

**MODELO FUNCIONAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE
CONDUCTIVIDAD EN PELÍCULAS DELGADAS SEMICONDUCTORAS**

**SILVIA CAROLINA AFANADOR PINZÓN
ROGGER FAURICIO CAICEDO QUESADA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2016**

**MODELO FUNCIONAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE
CONDUCTIVIDAD EN PELÍCULAS DELGADAS SEMICONDUCTORAS**

**SILVIA CAROLINA AFANADOR PINZÓN
ROGGER FAURICIO CAICEDO QUESADA**

Trabajo de grado en la modalidad de investigación presentado para obtener los
títulos de

**INGENIERO(A) ELECTRICISTA
INGENIERO ELECTRÓNICO**

DIRECTORA

DRA. MÓNICA ANDREA BOTERO LONDOÑO

CO-DIRECTORA

MIE. MARÍA ALEJANDRA MANTILLA VILLALOBOS

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

2016

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme la oportunidad de estudiar y forjar mi camino.

A mis padres Carlos Afanador y Miriam Pinzón por ser la fuente de mi inspiración, por confiar en cada momento en mí, este logro es tanto mío como de ellos.

A mis hermanos Carlos Augusto y Paola Marcela que siempre estuvieron apoyándome, por ser mi ayuda y por querer que sea siempre lo mejor.

A las profesoras MÓNICA ANDREA BOTERO y MARÍA ALEJANDRA MANTILLA por su comprensión, paciencia y gran conocimiento, por ser nuestra directora y codirectora apoyándonos y guiándonos en todo momento, a los profesores José Amaya, Álvaro Alyamani y David A Miranda, que de alguna u otra manera nos ayudaron con su guía y conocimiento.

A mis compañeros de universidad que estuvieron presentes en mi camino académico, pero por sobre todo a Erika Zárate que siempre estuvo apoyándome y colaborándome, a Nixon Ortiz con quien siempre tuve un brazo de apoyo, por ser tan paciente y comprensivo conmigo.

Por último a todas esas personas que me ayudaron en este camino y que me dieron un granito de apoyo para culminar mi carrera como profesional.

Silvia Carolina Afanador Pinzón

Al culminar este corto pero importante paso de la vida, me gustaría agradecer a mis padres Clara Quesada Olarte y Víctor Caicedo Blanco que siempre me han dado su comprensión y apoyo a lo larga de mi vida. Quiero dar un agradecimiento muy especial a mi hermana Karina Caicedo Quesada por forjar mi carácter y persistencia.

A los profesores Mónica Andrea Botero, María Alejandra Mantilla, José Alejandro Amaya, Álvaro alyamani y David Forero por toda su paciencia, empeño y colaboración para que este proyecto se haya hecho realidad.

Y por último pero no menos importante deseo agradecer a la Universidad Industrial de Santander, por forjar mi perfil laboral brindándome la posibilidad de realizar mis primeros estudios profesionales.

Rogger Caicedo Quesada

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	17
1.1 OBJETIVO GENERAL	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.3 JUSTIFICACIÓN	17
2. MARCO TEÓRICO	20
2.1 CELDAS SOLARES	20
2.2 FUNCIONAMIENTO BÁSICO DE UNA CELDA SOLAR	23
2.3 CELDAS SOLARES TIPO PELÍCULAS DELGADAS	25
2.4 SEMICONDUCTORES	27
2.5 MÉTODO DE TERMO-TENSIÓN	30
3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN	33
3.1 SELECCIÓN DEL MATERIAL DE CONTACTOS Y ELECTRODOS	34
3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA RESISTENCIA DE CALENTAMIENTO	36
3.3 AISLANTE ELÉCTRICO ENTRE EL ELECTRODO Y LA RESISTENCIA THERMOCOAX	39
3.4 SELECCIÓN DE LA TEMPERATURA DE TRABAJO	41
3.5 SELECCIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN	43
3.6 PROCEDIMIENTO PARA LA CONFIGURACIÓN DEL NANO- VOLTÍMETRO	44
3.7 ESTRUCTURA DEL MODELO FUNCIONAL	47
3.8 PROCESO PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE CONDUCTIVIDAD	50

