , del campo magnético B , de la corriente inyectada I y del espesor de la muestra t como se muestra en la Ecuación 3.1

$$V_H = \frac{B * I}{q * t * n} \quad (3.1)$$

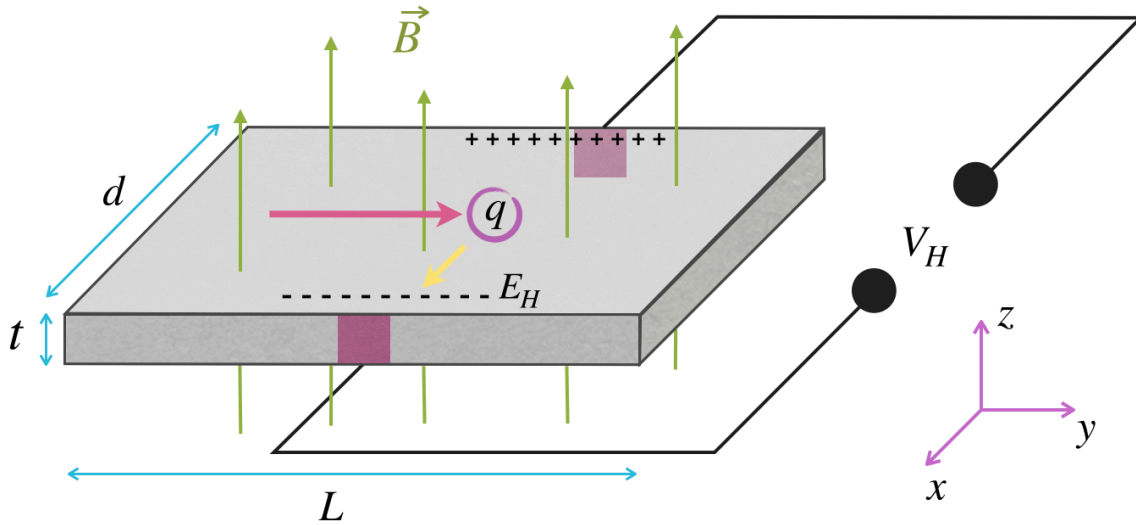


Figura 3.1: Muestra de observación del efecto Hall en la caracterización de materiales

Como se puede observar la técnica de efecto Hall consiste básicamente en hacer circular una corriente por dos contactos y medir el voltaje en otros dos contactos como se muestra en la Figura 3.2 Este voltaje es el resultado del desplazamiento de las cargas por efecto del campo magnético.

En la técnica de efecto Hall se define un parámetro que depende solo de las variables que se miden en un experimento del efecto Hall, es decir, del espesor de la muestra, del voltaje de Hall, del campo magnético y de la corriente.

El coeficiente de Hall se define como:

$$R_H = \frac{tV_H}{BI} \quad (3.2)$$

Para medir el voltaje de Hall se puede utilizar una geometría de cuatro contactos como se muestra en la Figura 3.3 donde los contactos se colocan en los vértices de la muestra que usualmente es cuadrada o rectangular.

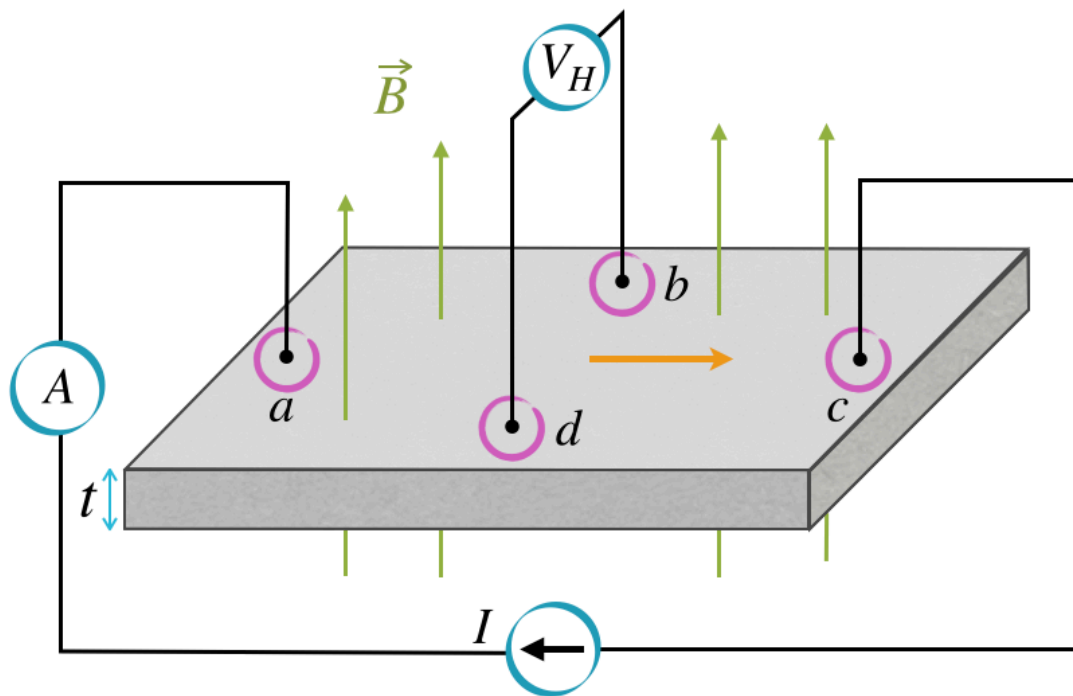


Figura 3.2: Técnica de medición del efecto Hall

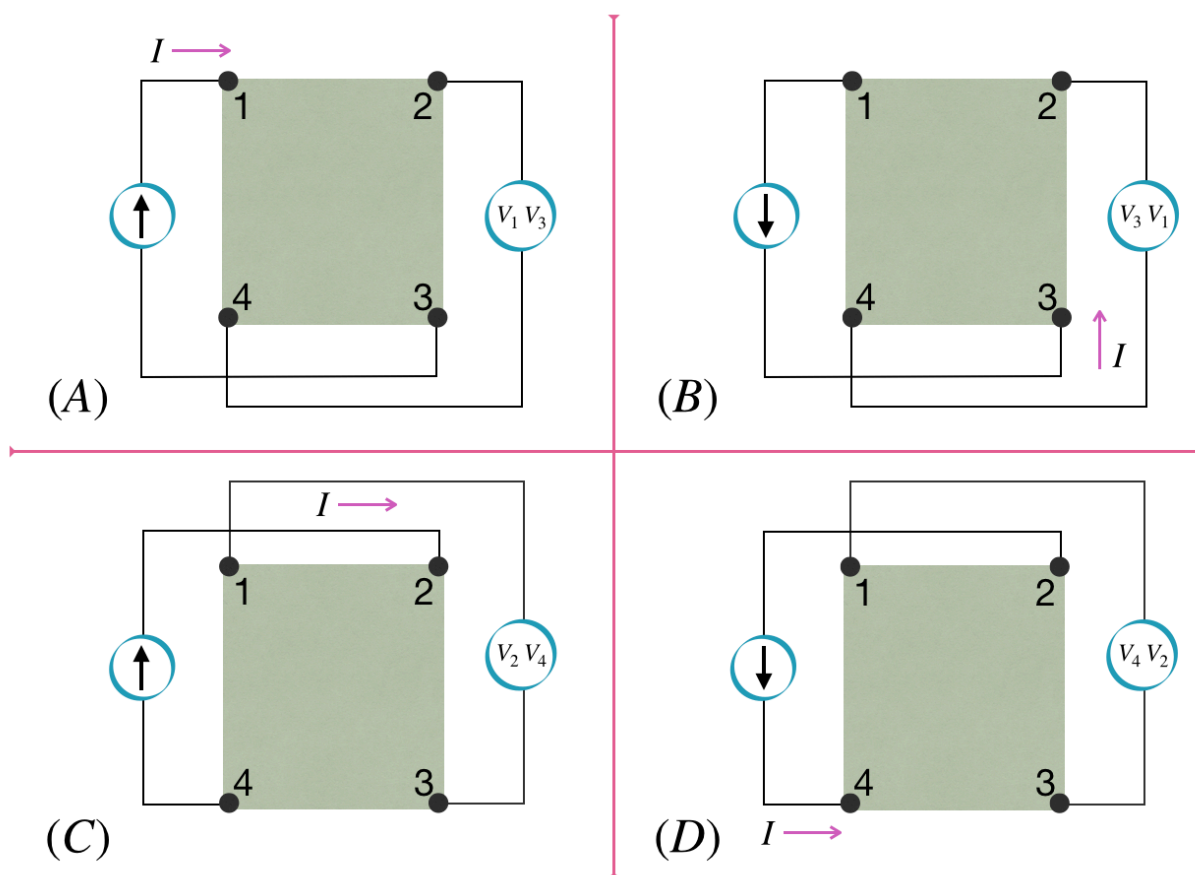


Figura 3.3: Medición de voltaje de Hall

La corriente fluye entre los contactos 1 y 3 mientras que el voltaje Hall es medido entre los contactos 2 y 4. Existe una norma para llevar a cabo esta medición, La American Society for Testing and Materials (ASTM) en su estándar número F76 llamado “Measuring Resistivity and Hall Coefficient and Determining Hall Mobility in Single Crystal Semiconductor se establece que se deben hacer ocho mediciones, en donde por dos contactos circule la corriente y en los otros dos restantes se este midiendo el voltaje en la muestra, la mitad con el campo magnético en una dirección y la otra parte con el campo en dirección contraria.

En la Figura 3.3 se muestra la forma en la que se realiza la conexión y en la Tabla 3.1 se muestra la forma en la que se deben realizar las conexiones eléctricas.

Tabla 3.1: Convección de mediciones para la medición de los 8 voltajes de Hall

Medición de Voltaje	Flujo de Campo Magnético	Corriente aplicada entre	Voltaje medido entre
V_1	+B	1,3	4,2
V_2	+B	3,1	4,2
V_3	+B	2,4	1,3
V_4	+B	4,2	1,3
V_5	-B	1,3	4,2
V_6	-B	3,1	4,2
V_7	-B	2,4	1,3
V_8	-B	4,2	1,3

Con estas ocho mediciones se determinan dos coeficientes de Hall RHC y RHD mostradas en las Ecuación 3.3 y Ecuación 3.4 que se deben comparar entre sí.

$$R_{HC} = \frac{2.5 \times 10^7 * t}{B * I} (V_2 - V_1 + V_5 - V_6) \quad (3.3)$$

$$R_{HD} = \frac{2.5 \times 10^7 * t}{B * I} (V_4 - V_3 + V_7 - V_8) \quad (3.4)$$

Si la muestra es completamente uniforme estos dos valores son iguales, pero si difieren en más del 10% entre ellos entonces la muestra no es uniforme y la medición no debería llevarse a cabo. En caso de estar dentro del rango el coeficiente de Hall promedio se define como la Ecuación 3.5

$$R_{Havg} = \frac{R_{HC} + R_{HD}}{2} \quad (3.5)$$

Aquí los coeficientes Hall se expresan en cm^3/C , el espesor t en centímetros, el campo magnético B en Gauss, la corriente I en Amperes y los voltajes V_i en Volts. Con el coeficiente de Hall promedio se puede medir la concentración de portadores y la movilidad de Hall con las Ecuación 3.6 y Ecuación 3.7.

$$n = \frac{1}{q * R_{Havg}} \quad (3.6)$$

$$\mu_H = \frac{|R_{Havg}|}{\rho} \quad (3.7)$$

Donde ρ es la resistividad del material expresada en $\Omega * cm$, la concentración de portadores en cm^{-3} y la movilidad de Hall en $\frac{cm^2}{V * s}$.

La concentración de portadores nos indica el número de cargas por unidad de volumen en un material, que para un semiconductor tipo n hace referencia al número de electrones libres dentro del material por unidad de volumen mientras que para un semiconductor tipo p hace referencia a la cantidad de huecos, es decir la ausencia de un electrón o portadores de carga positivos por unidad de volumen.

Por otra parte, la movilidad es un parámetro que hace referencia a la respuesta que tienen los portadores de carga bajo la aplicación de un campo eléctrico aplicado \vec{y} que resulta en el movimiento de los portadores por acción de la fuerza eléctrica ($\vec{F} = q\vec{E}$).

Cuando la movilidad es muy grande en un semiconductor, entonces éste se podría ocupar para aplicaciones de respuesta rápida. Por lo tanto, es un parámetro que es de mucho interés para los científicos y tecnólogos que trabajan con materiales semiconductores.

Como se puede apreciar por medio de la técnica de efecto Hall se pueden obtener dos parámetros eléctricos que caracterizan un material: su concentración de portadores y su movilidad. Por lo tanto, la medición de efecto Hall se lleva a cabo de manera rutinaria en laboratorios donde se desarrollan películas semiconductoras.

3.2 Medición de la resistividad por la técnica Van Der Pauw

La resistividad es una propiedad del material cuantificable a la oposición del material ante un flujo de corriente, se enfoca en un punto dentro del material, y esta siempre será la misma sin importar la cantidad que contenga. Lo que se desea definir dentro de una muestra es la densidad de corriente en el material resistivo causado por la inducción de un campo eléctrico.

Para la determinación de la movilidad de Hall se requiere conocer la resistividad de la muestra que se desea caracterizar. La resistividad de un material se puede determinar por un método desarrollado por Van Der Pauw en 1958. Este método es uno de los métodos más utilizados para medir la resistividad de un material de espesor t . La medición consiste en colocar cuatro contactos sobre una muestra como se representa en la Figura 3.4. Se hace pasar corriente por dos contactos y se mide la diferencia de potencial por otros dos restantes. Con esta información se calcula la resistencia

$$R_{12,34} = \frac{V_{34}}{I_{12}} \quad (3.8)$$

$R_{12,34}$ se calcula cuando la corriente entra por el contacto 1 y sale por el 2 y se mide la diferencia de potencial entre los contactos 3 y 4.

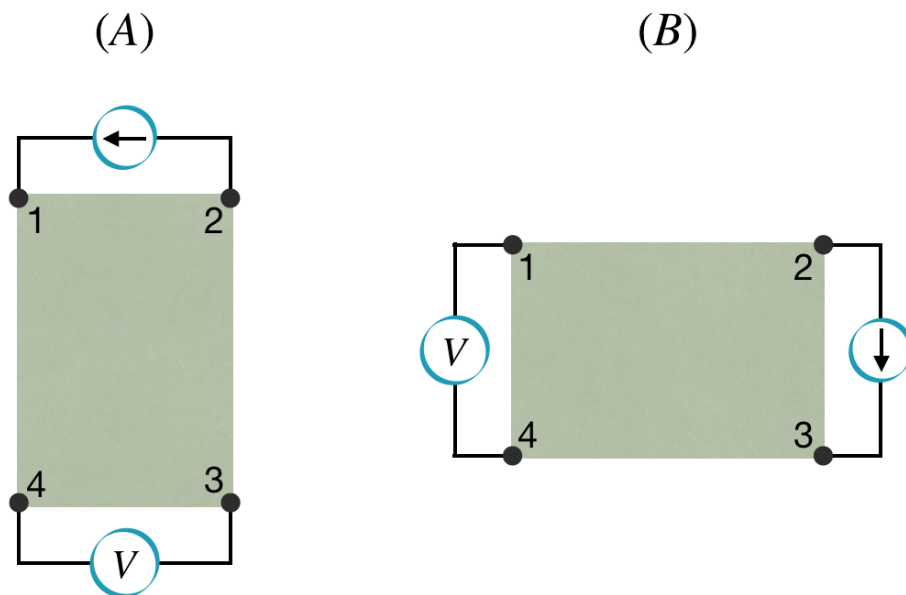


Figura 3.4: Resistividad por el método de Van Der Pauw

También puede medirse la resistencia

$$R_{21,34} = \frac{V_{34}}{I_{12}} \quad (3.9)$$

el cual debería ser igual al negativo de $R_{12,34}$. Otras dos resistencias que se miden son:

$$R_{32,41} = \frac{V_{41}}{I_{32}} \quad (3.10)$$

$$R_{23,41} = \frac{V_{41}}{I_{23}} \quad (3.11)$$

Con las resistencias 8, 9, 10 y 11 se puede obtener un promedio de la resistividad

$$\rho_A = \frac{\pi * t}{4 * \ln 2} (R_{12,34} - R_{21,34} + R_{32,41} - R_{23,41}) \quad (3.12)$$

Como todas las corrientes son iguales esta expresión se puede reescribir como

$$\rho_A = \frac{\pi * t}{4 * \ln 2 * I} (V_{12,34} - V_{21,34} + V_{32,41} - V_{23,41}) \quad (3.13)$$

Dónde I es la corriente. Al hacer el cálculo de $\frac{\pi}{4 * \ln 2}$ obtenemos:

$$\rho_A = \frac{1.133 * t}{I} (V_{12,34} - V_{21,34} + V_{32,41} - V_{23,41}) \quad (3.14)$$

Se puede llevar a cabo otras cuatro resistencias similares a las anteriores con las que se puede calcular otra resistividad

$$\rho_B = \frac{1.133 * t}{I} (V_{43,12} - V_{34,12} + V_{14,23} - V_{41,23}) \quad (3.15)$$

Si ρ_A no esta dentro del 10 % del valor de ρ_B entonces la muestra no es homogénea y la muestra deber ser cambiada por otra más uniforme.

En el caso de estar en el rango de similitud se define la resistividad promedio

$$\rho_{prom} = \frac{\rho_A + \rho_B}{2} \quad (3.16)$$

Cuya unidad es de $\Omega * \text{cm}$

Es necesario agregar un factor de corrección debido a la geometría quizá los contactos no están completamente colocados en los vértices de la muestra, mostrado en la Figura 3.5. Así la Ecuación 3.14 y Ecuación 3.15 se transforman en:

$$\rho_A = \frac{1.133 * t}{I} (V_{12,34} - V_{21,34} + V_{32,41} - V_{23,41}) * f_A \quad (3.17)$$

$$\rho_B = \frac{1.133 * t}{I} (V_{43,12} - V_{34,12} + V_{14,23} - V_{41,23}) * f_B \quad (3.18)$$

Donde f_A es una función de un parámetro Q_A a través de la ecuación

$$\frac{Q - 1}{Q + 1} - \frac{f}{0.693} \operatorname{arccosh} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{0.693}{f} \right) \right\} \quad (3.19)$$

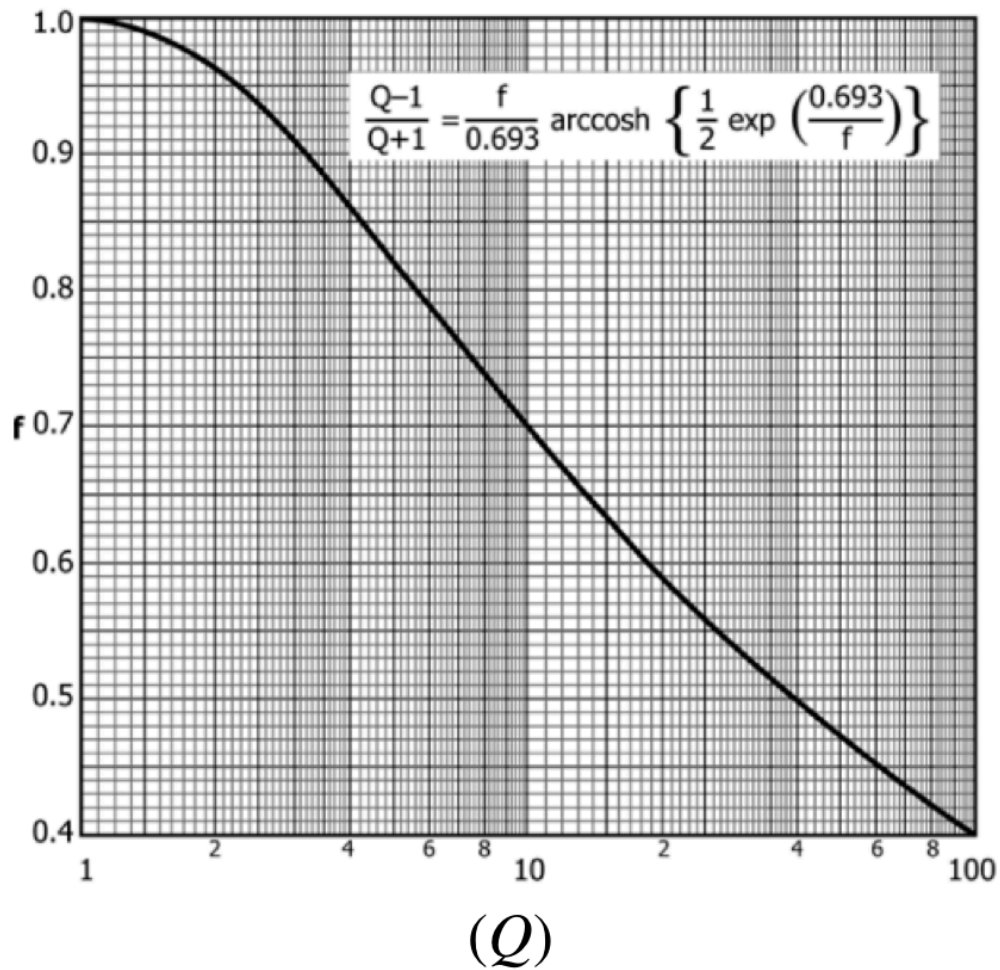


Figura 3.5: Gráfica del factor de corrección en f para el calculo de la resistividad (18)

Que solo se puede resolver numéricamente. Entonces para trabajar con los factores de corrección se resuelve la ecuación numéricamente y se obtiene una tabla de valores.

$$Q_A = \frac{R_{21,34} - R_{12,34}}{R_{32,41} - R_{23,41}} = \frac{V_{21,34} - V_{12,34}}{V_{32,41} - V_{23,41}} \quad (3.20)$$

$$Q_A = \frac{R_{43,12} - R_{34,12}}{R_{14,23} - R_{41,23}} = \frac{V_{43,12} - V_{34,12}}{V_{14,23} - V_{41,23}} \quad (3.21)$$

En la Figura 3.6 se muestra el esquema de medición de los ocho voltajes para el cálculo de la resistividad, como se puede observar estas mediciones son laterales mientras que las del efecto Hall son transversales, sin embargo, la instrumentación es similar como se mostrará en la sección 3.3 ubicada en la Página 33. Por tal motivo, cuando se hace una medición de efecto Hall es muy común medir la resistividad por el método de Van Der Pauw.

Finalmente, con la medición del coeficiente de Hall promedio por medio del efecto Hall y de la resistividad promedio a través del método Van Der Pauw es posible calcular la concentración de portadores n , la movilidad de los portadores de carga μ y la resistividad del material.

$$n = \frac{1}{q * R_{Havg}} \quad (3.22)$$

$$\mu_H = \frac{|R_{Havg}|}{\rho} \quad (3.23)$$

$$\rho_A = \frac{1.133 * t}{I} (V_{12,34} - V_{21,34} + V_{32,41} - V_{23,41}) * f_A \quad (3.24)$$

$$\rho_B = \frac{1.133 * t}{I} (V_{43,12} - V_{34,12} + V_{14,23} - V_{41,23}) * f_B \quad (3.25)$$

$$\rho_{prom} = \frac{\rho_A + \rho_B}{2} \quad (3.26)$$

Con lo que se puede caracterizar eléctricamente cualquier material que sea sometido a estas dos mediciones.

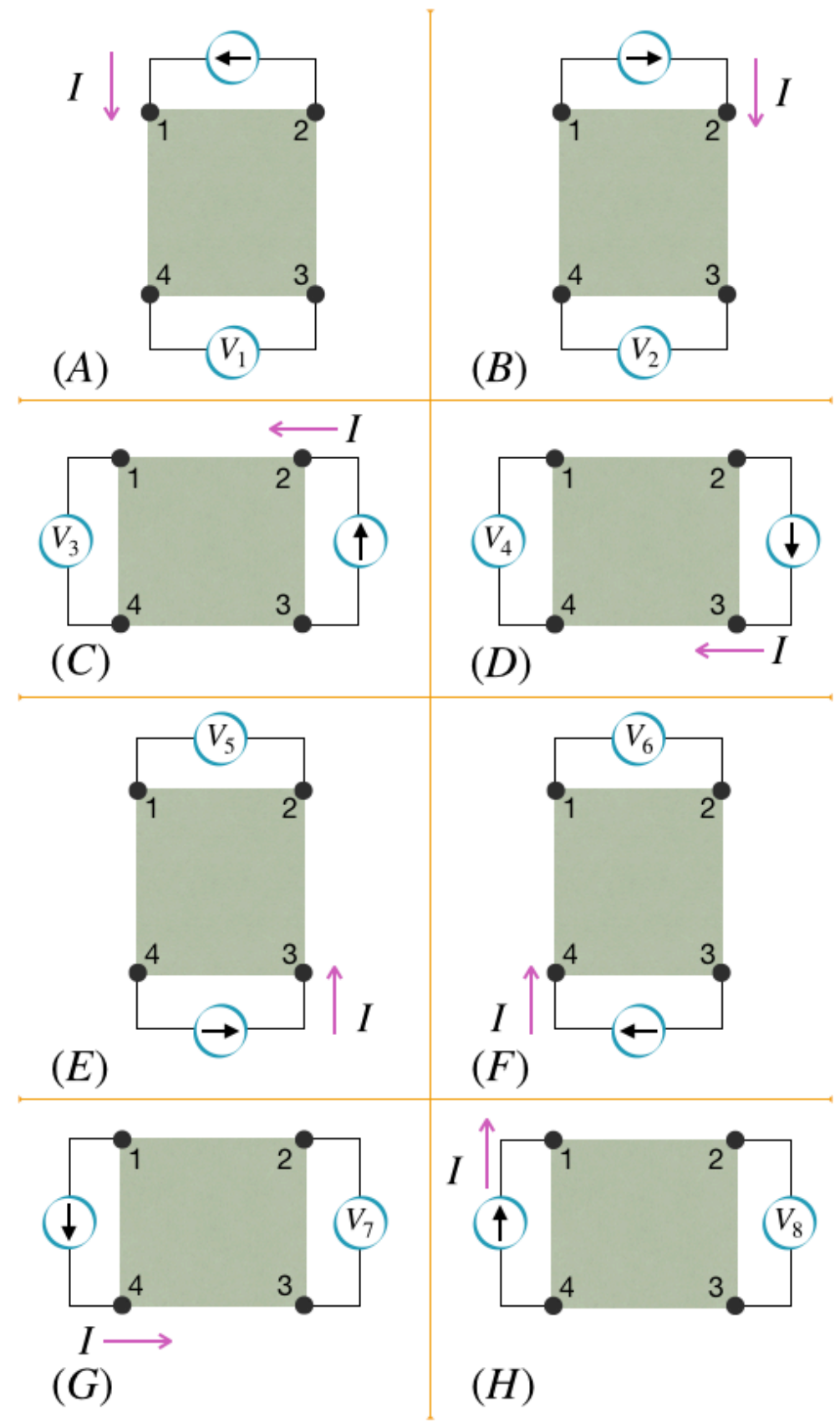


Figura 3.6: Convección de mediciones de voltajes en el método de Van Der Pauw

3.3 Instrumentación en la técnica de efecto Hall

La instrumentación en la técnica de efecto Hall es la integración de un conjunto de equipos de laboratorio interconectados mediante el bus GPIB IEEE 488 a una tarjeta de control GPIB de NI.

Se menciona cada uno de los equipos que integran el Sistema de Caracterización Eléctrica de Materiales por efecto Hall, la especificación de cada uno de ellos, integración completa y la conmutación para la medición del voltaje de Hall.

3.3.1 Equipo electrónico para la caracterización mediante el Efecto Hall

Campo Magnético

Un campo magnético es un campo de fuerza que se crea por el movimiento de cargas eléctricas. Cuando a un electroimán se le induce un campo magnético pasa a través de cada uno de sus polos y sus líneas van en el orden hacia polo norte y polo sur.

El campo magnético será generado a través de un electroimán dipolo modelo 3473 marca GMW Associates, el cual tiene un diámetro de cara de hasta 150 mm, se encuentra equipado con un par de bobinas de 50A con un espacio entre bobinas de 127 mm, cuenta con una resistencia mínima de 0.72Ω y una máxima 0.78Ω .

El electroimán 3473 tiene una inductancia de baja corriente 0.8H, una inductancia de alta corriente de 0.54H, como potencia máxima continua en aire 20A, 17V (0.5kW), en potencia máxima continua en agua 50A, 44V (2.2kW) 70A.59V (4.1kW) y con capacidad de hasta 1T. (19)

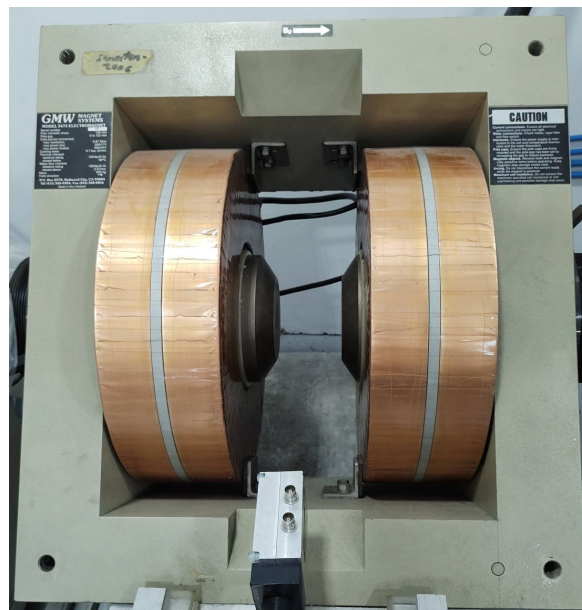


Figura 3.7: Electroimán 3473 GMW Associates generador del Campo Magnético.

Fuente de corriente para el electroimán

Una fuente de corriente es aquella que induce una corriente eléctrica fija a una carga. La corriente es generada mediante una fuente de corriente de la marca Kepco modelo MAT55-20. Esta fuente puede otorgar de 0 55V , 0 20A de corriente continua y 1100W . (20)

La operación de esta fuente de corriente es a través de un control de la marca Kepco modelo TMA4882-27.

Los TMA de Kepco son controladores que suministran energía para controlar, programar y monitorear la salida de hasta 27 módulos. En el caso del controlador Kepco TMA 4882-27 recibe comandos y transmite datos a una computadora a través de comunicación GPIB IEEE 488.2 o bien mediante un enlace de comunicaciones en serie usando RS 232. Este controlador monitorea continuamente el estado de cada módulo de potencia para verificar la corrección de la corriente programada, sobre corriente, sobre tensión, sobre temperatura, palanca, pérdida de potencia y otras condiciones de falla. En el caso de ocurrir un cambio en las condiciones de configuración normales o adecuadas genera un error informando a través de un bus de comunicaciones.(21)



Figura 3.8: Fuente de corriente Kepco modelo MAT55-20



Figura 3.9: Controlador Kepco modelo TMA 4882-27

Suministro de corriente para la muestra

Para proveer la corriente a la muestra, se hará uso de una fuente de corriente programable Keithley modelo 220 marca tektronix, este equipo cuenta con un rango de 1nA 100mA, cuenta con un cumplimiento de voltaje de selección de hasta 105V en incremento de 1 voltio, tiene 100 ubicaciones de memoria las cuales permiten hasta 100 puntos de almacenamiento para fuente de programación con voltaje limitado.

El modelo 220 puede utilizarse con cualquier sistema que utilice GPIB IEEE 488. (22)



Figura 3.10: Fuente de Corriente Keithley modelo 220 marca tektronix, proveedor de la corriente en la muestra.

Medición de corriente en la muestra

Para la medición de corriente en la muestra, se hará uso de un electrómetro ampérmetro Keithley modelo 6517 B marca tektronix, este modelo cuenta con una corriente baja, un amplificador de entrada con una corriente de polarización de entrada de $< 3f$ A con solo ruido de $0.75f$ A pico a pico y una carga de $< 20\mu V$ en el rango más bajo. Maneja una impedancia de entrada para las medidas de resistencia y voltaje de $200TW$ para una carga de circuito casi ideal.

En sus rangos de medición se encuentra: voltaje 10μ a $200V$, corriente de $1f$ A a $20mA$, resistencia de $50W$ a $1016W$ y en medidas de carga de $10f$ C a $2\mu C$. Este equipo es controlable mediante computadora a través de comunicación GPIB IEEE 488. (23)



Figura 3.11: Electrómetro Keithley modelo 6517B marca tektronix, medirá la corriente en la muestra.

Medición de voltaje en la muestra

Para la medición del voltaje, se hará uso de un multímetro Keithley modelo 2000 marca tektronix, en modo Voltmetro. Este equipo cuenta con una impedancia de entrada de $1\text{MS}\Omega$ 2% en paralelo por 100pF , protección de entrada de 1000V p, DVC máximo 400V en cualquier rango de ACV, resistencia de desvío de 0.192 en los rangos de ACI y Volt Hertz $s8 \times 10^7 \text{v Hz}$.