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS	53
4.1 VERIFICACIÓN DEL TIPO DE CONDUCTIVIDAD	53
5. RECOMENDACIONES	59
6. CONCLUSIONES	60
REFERENCIAS	62
BIBLIOGRAFÍA	66
ANEXOS	70

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estructuras típicas de dispositivos en lámina delgada	18
Figura 2. Evolución de la Eficiencia en celdas solares	21
Figura 3. Proceso que ocurre en una celda solar de silicio cristalino	24
Figura 4. Sección transversal de una celda solar con estructura ventana óptica / capa absorbente	26
Figura 5. Diagrama de bandas de energía de semiconductores	28
Figura 6. Comportamiento de la conductividad al variar la temperatura de un semiconductor	30
Figura 7. Esquemático para la prueba de termo-tensión	34
Figura 8. Foto tomada a una porción de plata empleada para fabricar los contactos y electrodos	36
Figura 9. Esquema para la caracterización de la resistencia Thermocoax	37
Figura 10. Curva Temperatura [$^{\circ}$ C] Vs. Tensión [V]	38
Figura 11. Curva Corriente Vs. Tensión para identificar el valor óhmico del Thermocoax.	39
Figura 12. Atenuación de la temperatura debido al aislante	41
Figura 13. Conexión del cable 2107 al equipo 2182A	45
Figura 14. Conexión para la medida de la tensión con equipo 2182A	45
Figura 15. Estructura del modelo funcional 1 para la identificación del tipo de conductividad en películas delgadas semiconductoras.	48
Figura 16. Estructura del modelo funcional 2 para la identificación del tipo de conductividad en películas delgadas semiconductoras.	50
Figura 17. Sistema usado para determinar el tipo de conductividad de materiales semiconductores a través de medidas de termo-tensión	51
Figura 18. Curva de Termo-tensión VS Tiempo	55

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Conductividades eléctricas y térmicas de varios metales a temperatura ambiente	35
Tabla 2. Ecuación y valor de R^2 para las distintas líneas de tendencias	37
Tabla 3. Característica de los posibles aislantes resistentes a la temperatura	40
Tabla 4. Variación de la temperatura del electrodo en función del tiempo, con tensiones constantes	42
Tabla 5. Parámetros de los equipos de medición	43
Tabla 6. Tipo de conductividad de las muestras	53
Tabla 7. Resultados obtenidos con la prueba de termo-tensión e identificados con el nano-voltímetro.	54
Tabla 8. Verificación de la repetitividad para el método de termo-tensión	56
Tabla 9. Resultados obtenidos con la prueba de termo-tensión e identificados con el Fluke 179	57
Tabla 10. Resultados obtenidos con la prueba de termo-tensión e identificados con el Fluke CNX3000	57

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Modelo pruebas de fotoconductividad isométrica	70
Anexo B. Modelo para identificación del tipo de conductividad isométrica	71

RESUMEN

TÍTULO: MODELO FUNCIONAL PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE CONDUCTIVIDAD EN PELÍCULAS DELGADAS SEMICONDUCTORAS*

AUTORES: SILVIA CAROLINA AFANADOR, ROGGER FAURICIO CAICEDO**

PALABRAS CLAVES: diseño, conductividad, juntura, Energías renovables, semiconductores, termo-tensión.

DESCRIPCIÓN:

A lo largo de los últimos años, la sociedad ha unido esfuerzos en la investigación de alternativas en la forma de generación de energía, específicamente alternativas más amigables con el medio ambiente sin las limitaciones de las actuales fuentes de energía. Una tecnología muy interesante que se ha podido apreciar es la implementación de paneles solares basados en películas delgadas semiconductoras.

En el presente trabajo de grado se propone el diseño, la elaboración e implementación de un modelo funcional para determinar el tipo de conductividad (N o P) en la película delgada semiconductor que forma parte de la juntura de las celdas solares. Para esto se empleó el método de Termo-tensión, el cual por medio de la transformación de energía térmica a energía eléctrica permite obtener una diferencia de potencial positivo o negativo, dependiendo del tipo de conductividad que posea la muestra y así pudiéndose caracterizar el material.