Cuenta con amplios rangos de medición con especificaciones de precisión superior: voltaje CC de 100nV a 1kV , resistencia de CC 100μ a 100 a $100\text{M}\Omega$ y en medidas de carga de 10fC a $2\mu\text{C}$. Este equipo es controlable mediante computadora a través de comunicación GPIB IEEE 488. (24)



Figura 3.12: Multímetro Keithley modelo 2000 marca tektronix

Conmutación

Para realizar la medición en los voltajes V1 a V8 mostrado en la Figura 3.6, se ocupa un sistema de conmutación Keithley modelo 7001 marca tektronix, este equipo tiene capacidad de conmutación de CC de nanovoltios a 1100V y f A a 5A, compatibilidad con conmutadores ópticos y de RF. Su control de escaneo incorporado anula la necesidad de que la PC controle cada paso de la conmutación hacia la muestra. Este equipo es controlable mediante computadora a través de comunicación GPIB IEEE 488. (25)

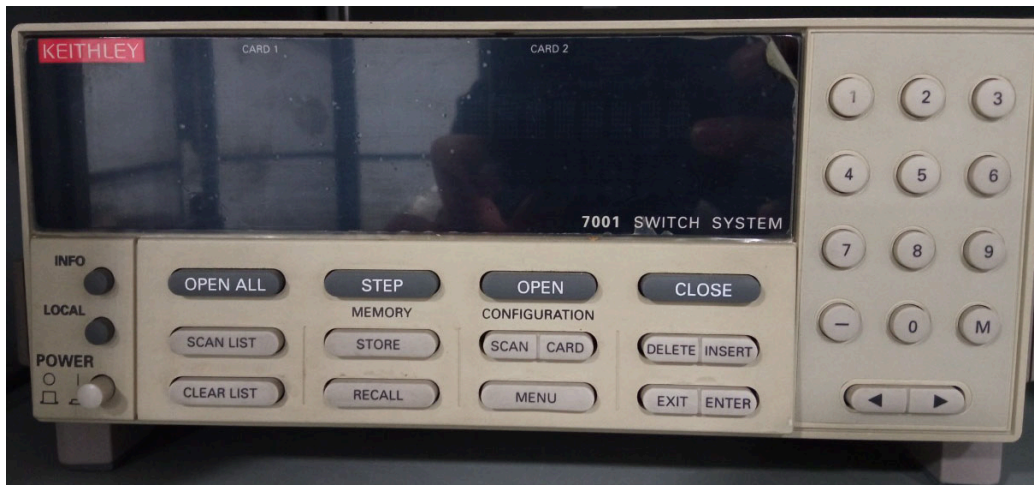


Figura 3.13: Sistema de conmutación Keithley modelo 7001 marca tektronix

Una tarjeta de efecto Hall 7065, es una tarjeta de acondicionamiento de señales diseñada para almacenar en un buffer las señales de prueba de la muestra de Hall a la medición y cambio de corriente de la muestra. Esta tarjeta proporciona la capacidad de conmutación para la medición de voltajes de Hall bajos como 50nV y resistencias superiores a 1012 Ω . Esta tarjeta es controlable mediante computadora a través de comunicación GPIB IEEE 488. (26)



Figura 3.14: Tarjeta de efecto Hall Keithley modelo 7065 marca tektronix

3.3.2 Integración de equipos

Los equipos que conforman el Sistema de Caracterización Eléctrica de Materiales por Efecto Hall son controlados mediante interfaz GPIB 488, todos nuestros equipos se conectan a la tarjeta GPIB de NI y esta a su vez se comunica con la PC.

En conjunto estos equipos de laboratorio de manera controlada a través del Sistema de Caracterización de Materiales realizado en lenguaje de programación gráfica en LabVIEW, mediremos el voltaje de Hall.

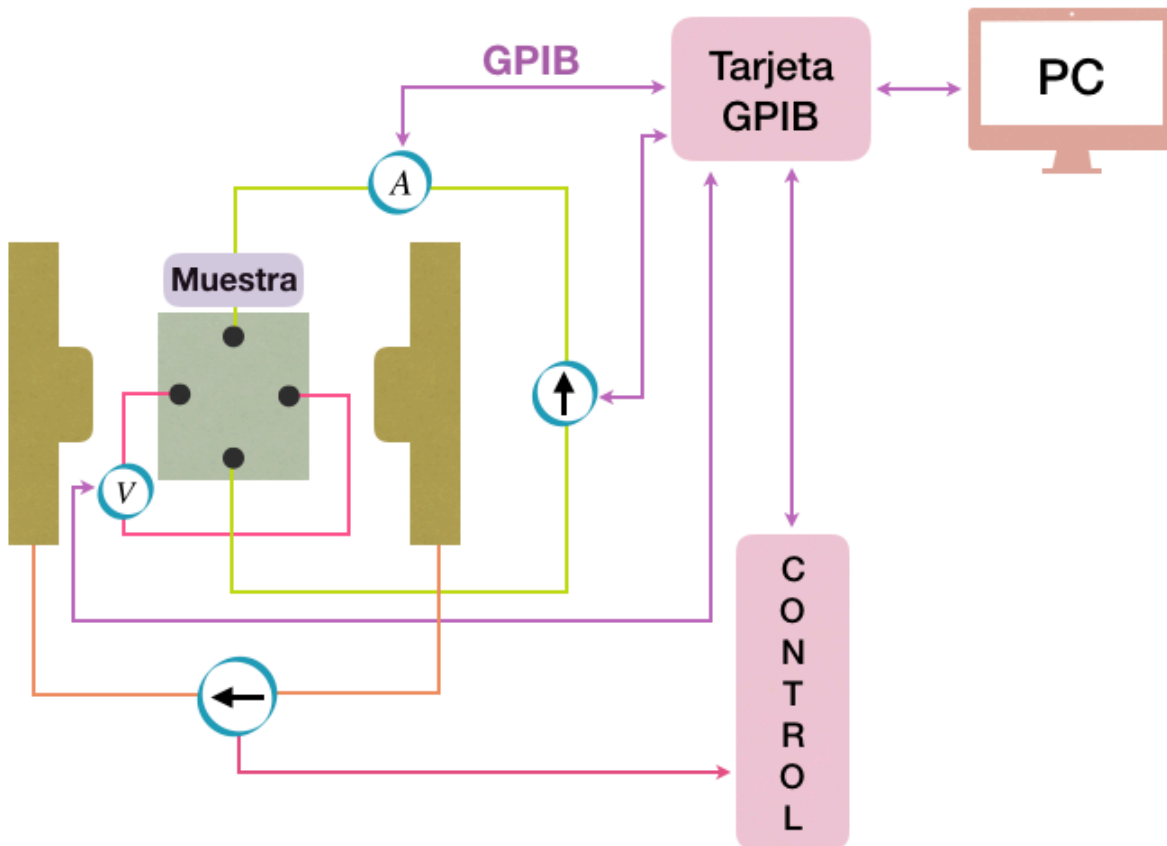


Figura 3.15: Esquema General de integración de equipos del Sistema de Caracterización Eléctrica de Materiales por efecto Hall

En la Figura 3.15, se muestra un esquema en el cual podemos observar la colocación de la muestra dentro de un electroimán, nuestra muestra cuenta con cuatro contactos en dos de ellos se pasará y se medirá la corriente, en los otros dos restantes se medirá el voltaje.

Nuestra fuente de corriente es programable y controlada desde la computadora indicando cuanta corriente ingresará, de igual manera se hará la lectura del amperímetro. En el caso de nuestros electroimanes tendremos una fuente de corriente con un control, que de igual manera será conectado a la tarjeta GPIB.

Todos los equipos que conforman la caracterización eléctrica de materiales mediante el efecto Hall conectados se ven como en la Figura 3.16, donde observamos los equipos de laboratorio como lo es el Electrómetro modelo 6517 B Keithley, la fuente de corriente modelo 220 Keithley, la muestra, el multímetro modelo 2000 Keithley, conectados en conjunto a la tarjeta de efecto Hall 7065.

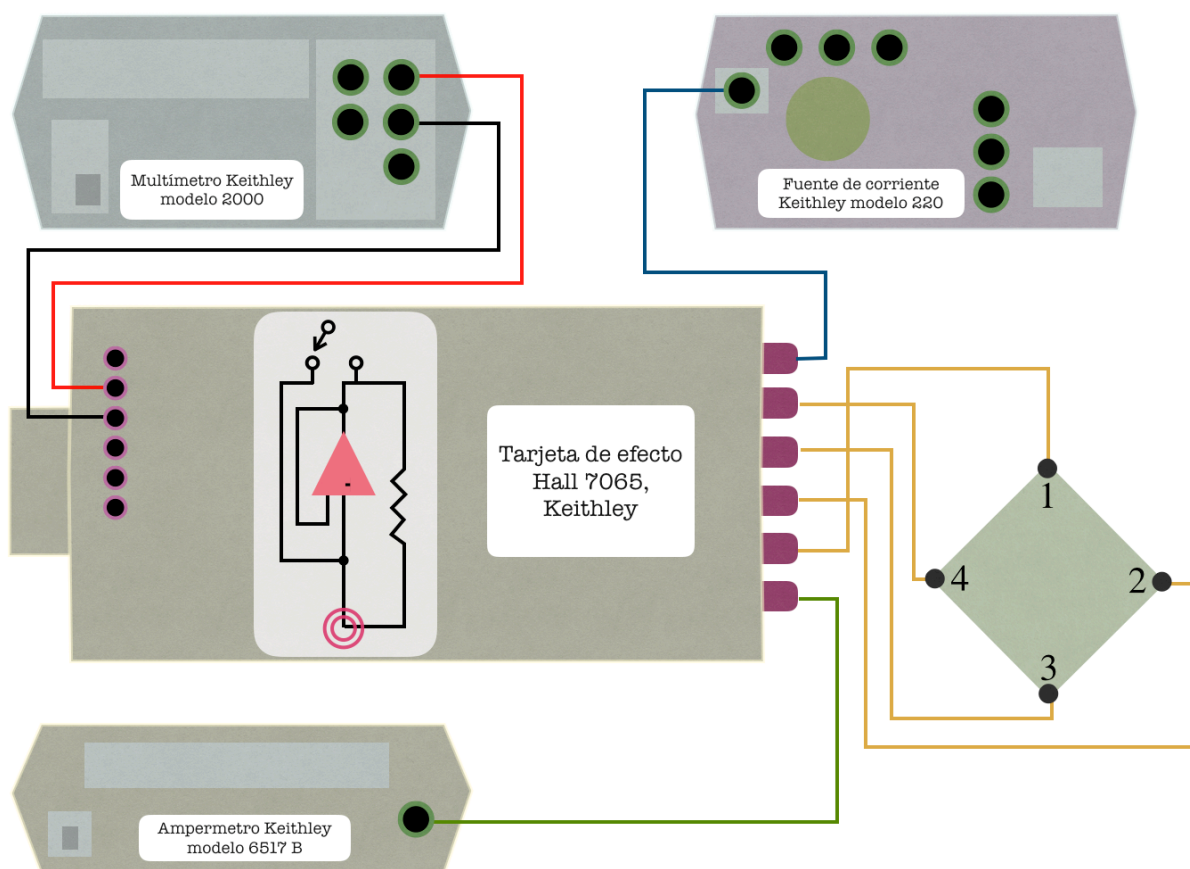


Figura 3.16: Integración de equipos del *efecto Hall*

Para obtener una medición más precisa se realizan 8 mediciones y se toma el promedio de estas, esta conmutación es realizada mediante la tarjeta de efecto Hall modelo 7065 Keithley y el sistema de conmutación 7001 Keithley

En la Figura 3.17, se muestra el esquema de conmutación, en la parte inferior derecha podemos observar la conexión del ampérmetro la fuente de corriente y la muestra con sus cuatro contactos. Por otro lado en la parte inferior derecha observamos el Voltmetro 2000. Estas ocho mediciones son realizadas representado en la Figura 3.6.

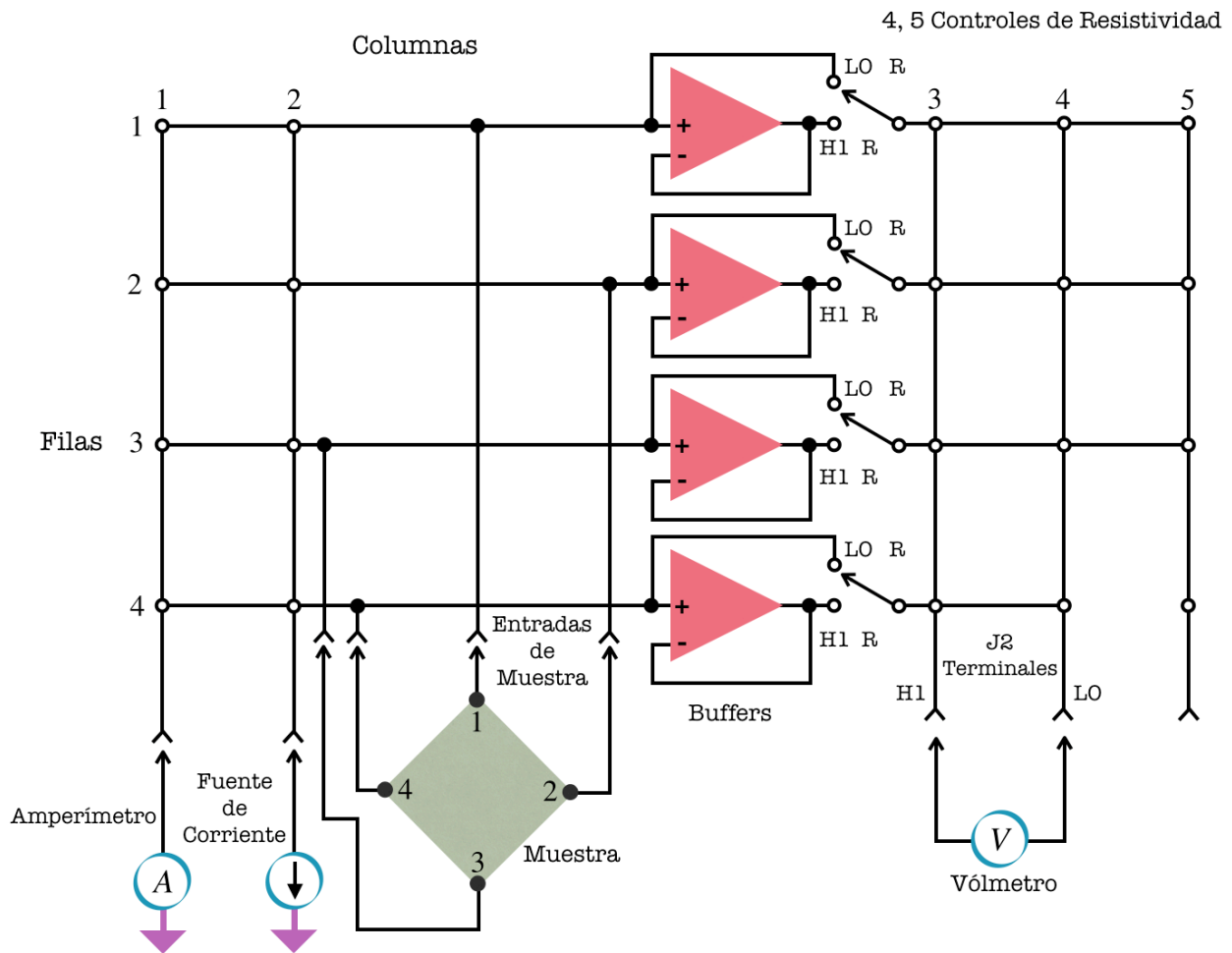


Figura 3.17: Esquema de conmutación para la obtención de voltajes de Hall (26)

En la Tabla 3.2 se muestran las mediciones que se realizan entre las filas y columnas para los ocho voltajes, de manera fija observamos que los contactos 1, 2, 3 y 4 de la muestra están colocados de una manera fija.

Tabla 3.2: Mediciones

Designación	Campo Magnético	Puntos de cruce entre columna y fila				Corriente aplicada entre	Voltaje medido entre
V_1	+B	2,1	1,3	3,4	4,2	1,3	4,2
V_2	+B	2,3	1,1	3,4	4,2	3,1	4,2
V_3	+B	2,2	1,4	3,1	4,3	2,4	1,3
V_4	+B	2,4	1,2	3,1	4,3	4,2	1,3
V_5	-B	2,1	1,3	3,4	4,2	1,3	4,2
V_6	-B	2,3	1,1	3,4	4,2	3,1	4,2
V_7	-B	2,2	1,4	3,1	4,3	2,4	1,3
V_8	-B	2,4	1,2	3,1	4,3	4,2	1,3

Como ejemplo: en V_1 con campo magnético positivo, para pasar corriente que entre por el contacto 1 y salga por el contacto 3. Se tiene que unir la fila 1 con la columna 2, se usa la columna 2 porque es la columna en la que se encuentra la fuente de corriente.

Por otro lado en la columna 1 se encuentra el sensor de corriente ampérmetro, es conveniente que el contacto 3 continúe el recorrido por la columna 1 y termine su recorrido con tierra, para ello se tiene que unir la fila 3 con la columna 1. Es decir 2,1 y 1,3.

Para medir el voltaje, tenemos que hacer una conexión con el Voltmetro con dos terminales, la terminal positiva en la columna 3 y la terminal postnegativa en la columna 4. Para esta medición tenemos que unir la fila 4 con la comuna 3 y unir la fila 2 con la columna 4, es decir 3,4 y 4,2.

Una vez ingresada la conmutación hasta V_4 se realizarán las mismas conmutaciones pero con campo magnético negativo. El código formado mediante esta conmutación es programado en la tarjeta de efecto Hall.

3.4 LabVIEW

3.4.1 Introducción

Ante una producción en masa en la industria que es altamente automatizada, con condiciones de prueba cada vez más complejas se requiere una instrumentación de prueba con funciones más potentes, sistemas flexibles y costos más bajos.

La transición de tecnología analógica a tecnología digital y de un instrumento a un conjunto de instrumentos funcionales con una implementación de hardware sobre las funciones de los mismos. Surge la composición de hardware y software, partiendo de una combinación de funciones a una plataforma virtual de propósito general con una computadora como núcleo. La transición de los modelos de hardware a los paquetes de software, representan una dirección de un desarrollo futuro de los instrumentos de prueba electrónicos.

Actualmente la tecnología de programación de instrumentos virtuales y la tecnología avanzada de bus de computadora son utilizados en el campo de tecnología de prueba e instrumentos incluida la tecnología de bus de alta velocidad VXI, PXI, USB, IEEE 1394, tecnología de medición basada en red, entre otras.

En el mercado existen varias opciones para simulación de diseños de comunicación como MATLAB o C y a pesar de que estas herramientas son sumamente eficientes, LabVIEW engloba a ambos.

LabVIEW se convirtió en el estándar de la industria para lenguajes de programación gráfica desarrollado para obtener datos con el uso de un sistema de adquisición de datos en instrumentos de laboratorio, es perfecto para la elaboración de un sistema de interfaces de comunicación en la medición de tipo instrumento, cuenta con facilidad de codificación, flexibilidad, una excelente visualización de datos e interfaz de usuario.

Su entorno gráfico con el que es manejado LabVIEW, es intuitivo, sencillo de comprender y aprender. Así mismo LabVIEW cuenta con un gran conjunto de herramientas para el procesamiento de señales sin la necesidad de una codificación en declaración de variables, asignación de memoria, sin compilación o datos integrados.

LabVIEW es un lenguaje de programación gráfico basado en diagramas de flujo, no solo define elementos básicos de lenguaje de programación, también proporciona una depuración de programas, configuración de puntos de interrupción, sondeo de datos y depuración de un solo paso. (27) (28) (29)

3.4.2 Interfaz GPIB

El módulo GPIB fue inventado por Hewlett-Packard Corporation en 1974 para la simplificación de la interconexión en instrumentos de prueba con computadoras, finalmente el bus GPIB fue adoptado formalmente como IEEE STD 488 en 1978.

En la Figura 3.18 se muestra el concepto de la IEEE 488 de controladores y dispositivos. Utiliza un cable estándar para la interconexión de varios instrumentos a la computadora, cada instrumento tiene su propia interfaz electrónica y un conjunto estándar de respuesta a los comandos. Los controladores tienen la capacidad de transmitir datos al bus, escuchar los datos de los dispositivos y enviar comandos.

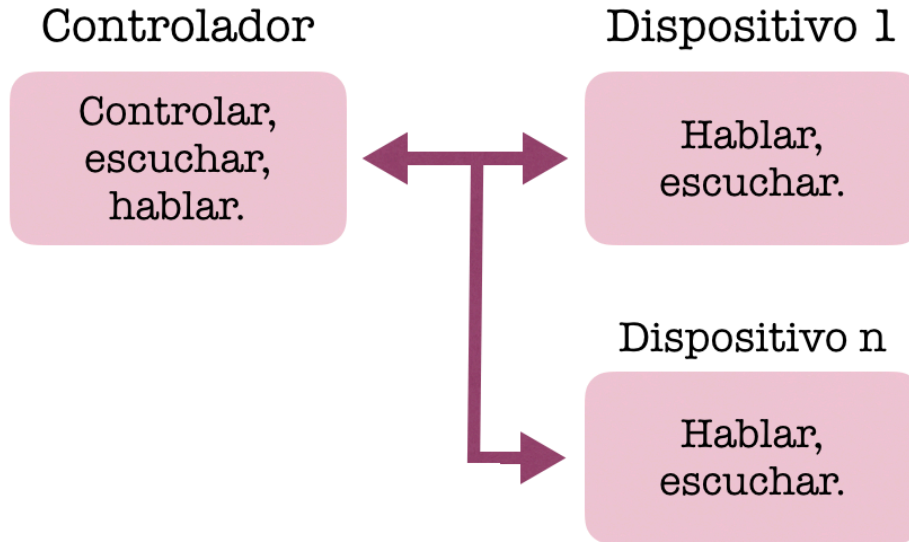


Figura 3.18: Modelo de interfaz GPIB (28)

Cada uno de los dispositivos tiene 30 direcciones principales entre 0 y 30, y la dirección 31 la cual es para no escuchar o bien no hablar. A pesar de estas 31 direcciones principales, los controladores IEEE 488 solo pueden tener el control de 14 dispositivos físicos estos pueden configurarse para hablar o escuchar. El módulo de adquisición y control de datos GPIB proporciona señales analógicas y digitales en el control de un dispositivo. (28) (29)

Capítulo 4

Sistema de Caracterización Eléctrica de Materiales por efecto Hall

En el Capítulo 3, se desarrolla el fundamento físico y matemático del efecto Hall además de presentar el equipamiento con el que se cuenta en el Instituto Politécnico Nacional. En este capítulo se muestra la metodología para caracterizar eléctricamente una muestra semiconductor. Se hace una descripción de la forma en la que se realiza la caracterización y su implementación en el programa de control de LabVIEW.

El primer paso es el diseño y construcción del Portamuestras donde se coloca la muestra. En la Figura 4.1 se muestra una imagen del Portamuestras considerado. Se tienen cuatro puntas bañadas en oro que tienen un resorte colocadas en un cuadro de 1cm x 1cm que permite presionar a la muestra y formar los cuatro contactos necesarios para la medición de efecto Hall. Cada punta esta conectada a un cable de tipo BNC que se conecta directamente a la tarjeta de efecto Hall 7065.

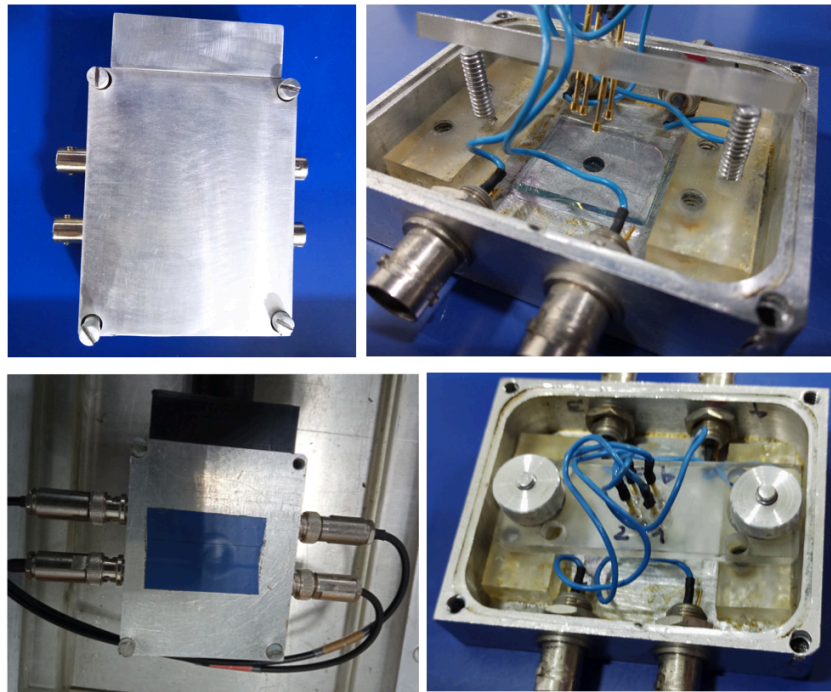


Figura 4.1: Portamuestras

Una vez que la muestra esta fijada dentro del Portamuestras es colocada entre los polos del electroimán por medio de un brazo plástico como se muestra en la Figura 4.2.

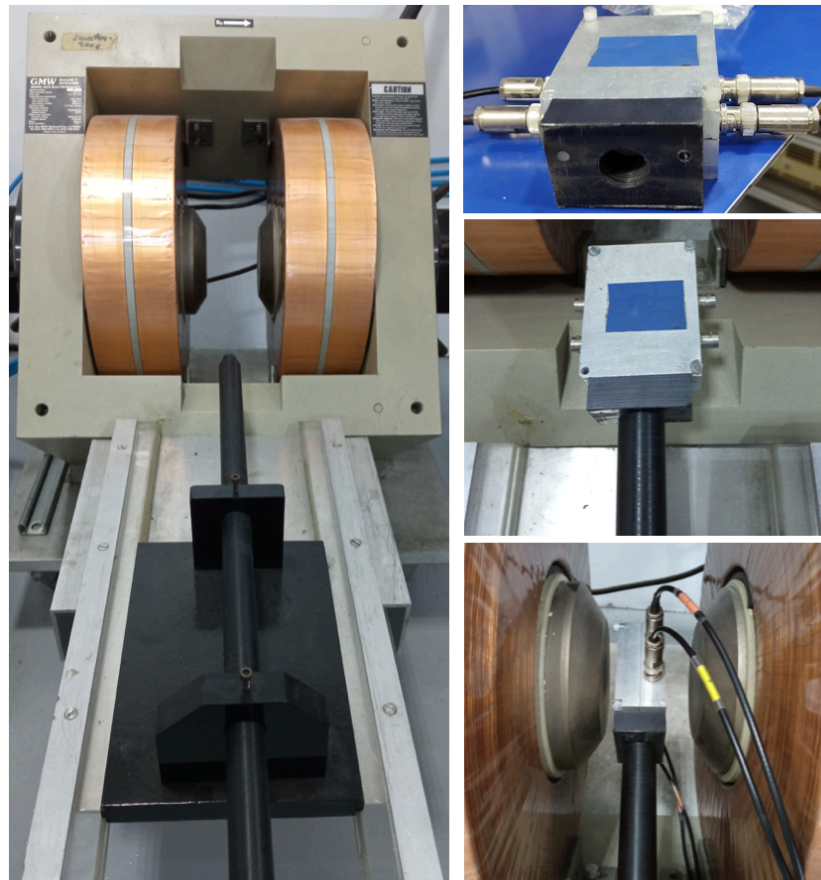


Figura 4.2: Detalle del Portamuestras y del brazo que permite colocarlo en el campo magnético

Antes de iniciar la medición el usuario u operador debe indicar las entradas principales como el espesor de la muestra y las características que necesita para realizar su medición, es decir, la corriente que se introduzca a la muestra con la unidad de corriente deseada (nA, μ A o mA), el valor del campo magnético establecido en mT y por último la condición de medición si es de baja resistividad o alta resistividad. Esta última condición es necesaria indicarla pues para muestras de alta resistividad la tarjeta de efecto Hall 7065 cuenta con un sistema de amplificadores operacionales en configuración de seguidor para evitar problemas de impedancia.

Otras entradas son las direcciones asignadas a cada equipo: El sistema de conmutación modelo 7001, el control de las fuentes de corriente para el electroimán, el voltímetro modelo 2000 y la fuente de corriente modelo 220. Estas direcciones se fijan en cada equipo y se pueden modificar de manera manual.

En la Figura 4.3 se muestra un Modelo Cibernético General del Sistema de Caracterización Eléctrica de Materiales por efecto Hall, dónde se indican las entradas principales del sistema y las salidas: la resistividad de la muestra semiconductora, la densidad de portadores de carga n y la movilidad de Hall. Además, se tiene un indicador de error en caso de que durante la medición se presente un error de comunicación con los equipos se pueda visualizar los errores encontrados. Durante cada etapa de la medición se despliega un mensaje el indicador *Estado de la medición* que muestra las acciones que va realizando el programa, por ejemplo *Midiendo resistividad, midiendo voltajes de Hall, calculando parámetros eléctricos*, etc.

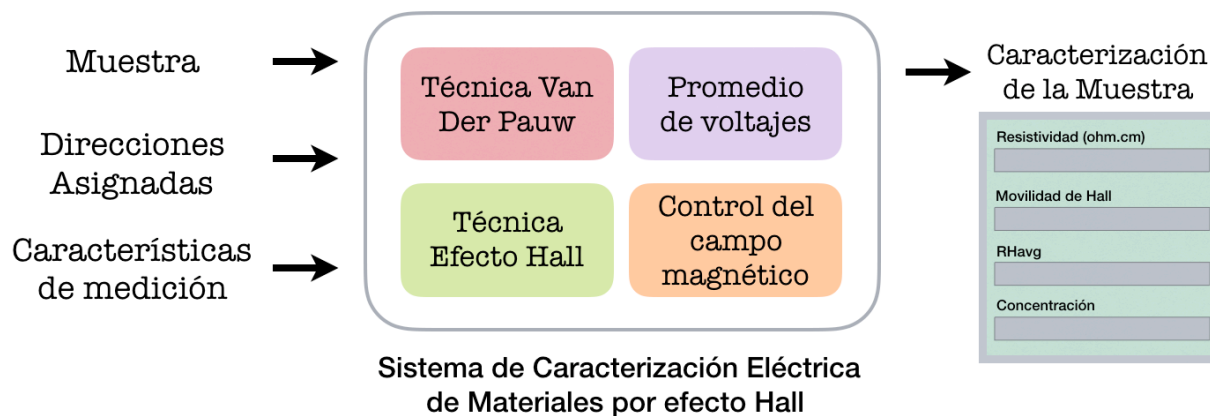


Figura 4.3: Modelo Cibernético General del Sistema de Caracterización Eléctrica de Materiales por Efecto Hall

En la Figura 4.4 el panel frontal del programa de control desarrollado en un lenguaje de programación gráfico LabVIEW, el programa es desarrollado en secuencias que sirven para que todo sea ejecutado en orden y paso a paso, es decir se empieza por la secuencia 0, continua con la secuencia 1 y así sucesivamente hasta la última secuencia. Dentro de este sistema encontraremos secuencias de mensajes y secuencias de ejecución de procesos.



Figura 4.4: Panel de Usuario del sistema desarrollado

4.1 Medición de la resistividad

La primera medición eléctrica que se realiza es la resistividad por medio de la técnica de Van Der Pauw descrita en la Sección 3.2. Para esta medición no se requiere de la aplicación de un campo magnético y el valor de la resistividad además de ser parte de la caracterización eléctrica del material semiconductor se requiere para el cálculo de la movilidad, véase en la Ecuación 3.7.

Las entradas de esta medición son la corriente que circulará por la muestra, el espesor y la condición de alta o baja resistividad. Como salida se tendrá el valor de la resistividad medida en $\Omega \cdot \text{cm}$. En la Figura 4.5 se muestra un Modelo Cibernético General de la medición de resistividad por el método de Van Der Pauw donde se indican las entradas y salidas de esta medición.



Figura 4.5: Modelo Cibernético General de la medición de resistividad por medio de la técnica de *Van Der Pauw*

La corriente I que selecciona el usuario se programa en la fuente de corriente modelo 220 de Keithley. En la Figura 3.6, se muestran las distintas configuraciones para medir ocho voltajes distintos con los que se puede calcular la resistividad ρ_A y ρ_B por medio de las Ecuaciones 3.16, 3.17 y 3.18. Para obtener cada uno de los voltajes V1 a V8, el equipo de conmutación modelo 7001 se programa de tal manera que la corriente pueda pasar por dos contactos y se mida el voltaje por los otros dos contactos.

Así, por ejemplo, para medir V_1 el equipo de conmutación es programado para pasar la corriente por los contactos 1 y 2, y que se mida el voltaje por los contactos 3 y 4 con el voltímetro modelo 2000.

Una vez que se tiene esa configuración la salida de la fuente de corriente modelo 220 es activada por lo que empieza a circular la corriente, posteriormente se mide el voltaje en las terminales 3 y 4.