Las muestras utilizadas para la identificación del tipo de conductividad de las películas delgadas semiconductoras, fueron sintetizadas en el laboratorio de Celdas Solares de la Universidad Nacional de Colombia, permitiéndonos comprobar los resultados del modelo implementado. Cabe mencionar que en las pruebas del equipo se realizaron diferentes tipos de medidas con el fin de comprobar que a pesar de las variaciones de temperatura el tipo de conductividad se mantiene, garantizando reproducibilidad y estabilidad en las medidas. Se concluyó que el propuesto identificó de manera adecuada el tipo de conductividad en películas delgadas semiconductoras.

* Trabajo de grado

** Universidad Industrial de Santander, Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Directora Mónica Andrea Botero

ABSTRACT

TITLE: FUNCTIONAL MODEL FOR THE IDENTIFICATION OF THE TYPE OF CONDUCTIVITY IN SEMICONDUCTING THIN FILMS*

AUTHORS: SILVIA CAROLINA AFANADOR, ROGGER FAURICIO CAICEDO**

KEY WORDS: Design, conductivity, sealings, semiconductors, renewable energies.

DESCRIPTION:

Over the past years, the society has joined forces in the investigation of alternatives in the form of power generation, specifically alternatives more user friendly with the environment without the constraints of the current sources of energy. A very interesting technology that has seen is the implementation of solar panels based on semiconducting thin films.

This degree work proposes the design, development and implementation of a functional model to determine the type of conductivity (N or P) in semiconductor thin film that is part of the joint for the solar cells. The thermal voltage method, was used for this through the transformation of thermal energy into electrical energy which allows a difference of potential positive or negative, depending on the type of conductivity that possess the sample and thus being able to characterize the material.

The samples used for the identification of the type of conductivity of semiconducting thin films, were synthesized in the laboratory of solar cells of the National University of Colombia, allowing us to check the results of the implemented model. It is worth mentioning that in equipment testing different types of measures were performed in order to verify that despite the variations of temperature conductivity type is maintained, ensuring reproducibility and stability measures. It was concluded that the proposed identified properly the type of conductivity in semiconductor thin films.

* Degree Project

** Industrial University of Santander, school of electrical, electronic engineering and telecommunications, Director Mónica Andrea Botero

INTRODUCCIÓN

Hoy en día la generación de energía está constituida principalmente por los combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural), recursos que no son renovables y que además de presentar un impacto ambiental negativo, no garantizan un cubrimiento total a largo plazo de la creciente demanda de energía generada por el crecimiento de la población y de la industria, por ello se generó un gran interés mundial por la búsqueda de nuevas fuentes energéticas que sean preferiblemente renovables[1].

La energía solar es, sin duda, la más importante y abundante de las llamadas fuentes energéticas renovables. Al mismo tiempo, la forma más versátil y prometedora de conversión de esta energía, es la conversión directa por medio del efecto fotovoltaico empleando celdas solares. El mayor interés en esta tecnología es lograr la reducción del costo de las celdas, utilizando nuevos materiales y métodos de fabricación sencillos y eficientes al consumo, esta también busca mejorar el rendimiento y eficiencia de las celdas por medio del desarrollo y optimización de estructuras fotovoltaicas de alta eficiencia de conversión[2].

En Colombia la fabricación de celdas solares ha venido tomando mayor fuerza, debido a que este es uno de los países que ingresó recientemente a la Agencia Internacional de Energías Renovables y pretende posicionarse como el líder en energías renovables en Sur América[3].

Las tecnologías de celdas solares más utilizadas en el mercado son las de silicio mono-cristalino debido a su eficiencia de conversión que varía de 15 a 24 %, a diferencia del silicio poli-cristalino donde su eficiencia varía de 12 a 15 %; entre las celdas solares de películas delgadas se encuentran las que son fabricadas con Silicio amorfo, Arseniuro de galio (GaAs), telurio de Cadmio (CdTe) y celdas de base de cobre, indio, galio y selenio; todos estos tipos de celdas tienen su eficiencia por

debajo del 21%, su fabricación sencilla y el empleo de menos materiales las hace más económicas en comparación con las de silicio mono y poli-cristalino[4].