Una vez ejecutada esta acción se desactiva la salida de la fuente de corriente y se procede a realizar las conexiones necesarias para medir V_2 , una vez que se tiene la nueva configuración se activa de nuevo la fuente de corriente y se repite el proceso. De esta manera se tienen los ocho voltajes mostrados en la Figura 3.6.

De acuerdo con las Ecuaciones 3.17 y 3.18 antes de realizar el cálculo de la resistividad con los voltajes medidos es necesario evaluar el factor de corrección tal y como se indica en las Ecuaciones 3.20 y 3.21 para Q_A y Q_B . El factor de corrección f se ha evaluado de manera numérica en función de los valores Q y se tiene almacenado en el programa un archivo con esta evaluación. Cuando se calculan los valores Q_A y Q_B son comparados con los valores de la tabla y por medio de interpolación se obtiene el factor de corrección para ρ_A y ρ_B .

Una vez que se han calculado las resistividades ρ_A y ρ_B se comparan entre ellas y si la diferencia entre ellas es mayor al 10% se despliega un mensaje al usuario que indica que la medición no es precisa porque la muestra no es homogénea o isotrópica. Aun así se realiza el promedio de ambas resistividades y se presenta la resistividad promedio.

En el caso de que ρ_A y ρ_B no tengan una diferencia mayor a 10% simplemente se calcula el valor promedio y se presenta el resultado al usuario. En la Figura 4.6 se muestra un diagrama de flujo que muestra los pasos en la medición de la resistividad.

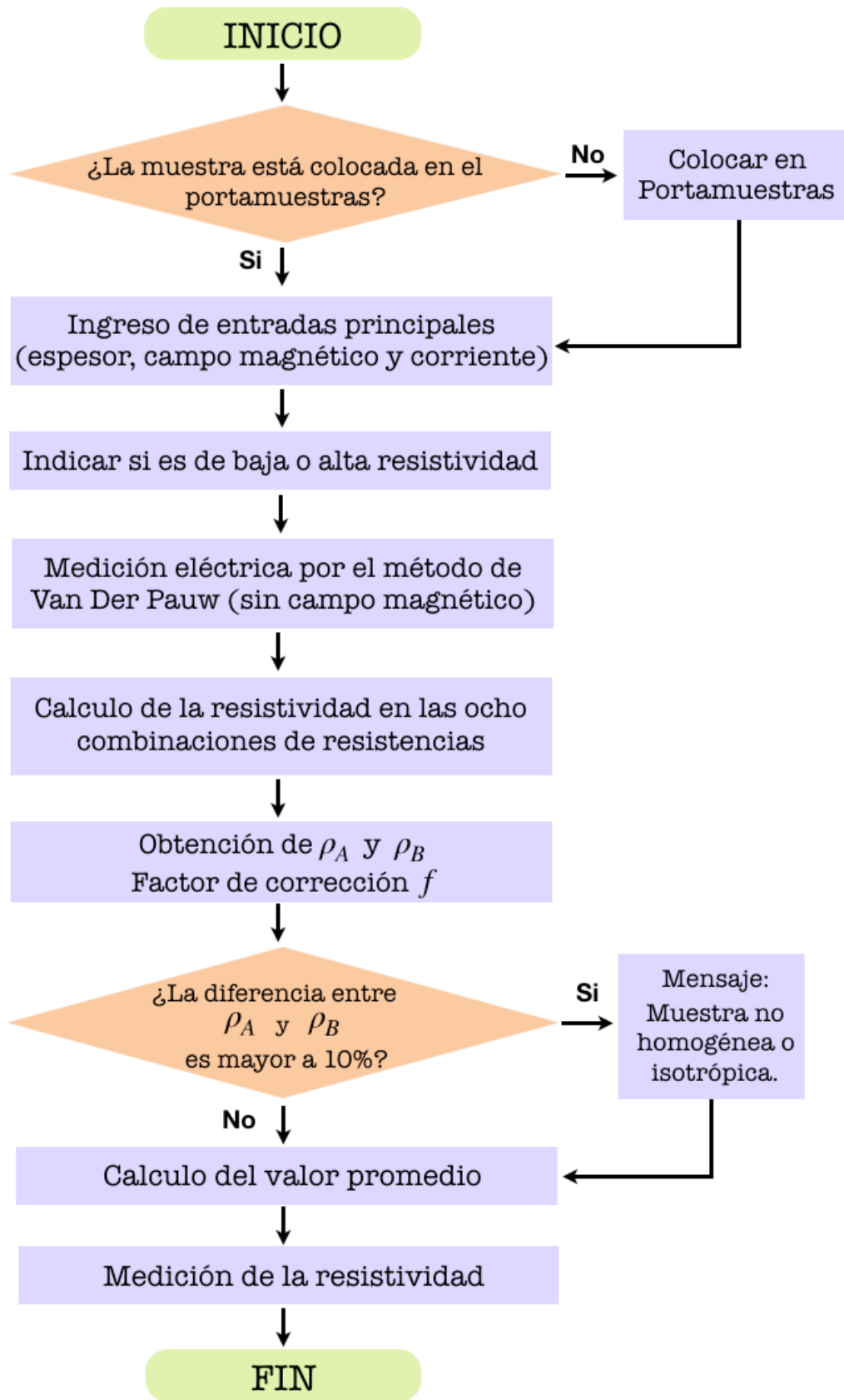


Figura 4.6: Diagrama de flujo de la medición de resistividad.

4.2 Control de campo magnético

Para realizar la medición de efecto Hall es necesario que la muestra se encuentre dentro de un campo magnético. Existen dos maneras de hacerlo: por medio de un imán permanente con un campo superior a 0.4T que se puede obtener de imanes de neodimio de gran tamaño y la segunda opción es utilizar un electroimán con la capacidad de producir un campo magnético superior a 0.4T . Se tiene un electroimán modelo 3473 GMW conectado a una fuente programable de corriente de hasta 20A con el que se pueden alcanzar campos entre los polos del imán.

La fuente programable tiene un control especial, el modelo de la marca con el que se pueden controlar varias fuentes de corriente para ser conectadas en paralelo. En la Figura 4.7 se muestra un esquema del equipamiento para producir el campo magnético.

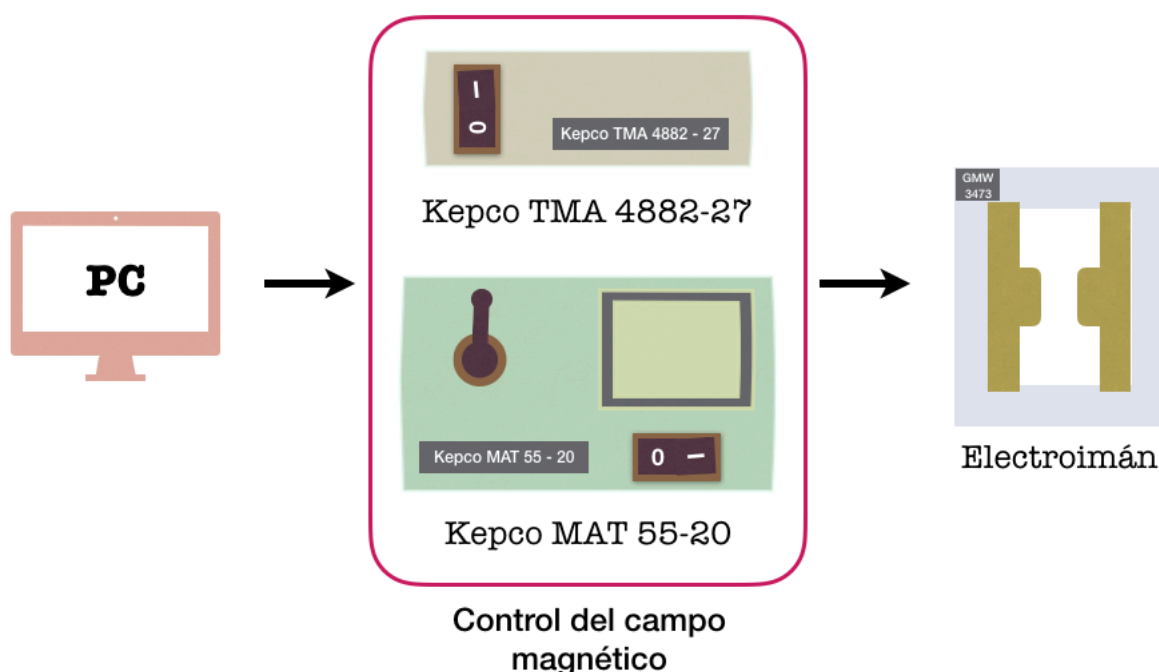


Figura 4.7: Equipo para la producción de campo magnético.

El usuario puede seleccionar un valor de campo de una lista desplegable. El valor mínimo que puede seleccionar es 40mT y el máximo y 681mT . Previamente se realiza una caracterización del campo medido entre los polos del electroimán para diferentes valores de corriente de la fuente modelo.

Cuando el usuario selecciona el valor del campo en el que desea realizar la medición en el panel frontal mostrado en la Figura 4.4 se accede a una tabla donde se encuentra el valor de corriente que se debe programar en la fuente de corriente para el valor de campo seleccionado. Para llegar a la corriente I_0 , es decir para obtener el campo magnético B_0 se realiza una rampa de corriente desde 0A hasta I_0 con una rapidez de 0.1A/s, esto permite que el campo magnético siempre sea estable entre los polos del electroimán.

Una vez que se alcanza la corriente I_0 , es decir el campo B_0 , se procede a realizar la medición de efecto Hall, que será explicado en la siguiente sección. Cuando se completa la medición entonces se programa la fuente de corriente para descender la corriente en el electroimán desde I_0 hasta cero con la misma rapidez de 0.1A/s.

La medición de efecto Hall requiere hacer cuatro mediciones de Voltaje de Hall con el campo magnético en una dirección y cuatro mediciones con el campo en dirección contraria por lo que dentro de la secuencia de programación se incrementa la corriente en electroimán hasta el valor I_0 , se realiza la medición de efecto Hall, la corriente se descende a 0, se programan corrientes negativas en la fuente hasta llegar a $-I_0$, se realiza la medición de efecto Hall, descende la corriente hasta llegar a 0. El Modelo Cibernético General para la generación de campo magnético describe este procedimiento, véase la Figura 4.8.

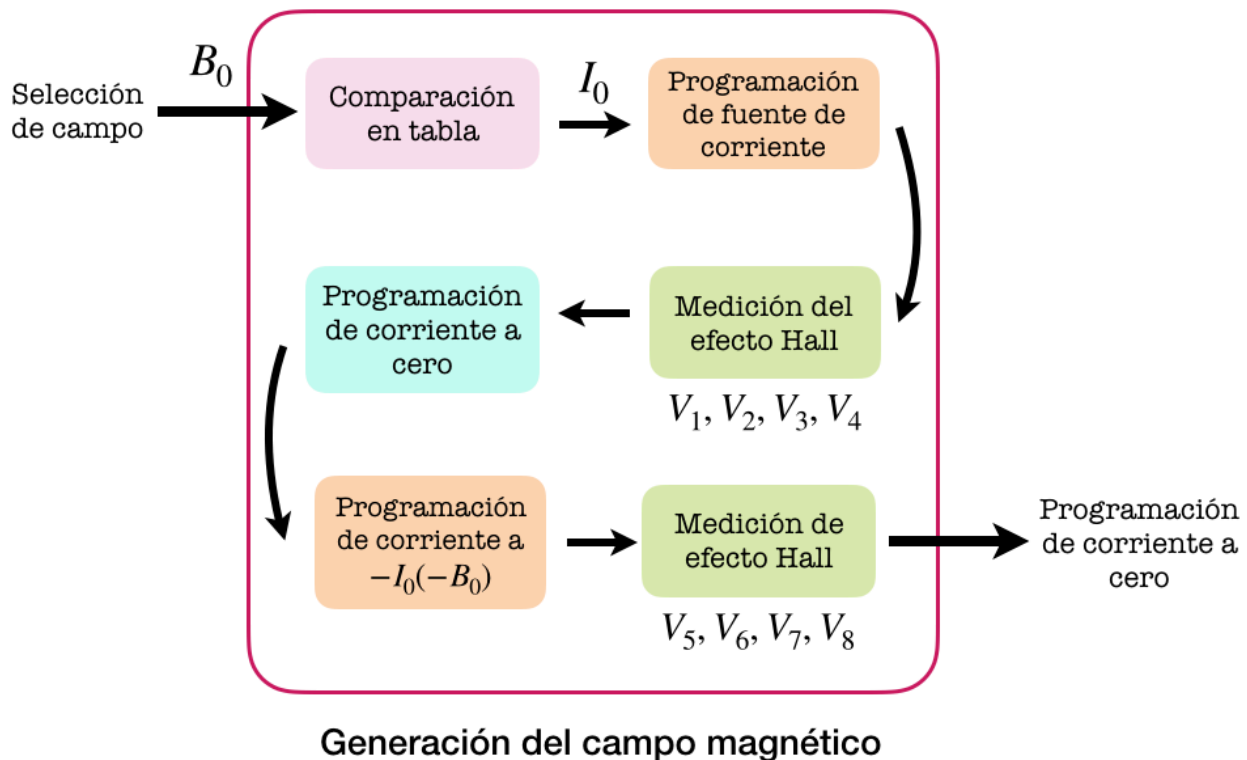


Figura 4.8: Modelo Cibernético General para la generación de campo magnético

4.3 Medición del efecto Hall

Para calcular la movilidad y densidad de portadores n , se implementa la medición de efecto Hall que como ya se discutió ampliamente en el Capítulo 3, consiste en pasar una corriente I por dos contactos de la muestra que se encuentra dentro de un campo magnético B y medir el voltaje que se produce en los otros dos contactos debido al efecto Hall.

Una vez que el usuario selecciona los parámetros de entrada, se mide la resistividad de la muestra plasmado en la sección 4.1 y se almacena en una variable, posteriormente se obtiene el valor de campo magnético seleccionado por el usuario. Una vez que se tiene el campo magnético se programa la fuente de corriente modelo 220 con el valor de corriente I , que es la misma que se utiliza para medir la resistividad. En la Figura 3.3 se muestran las distintas configuraciones que deben ser implementadas para medir los ocho voltajes de Hall, también en la Tabla 3.1 se muestra a manera de resumen las características de cada configuración.

El equipo de conmutación es programado para pasar corriente por dos contactos mientras se mide el voltaje entre los otros dos, por ejemplo, para medir V_1 de acuerdo con la Tabla 3.1 se debe aplicar corriente por medio de la fuente de corriente modelo 220 entre los contactos 1 y 3, y se mide la diferencia de potencial con el multímetro modelo 2000 entre los contactos 2 y 4 con el campo en la dirección positiva. Una vez que se tienen lista la conexión por medio del sistema de conmutación 7001 se activa la salida de la fuente de corriente y se mide el voltaje, cuando se termina la medición se desactiva la fuente de corriente y se programa el sistema de conmutación 7001 para realizar la medición de V_2 . Este proceso se repite para los voltajes de Hall V_1, V_2, V_3, V_4 . Posteriormente se cambia la dirección del campo magnético plasmado en la sección 4.2 y se miden los voltajes V_5, V_6, V_7, V_8 .

Por medio de las Ecuaciones 3.3 y 3.4 se calculan los coeficientes de Hall R_{HC} y R_{HD} , para este cálculo se requiere el espesor de la muestra, el campo magnético B y la corriente que circula la muestra I , estos tres últimos valores son parámetros de entrada seleccionados por el usuario.

Ya que se tienen los dos coeficientes de Hall deben ser comparados entre sí, si la diferencia entre ellos es mayor al 10% significa que la muestra no es homogénea ya que los cálculos pierden precisión y esto es notificado al usuario por medio de un mensaje, aún así, se calcula el valor de coeficiente de Hall promedio mostrado en la Ecuación 3.5.

En caso de que los coeficientes de Hall R_{HC} y R_{HD} estén dentro del margen del 10% no se le notifica al usuario y se realiza el cálculo del coeficiente Hall promedio.

Con el coeficiente de Hall promedio se calcula la concentración de portadores n y la movilidad de Hall con las Ecuaciones 3.6 y 3.7 respectivamente. Los resultados son desplegados en un recuadro en el panel frontal. En la Figura 4.9 se muestra un diagrama de flujo de la medición de efecto Hall y en la Figura 4.10 se encuentra el cálculo de los parámetros eléctricos de la muestra que son mostrados al usuario.

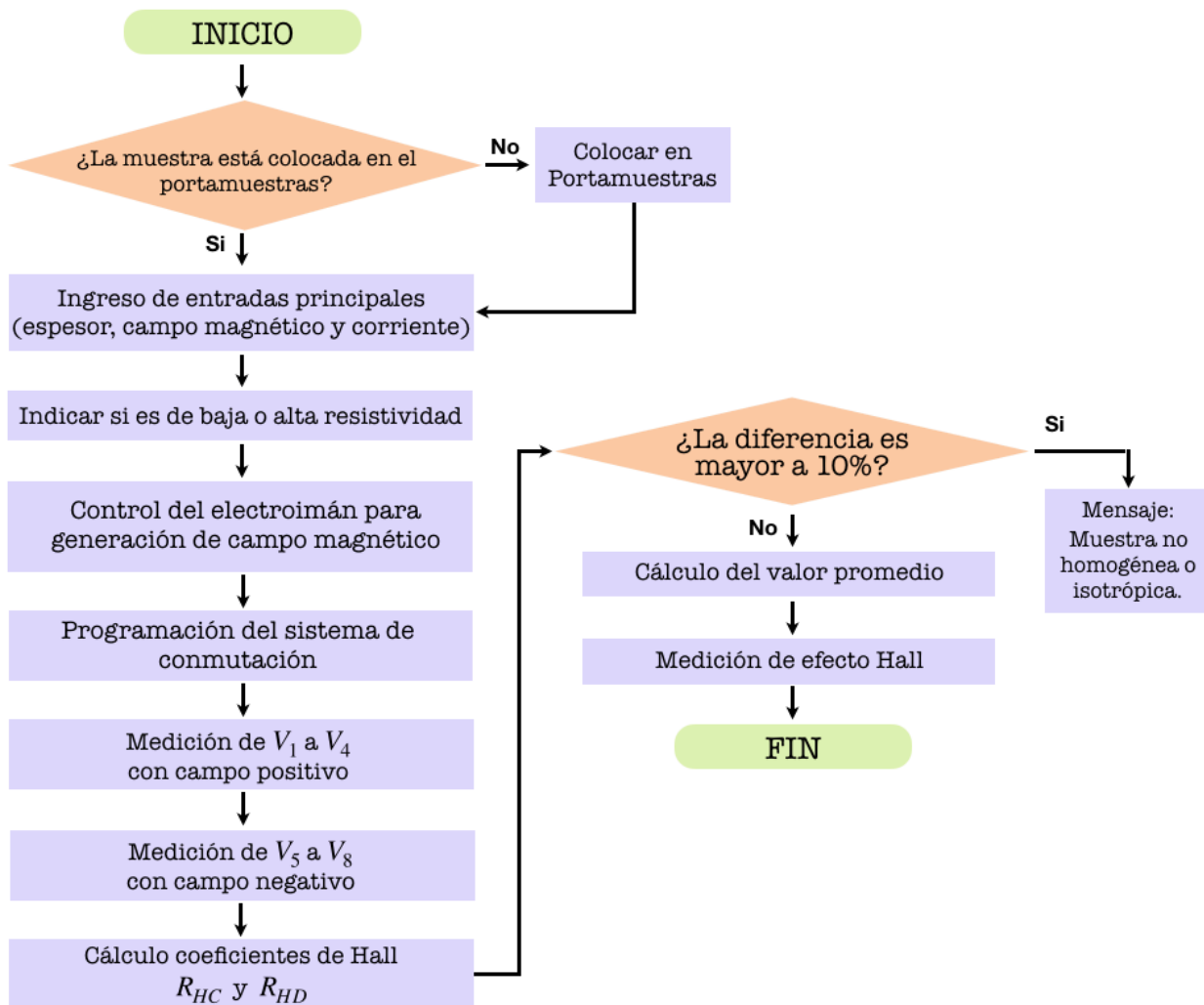


Figura 4.9: Diagrama de flujo de la medición de efecto Hall.

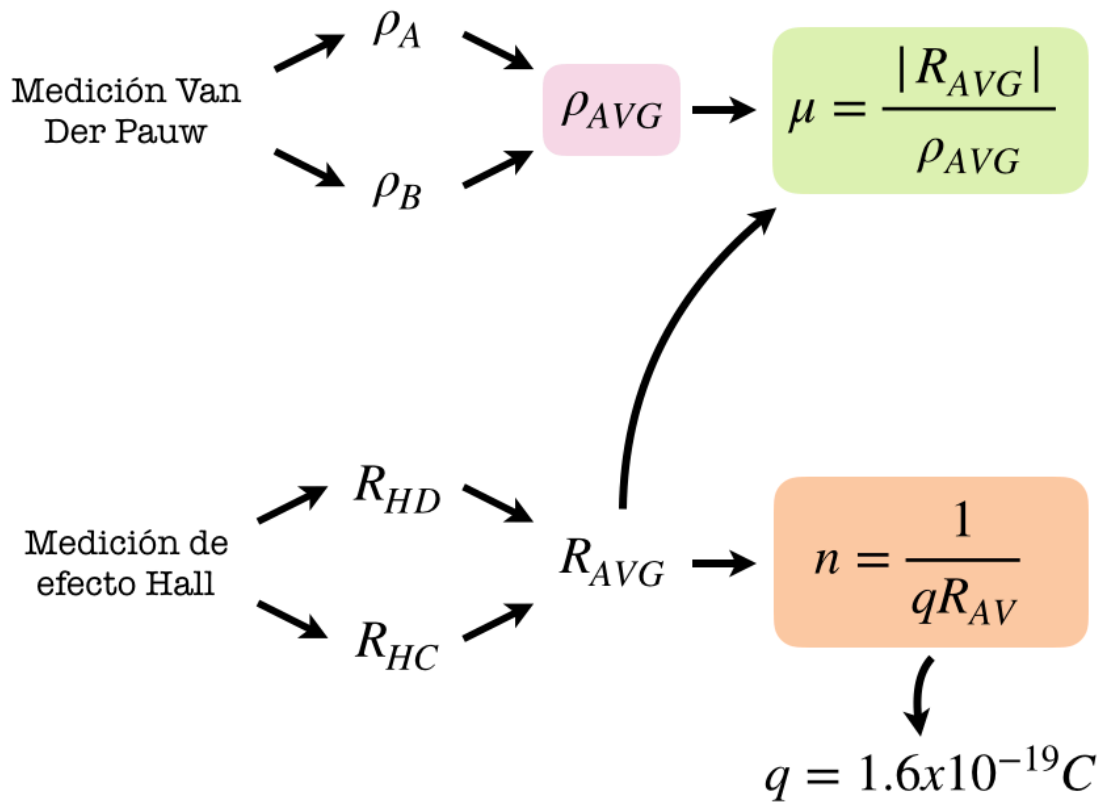


Figura 4.10: Cálculo de generación de campo magnético.

4.4 Sistema de conmutación

El sistema de conmutación modelo 7001 de la marca Keithley es el instrumento encargado de hacer las diferentes conexiones entre los diferentes contactos para que circule corriente por dos de ellos y se puede medir voltaje entre los otros dos planteado en la sección 3.3.

Para realizar estas conexiones se le envían las instrucciones de que fila debe ser conectada a una columna como si fuera una matriz, mostrado en la Figura 3.17. Los elementos que están conectados en cada fila y columna se muestran en la Figura 4.11.

Por ejemplo, para realizar la conexión y para medir el voltaje de Hall V_1 se debe conectar la fuente de corriente entre los contactos 1 y 3 y medir el voltaje entre los contactos 4 y 2. Cada contacto se encuentra conectado a una fila, el contacto 1 en la fila 1, el contacto 2 en la 2, el contacto 3 en la fila 3 y el contacto 4 en la fila 4. Entonces dado que la fuente de corriente tiene su borne positivo en la columna 1 y su borne negativo en la columna 2 para hacer circular la corriente por el contacto 1 se debe conectar la fila 1 con la columna 1 y la fila 2 con la columna 2. Por otra parte, el voltímetro tiene su borne positivo en la columna 3 y el borne negativo en la columna 2. Por lo tanto, para medir el voltaje en los contactos 4 y 2 se debe conectar la fila 4 con la columna 3 y la fila 2 con la columna 4. Al sistema de conmutación se le debe enviar la siguiente información: en donde la palabra *close* significa que se cierran las conexiones entre las filas y las columnas indicadas. Estas conexiones se muestran la Figura 4.11.

Para hacer una nueva medición las conexiones deben abrirse lo cual se logra al enviar al sistema de conmutación la instrucción *open all* y después realizar la nueva configuración.

Finalmente, con el sistema de conmutación también se elige si la muestra es de alta o baja resistividad. Para mediciones de alta resistividad la columna 5 se debe conectar a la fila 4, esto hace que la señal antes de ser medida por el voltímetro pase por los amplificadores en modo seguidor para evitar problemas de impedancia. Si la conexión está abierta entonces las señales pasan directamente al voltímetro, es decir, la medición es de baja resistividad.

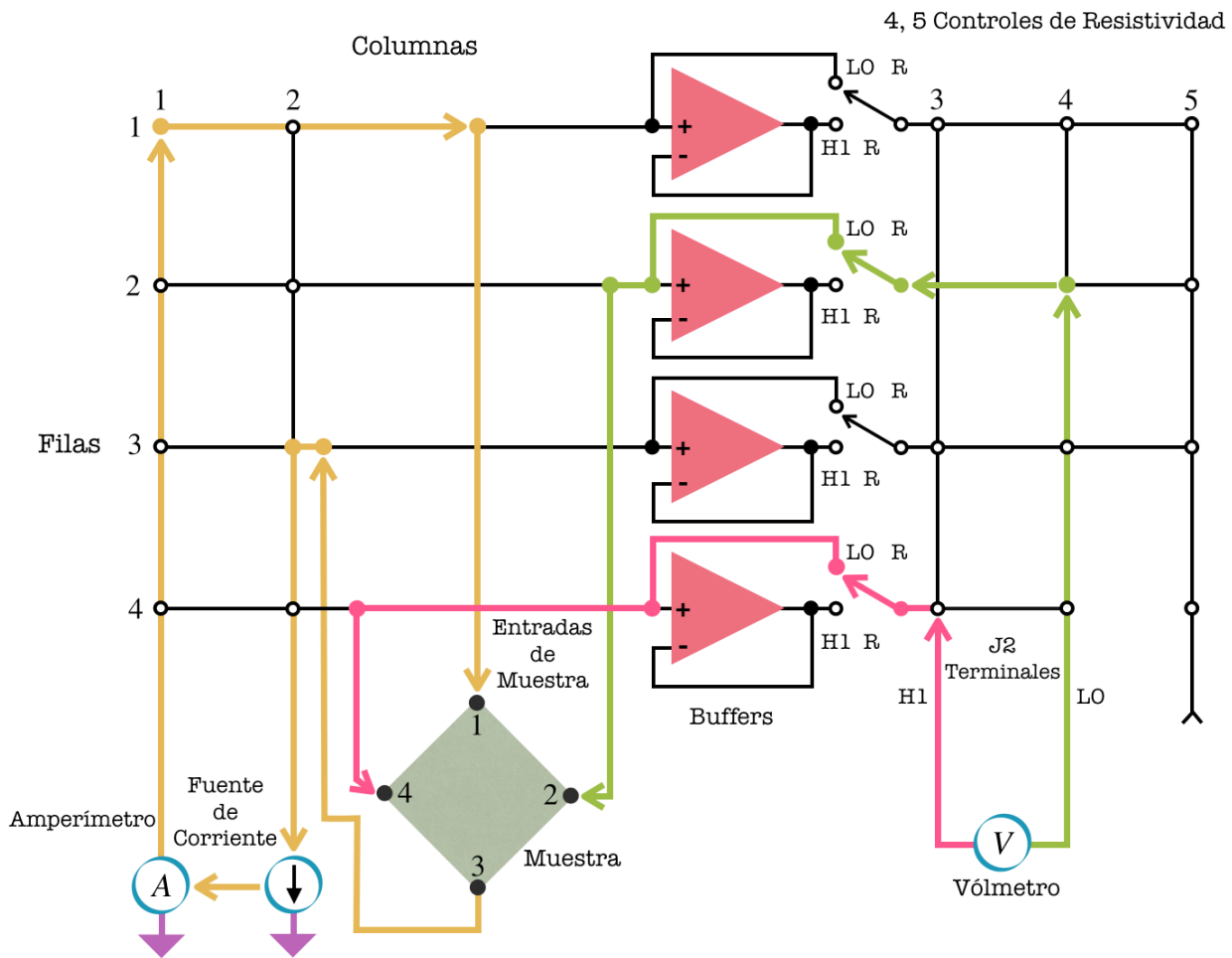


Figura 4.11: Detalle de la conexión de instrumentos y muestra para medir el voltaje de Hall V1 por medio del sistema de conmutación 7001

Capítulo 5

Experimentación

Una vez realizadas las conexiones físicas entre equipos y en el desarrollo del programa se lleva a cabo la caracterización de una muestra semiconductor de óxido de estaño dopado con Flúor ($\text{SnO}_2:\text{F}$) cuyas características eléctricas son ampliamente conocidas en la literatura y que además la resistividad de la muestra puede ser medida por otra técnica dentro del Instituto Politécnico Nacional para comparación.

5.1 Requerimientos del sistema

El Portamuestras diseñado para el sistema de caracterización eléctrica por efecto Hall es capaz de medir muestras de hasta $2.5\text{cm} \times 2.5\text{cm}$, que es el tamaño usual de las celdas solares que se procesan en los laboratorios de la ESFM.

Por otra parte, el sistema puede realizar mediciones de baja y alta resistividad, se considera de baja resistividad desde un valor muy cercano a cero hasta $1 \times 10^1 \Omega \cdot \text{cm}$ y de alta resistividad desde $1 \times 10^1 \Omega \cdot \text{cm}$ hasta $1 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ que es la resistividad límite que puede medir el sistema.

El programa de control es desarrollado en LabVIEW, una vez terminado el programa se guarda como ejecutable con las librerías que utiliza, las que permiten comunicación vía GPIB no es necesario instalarlos en la computadora donde se utiliza el programa de control. Sin embargo, en la misma computadora, se almacena el programa de control en su versión editable para ser modificado posteriormente.

5.2 Óxido transparente conductor SnO₂:F como material a caracterizar

Las celdas solares de película delgada tienen una estructura similar a la mostrada en la Figura 5.1, estas son construidas sobre un sustrato transparente de vidrio de aproximadamente 3mm, el contacto frontal de la celda tiene que ser transparente para que permita el paso de la luz hacia la unión semiconductor $p - n$ que es donde la luz se transforma en corriente eléctrica.

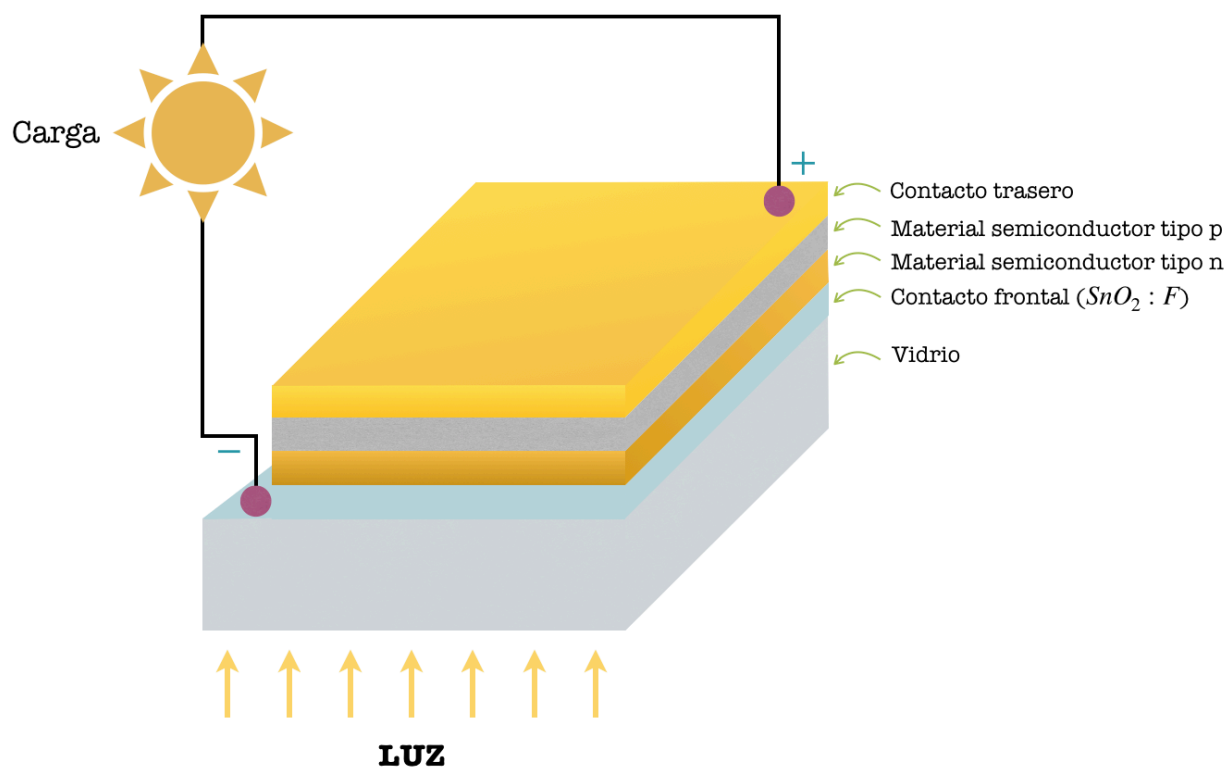


Figura 5.1: Estructura básica de una celda solar de película delgada

Los contactos transparentes de película delgada usualmente se utilizan óxidos transparentes. En la industria fotovoltaica es muy utilizado el óxido de estaño dopado con Flúor ($\text{SnO}_2 : \text{F}$) como contactos frontales pues tiene una transmitancia superior al 90%, es decir que el 90% de la luz que incide sobre ella pasa a través de ella y tiene el potencial de llegar a la unión semiconductor donde la energía lumínica se transforma en energía eléctrica.