En un gran número de investigaciones, las películas delgadas de semiconductores han sido implementadas en celdas solares, en la actualidad solo tres tipos de películas han pasado de la investigación básica de laboratorio a la producción a nivel industrial; estas son: silicio amorfo (a-Si), telurio de cadmio (CdTe) y compuestos tipo calcopirita de Cu (In,Ga) Se₂ (CIGSSe) y CuInS₂ (CIS)[5].

El grupo GISEL de la E3T ha comenzado una línea de investigación en síntesis y fabricación de celdas solares. Una parte importante en la construcción de celdas solares, es la unión de dos materiales semiconductores, uno con conductividad tipo n en contacto con otro de conductividad tipo p[6]; por esta razón en el estudio de celdas solares es importante determinar la conductividad del material semiconductor. En este trabajo de grado el estudio de la conductividad se realizó por el método de termo-tensión donde la resistividad de los semiconductores disminuye cuando se aumenta la temperatura. En este caso, al aumentar la temperatura en el semiconductor, las cargas libres tienden a desplazarse al lado del electrodo con temperatura ambiente, y los portadores de carga tienden a desplazarse al lado de mayor temperatura, produciendo una diferencia de potencial y haciendo posible la caracterización de la conductividad [7].

Por lo mencionado anteriormente, se trabajó en la elaboración de un modelo funcional de caracterización de películas delgadas semiconductoras por el método de termo-tensión, con el fin de identificar el tipo de conductividad (p o n). A continuación se describe esquemáticamente el contenido por secciones. La primera parte de este trabajo de grado (capítulos 1 y 2), está relacionada con conceptos básicos referidos a celdas solares, celdas solares tipo película delgada y semiconductores. En el capítulo 3 se describen los detalles del proceso experimental que se siguió para la fabricación del modelo funcional, así como las

especificaciones de la técnica utilizada en la identificación del tipo de conductividad en películas delgadas semiconductoras. Finalmente, en el capítulo 4 se presentan los resultados y se realiza el análisis con las películas delgadas.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un modelo funcional que permita identificar el tipo de conductividad en películas delgadas semiconductoras, usando medidas de termo-tensión.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

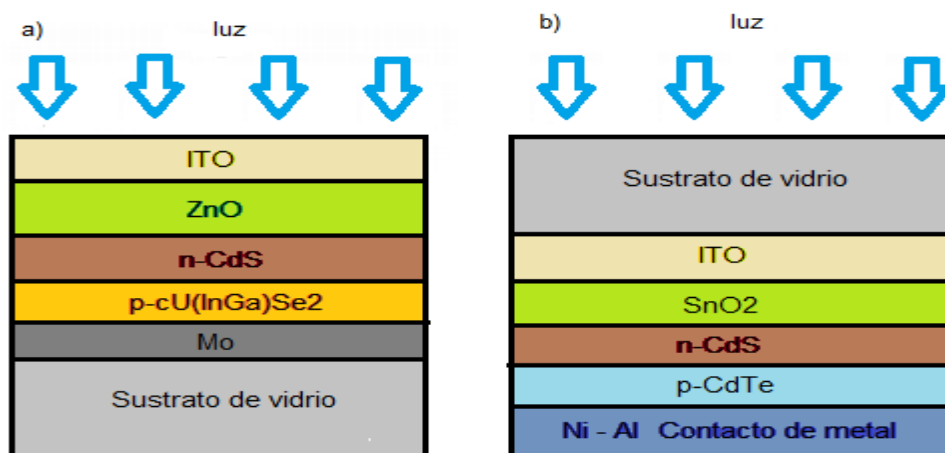
- Diseñar e implementar un modelo funcional que permita obtener medidas de termo-tensión.
- Determinar y analizar el tipo de conductividad (n o p) en las películas delgadas semiconductoras.
- Estudiar y comparar el tipo de conductividad en distintas películas delgadas.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La celda solar es un dispositivo que convierte luz solar directamente en energía eléctrica, mediante el efecto fotovoltaico. En las celdas solares, se ponen en contacto dos capas de materiales semiconductores con conductividad diferente. La primera es una capa semiconductor del tipo n, es decir con abundancia de electrones (carga negativa). La otra capa semiconductor es del tipo p con abundancia de huecos (carga positiva). Aunque ambos materiales son eléctricamente neutros, la capa del tipo n tiene electrones de sobra y la capa del tipo p tiene a su vez huecos de sobra. Cuando se sobrepone una capa tipo n con una capa tipo p se crea una unión p/n, donde se genera un campo de fuerza eléctrica fundamental para la generación de la energía[7].

Las celdas solares se pueden fabricar de varias formas, entre ellas se encuentra la celda de tipo homojuntura, que se basa en unir dos materiales iguales dopados para tener diferentes conductividades, un ejemplo de esta tecnología es la celda de silicio. Para dopar negativamente la red cristalina de silicio, se deben sustituir algunos átomos de silicio por átomos de otro elemento con más electrones de valencia, puede ser con elementos del grupo V de la tabla periódica, donde generalmente se emplea fósforo. Para dopar positivamente el silicio, el nuevo átomo dopante debe tener menos de cuatro electrones de valencia[9]. Otro tipo de celda solar, es heterojuntura, se genera una juntura p/n con dos materiales diferentes, como es el caso de las celdas solares basadas Cu (InGa) Se₂ y CdTe [10]. Los dispositivos con mejores eficiencias se han logrado con configuraciones en sustrato o en superestrato como las mostradas en la Figura 1. En la configuración en sustrato, las diversas capas que forman la estructura se depositan sobre un sustrato transparente u opaco mientras la luz incide por la cara sobre la que están depositadas las láminas; en la configuración en superestrato, la luz incide directamente a través del sustrato utilizado, lo que requiere que este sea transparente a la radiación[11].

Figura 1. Estructuras típicas de dispositivos en lámina delgada a) célula de Cu (InGa) Se₂; b) célula de CdTe en configuración superestrato [11].



El estudio de nuevos materiales para la aplicación de celdas solares es motivado por el mejoramiento de la relación eficiencia-costo. El impacto ambiental y materia prima limitada, ha desencadenado el estudio e inversión de nuevos dispositivos de energía solar fotovoltaica.

En este capítulo se presentaron las formas en las que se fabrican las celdas solares, entre ellas las celdas tipo homojuntura y heterojuntura, las cuales presentan su funcionamiento y forma estructural, donde la identificación del tipo de conductividad es fundamental para su construcción.

A continuación se encontrará con más detalle el uso, la física y el método para la identificación del tipo de conductividad en películas delgadas semiconductoras.