Además de la transparencia del contacto frontal, se requiere que el contacto sea lo más conductor posible, esto se logra adicionando pequeñas cantidades de flúor al óxido de estaño con lo que se logran resistividades tan bajas como $1 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}$ para un material transparente. Para fines de comparación la resistividad del cobre está en el orden $1 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$. En la Tabla 5.1 se muestran los principales parámetros eléctricos del $\text{SnO}_2 : F$ reportados en la literatura.

Tabla 5.1: Parámetros eléctricos del $\text{SnO}_2 : F$ medido por otros autores (1)

Parámetro	Valor
Resistividad	2 a $5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$
Densidad de Portadores	$4 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$
Movilidad de Hall	40 a $50 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$

5.3 Caracterización eléctrica de $SnO_2 : F$

Se corta una pieza de $SnO_2 : F$ de 2.5 cm x 2.5 cm de una placa de 30 cm x 30 cm para ser colocada en el portamuestras del sistema de caracterización eléctrica por efecto Hall. El óxido transparente es de tipo comercial, de la marca *Pilkington*.

El espesor del $SnO_2 : F$ es de 350nm y esta depositada sobre un vidrio de 3mm de grosor. En la Figura 5.2 se muestra un detalle de la pieza del óxido transparente conductor.

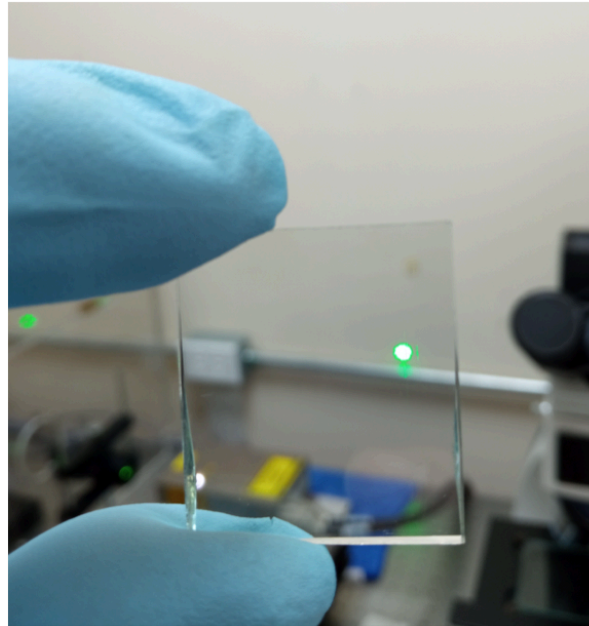


Figura 5.2: SnO₂:F sobre sustrato de vidrio

Una vez que la muestra se coloca sobre el portamuestras y se verifica que las cuatro puntas toquen la superficie de la muestra, el portamuestras posteriormente es colocado entre los polos del electroimán y se comienza con la medición, los parámetros de entrada que se seleccionaron se muestran en la Tabla 5.2. Dado que se espera que el $SnO_2 : F$ sea conductor se seleccionó que la medición fuera de baja resistividad.

Tabla 5.2: Parámetros de entrada para caracterizar una muestra de $SnO_2 : F$

Parámetro	Valor
Corriente (I)	1mA
Campo Magnético (B)	40mT
Espesor (t)	350nm
Medición alta/baja resistividad	Baja

En la Figura 5.3 se muestra el panel de control con los parámetros de entrada y los resultados de los parámetros eléctricos obtenidos. Como se puede observar los resultados medidos son similares a los obtenidos por otros investigadores mostrado en la Tabla 5.1.

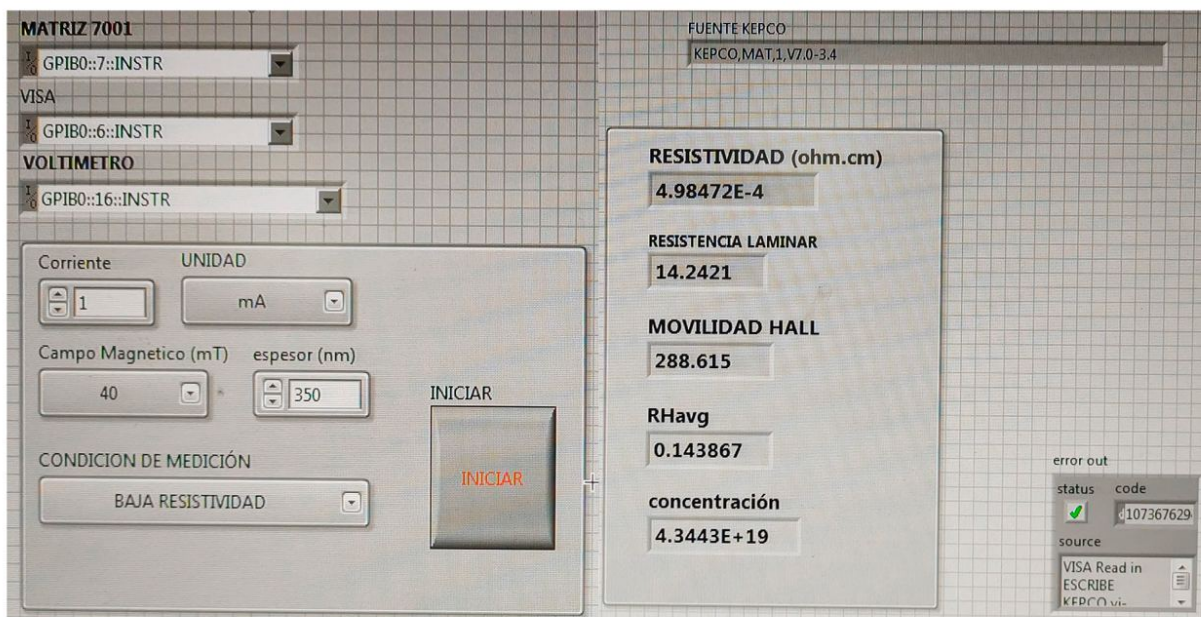


Figura 5.3: Panel de control con parámetros de entrada y resultados eléctricos

Por otra parte, a la muestra se le midió la resistividad por una técnica llamada cuatro puntas. Esta técnica consiste en colocar sobre la muestra cuatro puntas iguales y equidistantes en la que por dos extremos se hace pasar una corriente conocida y por las dos centrales se mide la diferencia de potencial.

Por medio del voltaje, la corriente, el espesor de la muestra y un factor constante se puede calcular la resistividad de la muestra, en la Figura 5.4 se observa la muestra en el equipo de Medición de cuatro puntas y un detalle de las cuatro puntas. El resultado que se obtiene el resultado que se obtiene al multiplicar la resistencia laminar del material 14.23 como se observa en la Figura 5.4, por el espesor de la muestra 350nm , resulta en una resistividad de $4.98 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ que es muy similar a la caracterización que se obtiene por medio del efecto Hall el cual se reporta en la literatura por lo cual es validado el correcto funcionamiento del equipo.



Figura 5.4: Sistema de medición de cuatro puntas para calcular la resistividad

En la Tabla 5.3 se resumen los parámetros eléctricos medidos para esta muestra.

Tabla 5.3: Parámetros eléctricos medidos para una muestra de $SnO_2 : F$

Parámetro	Valor medido
Resistividad	$4.98 \times 10^{-4} \Omega \cdot cm$
Movilidad	$288.6 cm^2/V * s$
Concentración de portadores	$4.3 \times 10^{19} cm^{-3}$

5.4 Experimento

Se realiza un número determinado de experimentos enfocados en corroborar el funcionamiento del Sistema de Caracterización Eléctrica de Materiales por efecto Hall, donde son consideradas dos variables las cuales se considera afectan el resultado de la caracterización correcta. En ellas se encuentra el campo magnético y la unidad de corriente es decir en nA y mA .

Para el factor de colocación de la muestra, mostrado en la Tabla [5.4](#) dónde es identificada la afectación de manera baja y alta.

Tabla 5.4: Variables a analizar

Factor	Bajo	Alto
Corriente inducida	Nanoamperes	Miliamperes
Campo magnético	Decenas de mT	Centenas de mT

Este experimento es enfocado en un análisis de varianza ANOVA, referente a identificar que variable tiene una mayor influencia sobre nuestros resultados, las caracterizaciones son realizadas sobre ($SnO_2 : F$), realizando cuatro caracterizaciones dos con campo magnético a 40mT y una corriente de $1nA$, y otras dos con campo magnético a $230mT$ y una corriente de $1mA$.

Obteniendo como resultados en ANOVA Multifactorial son evaluados los factores corriente inducida a la muestra y campo magnético, mostrando las caracterizaciones realizadas en este caso cuatro en la Tabla [5.5](#)

Tabla 5.5: Caracterizaciones realizadas en el Sistema de Caracterización Eléctrica de Materiales por efecto Hall

Bloque	Corriente	Campo magnético	Resistividad	Movilidad de Hall	Concentración
1	<i>nA</i>	40	0	0	0
1	<i>nA</i>	230	0	0	0
1	<i>mA</i>	40	0	0	0
1	<i>mA</i>	230	0	0	0
1	<i>nA</i>	40	3.70E-04	17269.5	9.77E+17
1	<i>nA</i>	230	-2.33E-03	59.7155	-4.49E+19
1	<i>mA</i>	40	4.98E-04	288.615	4.34E+19
1	<i>mA</i>	230	4.99E-04	2.94222	-4.26E+21

Se toma a análisis la Movilidad de Hall, una de las caracterizaciones mas cercanas a la elaborada en la Sección 5.3 es la realizada con los mismos parámetros con la diferencia en el campo magnético inducido que en este caso es 230mT . En la Figura 5.5 se muestra la Gráfica de dispersión por código de nivel para la variable Corriente donde nos muestra que el factor más significativo conforma al análisis de varianza multifactorial es de *nA*. Por otra parte en la Figura 5.6 es representada la relación significativa en la caracterización.

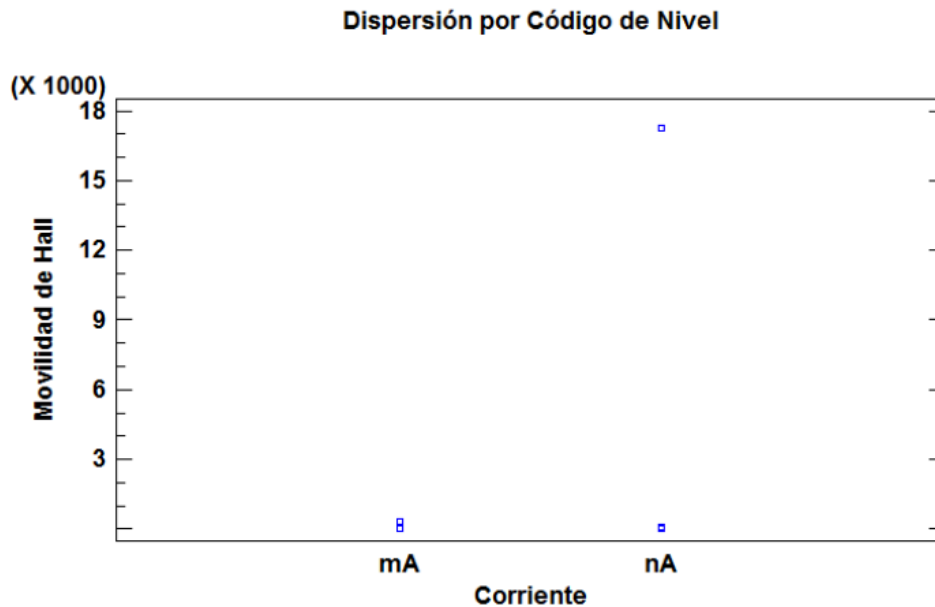


Figura 5.5: Gráfica de dispersión por código de nivel para la variable Corriente

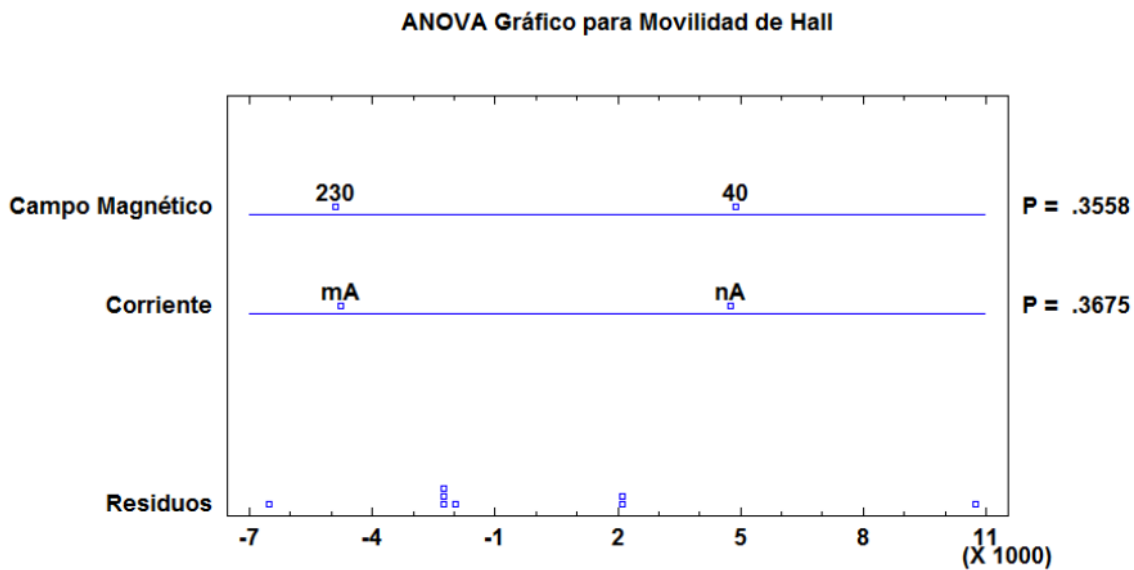


Figura 5.6: Gráfica ANOVA en el análisis de la varianza

La Tabla 5.6 ANOVA descompone la variabilidad existente en la Movilidad de Hall conforme a contribuciones a algunos factores, es elegida una suma de cuadrados Tipo III esta contribución es medida eliminando efectos del otro factor. Los valores-P evalúa el significado estadístico de los factores debido a que ningún valor-P es menor a 0.5 ningún factor afecta estadísticamente sobre la Movilidad de Hall con un 95% de nivel de confianza.

Tabla 5.6: ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón - F	Valor - P
Efectos Principales					
A: Corriente	3.63 E7	1	3.6285 E7	0.98	0.3675
B: Campo Magnético	3.8261 E7	1	3.8261 E7	1.03	0.3558
Residuos	1.8496 E8	5	3.6992 E7		
Total (Corregido)	2.5951 E8	7			

Tomando en cuenta los resultados anteriores, son requeridas veinticuatro caracterizaciones a futuro, obteniendo con ello un mejor análisis de la varianza en el trabajo planteado.

Capítulo 6

Conclusiones

6.1 Conclusiones Finales

En este trabajo se desarrolla de manera exitosa un sistema de caracterización eléctrica de materiales por efecto Hall. Se integraron los componentes electrónicos que forman el sistema y se desarrolla un programa de control en el lenguaje de LabVIEW que permite operar los equipos de manera coordinada para implementar la técnica de Van Der Pauw para medir la resistividad y de efecto Hall para obtener la densidad de portadores y su movilidad. Además, el programa de control permite fijar un valor de campo magnético entre los polos de un electroimán y la dirección del campo por medio del control de la corriente que circula a través del electroimán.