2. MARCO TEÓRICO

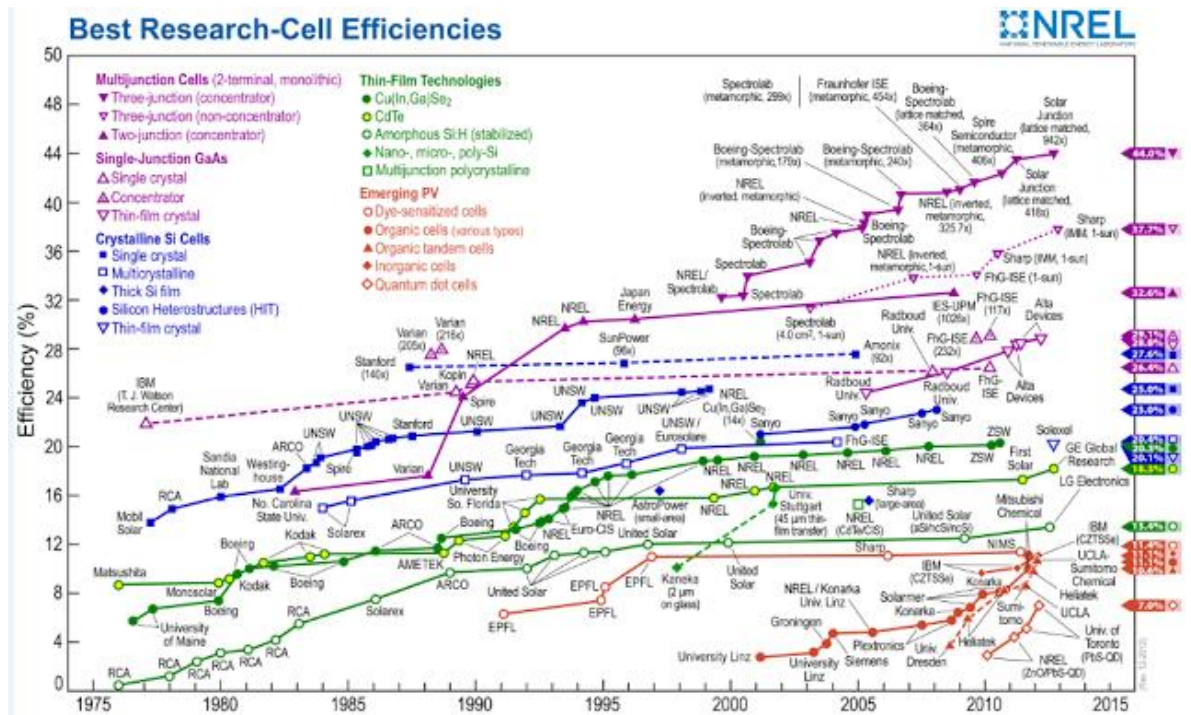
En este capítulo se describe el funcionamiento básico de las celdas solares, introduciendo el funcionamiento interno de las películas delgadas y el análisis de los semiconductores, con el fin de dar un uso adecuado al método de termo-tensión y su importancia para el desarrollo de la energía solar.

A continuación se presenta temas como: el funcionamiento básico de las celdas solares, las celdas de películas delgadas, los materiales semiconductores y el método de termo-voltaje, con el fin de presentar la importancia de saber la identificación del tipo de conductividad en las celdas solares (tipo P o N), ya que es fundamental para la construcción de las celdas y su unión P/N para la creación de un campo de fuerza eléctrica fundamental para la generación de la energía.

2.1 CELDAS SOLARES

Con el paso de los años, se comenzó a masificar el uso de las celdas solares debido a que se quiere suplirla escasez del petróleo, disminuir efectos negativos en el ambiente y garantizar la seguridad energética entre otros. Por estos motivos se ha incentivado la investigación en temas relacionados con la energía solar. En la figura 2, se encuentra plasmado el mejoramiento de la eficiencia de conversión con el transcurrir de los años[6].

Figura 2. Evolución de la Eficiencia en celdas solares [12]



Entre los desarrollos tecnológicos más importantes que en materia de fabricación de celdas y módulos solares se han logrado hasta el momento se destacan los siguientes:

- Celdas basadas en películas delgadas de CIGS con las cuales se han reportado eficiencias máximas del 20.4%.
- Celdas sensibilizadas con colorantes (DSSC) o electroquímicas con las cuales se han logrado eficiencias 14.1%.
- Celdas orgánicas basadas en polímeros conductores: eficiencias del 11.1%.
- Actualmente presentan bajas eficiencias, sin embargo son de muy bajo costo, lo que permite pensar a futuro en una relación eficiencia/costo mayor que el de otros tipos de celdas.

- Celdas tipo tandem o multi-juntura: con las cuales se han logrado eficiencias de conversión mayores del 40 % cuando son iluminadas con radiación solar concentrada ($10^6 [W/m^2]$), siendo una tecnología bastante costosa.
- Celdas basadas en películas delgadas de CZTS con las cuales se han reportado eficiencias del 11.1%.
- Celdas híbridas órgano-inorgánicas empleando estructuras tipo Perovskita con eficiencias de 14.1%[5].