El sistema es evaluado con una muestra de un óxido transparente conductor de tipo comercial cuyas características eléctricas son bien conocidas por ser un material ampliamente utilizado en la industria fotovoltaica y por lo tanto permite la comparación de los resultados obtenidos con el sistema de medición desarrollado en este trabajo. El material seleccionado es óxido de estaño dopado con flúor ($SnO_2 : F$) de $350nm$ de espesor de la marca *Pilkington* depositado sobre un sustrato de vidrio de $3mm$ de grosor.

Como resultado de la caracterización eléctrica para la muestra de $SnO_2 : F$ se obtuvo una resistividad de $\rho = x\Omega \cdot m$, una densidad de portadores de $n = Ycm^{-3}$ y una movilidad $\mu = ZV/m \cdot s$. Estos resultados son similares a los reportados por otros autores en la literatura por lo que se prueba el buen funcionamiento del sistema desarrollado.

6.2 Contribuciones

Con el sistema de caracterización eléctrica desarrollado en este trabajo se pueden caracterizar los materiales obtenidos por los investigadores del grupo de celdas solares de la ESFM y de ESIME cuyo interés es desarrollar materiales con las características adecuadas para obtener dispositivos fotovoltaicos de alta eficiencia. Por otra parte, la puesta en funcionamiento del sistema de efecto Hall de la ESFM incrementa la infraestructura de equipos de caracterización de IPN permitiendo tener caracterizaciones eléctricas de materiales a los investigadores de la Ciudad de México y de otras Instituciones que colaboran con el IPN en el desarrollo de celdas solares en la UACM que ha colaborado frecuentemente en proyectos de investigación con el IPN.

Finalmente, el código del programa de control está abierto para que otros investigadores y estudiantes involucrados puedan realizar modificaciones y nuevas implementaciones con el fin de enriquecer esta técnica de caracterización.

6.3 Trabajo Futuro

Se tiene pensado ampliar el programa de control para poder almacenar la información y generar una base de datos con los datos medidos para diferentes materiales. Esta base de datos permitirá a los investigadores comparar sus mediciones con las que otros han obtenido e incluso se pueden agregar los valores de los parámetros eléctricos reportados en la literatura.

Se tiene propuesto adicionar una fuente de luz que ilumine directamente a la muestra con el fin de evaluar los parámetros eléctricos bajo la influencia de la luz de diferente longitud de onda, este sistema se conoce como foto-efecto Hall, *efecto Hall asistido por luz*.

Apéndice A

Diagrama de Flujo

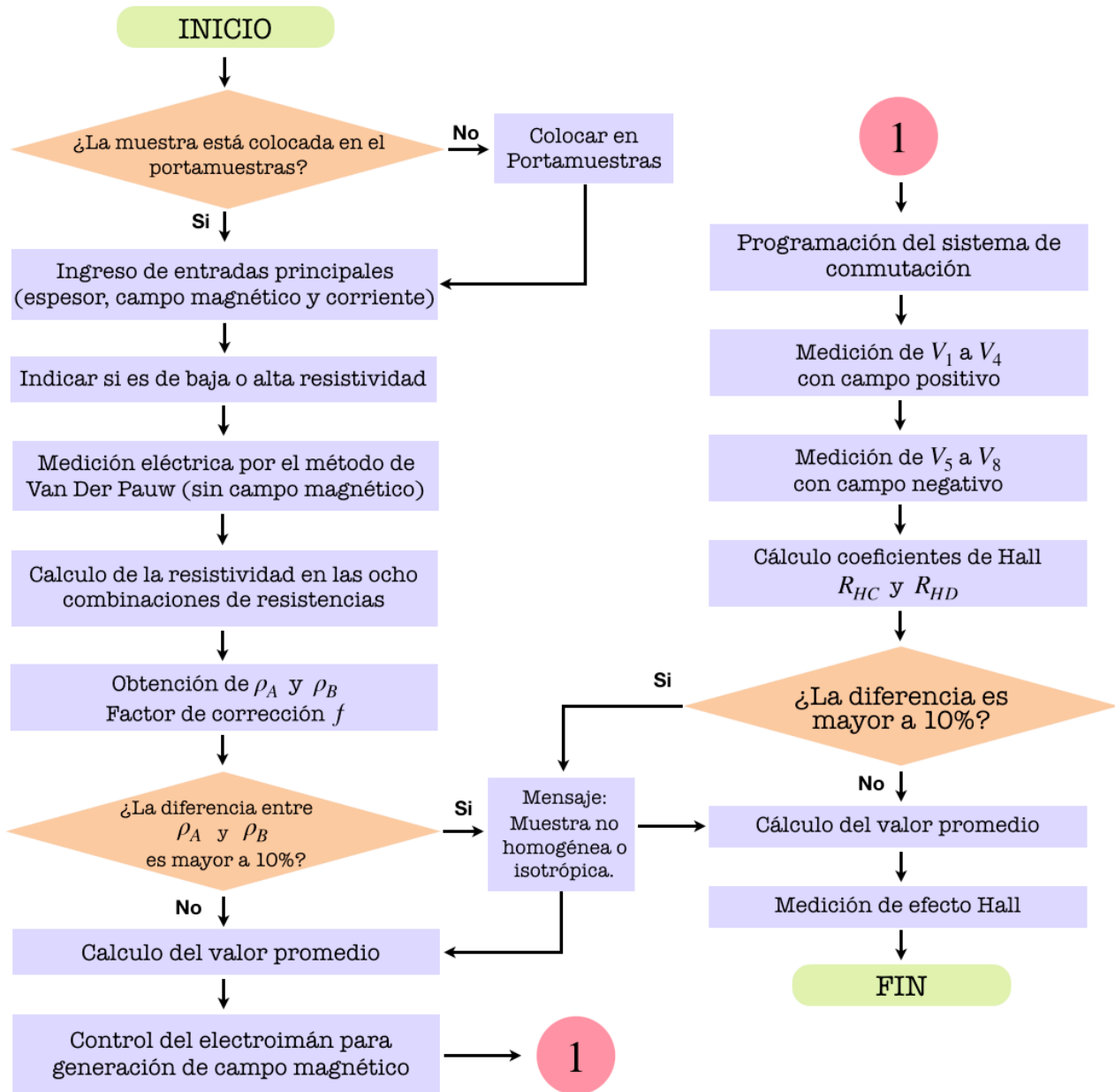


Figura A.1: Diagrama General del Sistema de Caracterización Eléctrica de Materiales por Efecto Hall

Apéndice B

Evaluación Económica

El presente trabajo es enfocado en investigadores y universitarios con interés en la caracterización de materiales para la elaboración de celdas solares, por lo cual el mercado se enfoca en universidades y centros de investigación.

Una vez enfocado el mercado se realiza una evaluación económica calculando el Valor Presente Neto (VPN) y la respectiva Tasa Interna de Retorno (TIR), evaluando de esta manera la viabilidad del proyecto.

En la Figura B.1 se presenta el flujo de efectivo positivo y negativo del Sistema de Caracterización Eléctrica de Materiales por efecto Hall dónde es mostrada la inversión inicial, precio del producto, valor de salvamento y los servicios que fueron generados durante la elaboración de este proyecto. Este sistema tuvo una duración de elaboración de ocho periodos, cada periodo de una semana de duración.

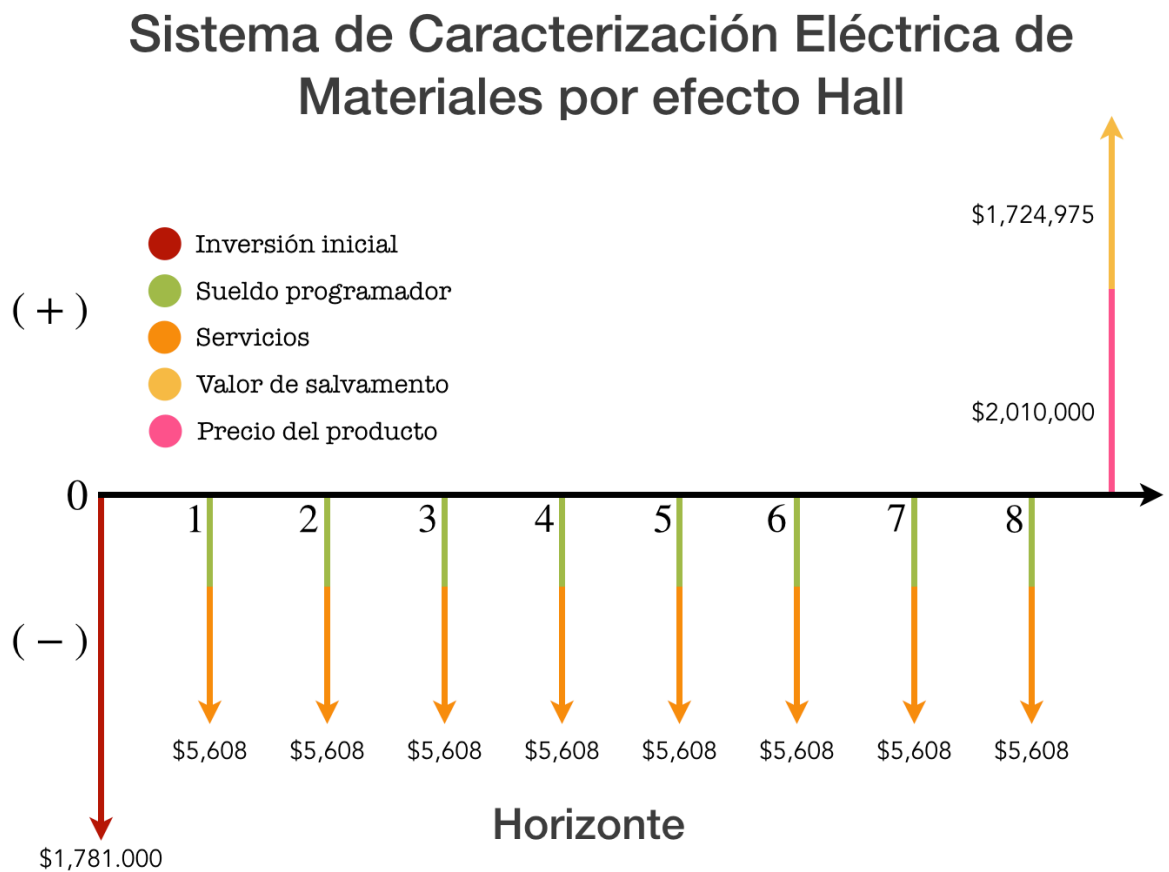


Figura B.1: Diagrama de flujo de efectivo del Sistema de Caracterización Eléctrica de Materiales por efecto Hall

B.1 Cálculo de VPN

El cálculo del VPN en el Sistema de Caracterización Eléctrica de Materiales por efecto Hall es elaborado mediante la Ecuación B.1

$$VPN = \frac{-Inersion}{(1+i)^0} + \frac{\Sigma I_1 - \Sigma E_1}{(1+i)^1} + \frac{\Sigma I_2 - \Sigma E_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{\Sigma I_{n-1} - \Sigma E_{n-1}}{(1+i)^{n-1}} + \frac{\Sigma I_n - \Sigma E_n}{(1+i)^{n1}} \text{ (B.1)}$$

Basado en la Ecuación B.1 es considerada una tasa de interés $i = 7.75\%$, evaluando flujos positivos y negativos en cada uno de los ocho periodos de la duración del sistema. El Sistema requiere de una inversión inicial de \$1,781.000 (Un millón setecientos ochenta y un mil MXN) y con un egreso de \$5,608 por cada periodo donde engloba los servicios y el salario de un ingeniero para el desarrollo del sistema.

El porcentaje de salvamento anual por la venta del Sistema de Caracterización Eléctrica de Materiales por efecto Hall al final de su elaboración y basado en su inversión inicial es de un 17.8% aproximadamente.

El VPN del sistema es de 1,865,176.8387 el cual nos indica que al finalizar el proyecto y concluyendo su venta del mismo es un sistema totalmente viable dejando un margen de ganancia. Por otra parte en la Tasa Interna de Retorno (TIR) es elaborado con una igualación a cero basado en la tasa de interés anual dentro de la Ecuación B.1 del VPN en el caso del sistema no aplica porque aun haciendo un interés por arriba del 100% sigue dando un resultado positivo, mostrando que no existe perdida alguna.

Finalmente se concluye basado en la evaluación económica del sistema, que es un proyecto totalmente viable, sin olvidar que es un proyecto pensado enfocado en la investigación haciendo venta del mismo en universidades o centros de investigación.

Referencias

- [1] Desarrollo de celdas solares prototipo de CdTe con CdS procesado por baño químico. vii, 62
- [2] Google Maps. 2
- [3] Rodríguez, V. El efecto Hall cuántico y sus contextos. *Scientiae Studia* 2013, 11, 141–158. doi:black10.1590/S1678-31662013000100007. 10
- [4] González Alfaro, J.M. El efecto Hall: hacia la conceptualización de la corriente eléctrica. *Análisis histórico y experimental*. reponame:Repositorio Institucional de la Universidad Pedagógica Nacional 2016. 10
- [5] Melo-Quintero, J.; Rosales-Rivera, A.; Giraldo-Daza, H. Medidas de efecto hall y resistividad en aleaciones magnéticas amorfas basadas en coFe 2010. 12
- [6] Vidal Salgado, L.E. Diseño y construcción de un sistema de medidas de efecto Hall basado en la técnica de Van der Pauw 2008. 12, 13, 15, 16, 17
- [7] Mesa, F.; Orozco, C. Resistividad eléctrica y Efecto Hall en películas delgadas de ZnO depositadas por evaporación reactiva. *Avances Investigación en Ingeniería* 2017, 13, 15. doi:black10.18041/1794-4953/avances.1.337. 12, 13, 14, 15
- [8] Efecto Hall y estudio de fotovoltaje superficial transiente (SPV) en películas delgadas de Cu₃BiS₃. 12
- [9] Repositorio de Tesis DGBSDI: Diseño e implementación de un sistema de medición de resistividad y efecto Hall para semiconductores. 12, 13, 17, 18, 19
- [10] Diseño e implementación de un sistema de caracterización para microsensors de efecto Hall. 12
- [11] Rojas Rodríguez, I. Aplicaciones de radiometría fototérmica infrarroja en la caracterización de materiales semiconductores y metálicos 2008. 12
- [12] Morales, S.; Guadalupe, J. Obtención y caracterización de celdas solares CdTe/CdS por la técnica CSVT a partir de materiales sinterizados 2015. 12
- [13] Camacho Inzunza, A.A. Síntesis y caracterización de materiales compuestos por zeolitas y modificadas con cerio para la adsorción de CO₂ 2018. 13
- [14] Enríquez, F.D.A. Uso de lenguajes de programación para desarrollar el razonamiento lógico matemático en los niños. *Revista Científica UISRAEL* 2019, 6, 64–72. doi:black10.35290/rcui.v6n2.2019.114. 13

- [15] Alvarado Hernández, F. Introducción a la programación utilizada en máquinas fresadoras de control numérico con lenguaje de programación Heidenhain TNC 2014. 13
- [16] Vázquez, P; Ica, F.J. Programa en lenguaje gráfico Ladder para la operación de seguridad en un quemador industrial 2017. 13
- [17] Unidad para supervisión y control de medición de efecto hall con LabView®. 13
- [18] Standard Test Methods for Measuring Resistivity and Hall Coefficient and Determining Hall Mobility in Single-Crystal Semiconductors. 30
- [19] GMW Associates 3473 150mm Electromagnet - Overview. 33
- [20] Kepco MAT55-20 for Sale|Range Over 30 to 60 Volts / Over 10 to 30 Amps|DC Power Supplies|Test Equipment Center. 34
- [21] KEPCO, INC.: TMA 4882-27 CONTROLLER. 34
- [22] Model 220 Programmable Current Source Instruction Manual Rev. H | Tektronix. 35
- [23] 6517B Electrometer/High Resistance Meter Datasheet | Tektronix. 36
- [24] Keithley 2000 Series: 6½-Digit Multimeter with Scanning. 37
- [25] Model 7001 Switch System Quick Reference Guide Rev. A | Tektronix. 38
- [26] Model 7065 Hall Effect Card Instruction Manual | Tektronix. 38, 42
- [27] Yang Leping, Li Haitao, Zhao Yong, Yang Lei, An Xueying. LabVIEW Programación Avanzada; Universidad de Tsinghua, 2003. Google-Books-ID: ETNEP1DMFrcC. 43
- [28] S. Sumanthi, P.S. LabVIEW bases Advanced Instrumentation Systems; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. 43, 44
- [29] Jerome, J. Virtual Instrumentation Using LabVIEW; Asoke K. Ghosh, PHI Learning Private, 2010. 43, 44