Las celdas solares son dispositivos diseñados para la conversión de energía solar en energía eléctrica directamente, su funcionamiento se basa en la estructura interna de unión de semiconductores tipo p-n. Cuando la radiación solar incide sobre la celda, genera pares de electrón-hueco (portadores de carga libres), los cuales son capaces de fluir a través de un circuito externo y generar energía eléctrica. La producción de portadores de carga es directamente proporcional a la intensidad de irradiación solar[13]. La energía solar (fotones) que incide sobre una celda solar, tiene específicamente tres opciones de influencia, la primera es cuando hay transmisión de fotones, ésta sucede cuando la energía del fotón es menor que la del ancho de banda prohibido del semiconductor, por lo que no intervendrá en la generación de corriente, otra de las opciones es la absorción de fotones donde se dice que el fotón posee la energía mínima para que un electrón pase a la banda de conducción generando un par de electrón-hueco, por último el fotón contiene mucha energía que hace que un electrón pase a la banda de conducción y se disipe el exceso de energía en calor.

Unas de las principales características que poseen las celdas solares para su aplicación son:

- Fácil uso.
- Generan bajas tensiones pero se pueden interconectar para producir altas tensiones.

- No requieren mantenimiento (ocasionalmente limpiarlas).
- No almacenan la energía.
- Son costosas.
- Funcionan en días nublados pero disminuye la energía generada hasta un 10%.
- La eficiencia es alrededor del 13%, teóricamente se pueden lograr eficiencias de hasta un 50%, en laboratorio se han logrado fabricar celdas con eficiencias superiores al 30%.
- Están diseñadas para durar al menos 30 años e incluso cuentan con garantías de 20 años.
- Soportan todos los rigores del medio ambiente, la cubierta superior es de vidrio templado bajo contenido de hierro y lámina con una capa plástica. Ésta construcción es de gran duración y alta resistencia al impacto[14].

2.2 FUNCIONAMIENTO BÁSICO DE UNA CELDA SOLAR

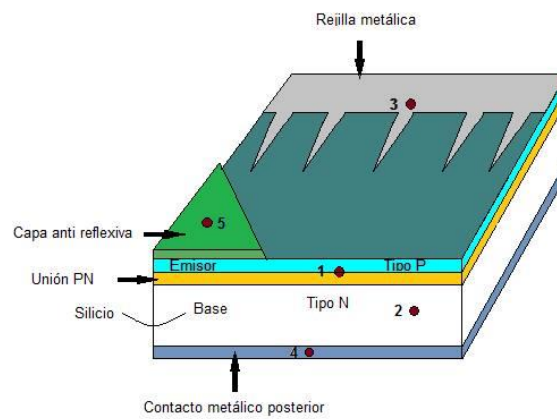
Un dispositivo fotovoltaico convierte la energía solar en energía eléctrica, mediante un fenómeno físico llamado efecto fotovoltaico. Este incluye los siguientes procesos:

1. Generación de portadores de carga (huecos y electrones) en el semiconductor mediante absorción de fotones.
2. Generación de corriente eléctrica a través del campo eléctrico interno que se forma en la zona de carga espacial (ZCE), mediante la unión de un semiconductor tipo n con uno tipo p.

Una celda solar de silicio mono o poli cristalino está compuesta de al menos dos láminas de silicio, una dopada con elementos con menos electrones de valencia que el silicio, denominada p y otra con elementos con más electrones de valencia que los átomos de silicio, denominada n (ver figura 3). Aquellos fotones procedentes del sol, inciden sobre la superficie de la capa p que al interactuar con el material liberan electrones de los átomos de silicio, los cuales, en movimiento atraviesan la

capa del semiconductor. La capa n adquiere una diferencia de potencial respecto a la p. Si se conectan conductores eléctricos a ambas capas y estos, a su vez, se unen a un elemento eléctrico consumidor de energía, iniciará una corriente eléctrica de valor continuo [9].

Figura 3. Proceso que ocurre en una celda solar de silicio cristalino[15].



A continuación de la figura 3 se presentan las partes más importantes de una celda solar y su funcionamiento:

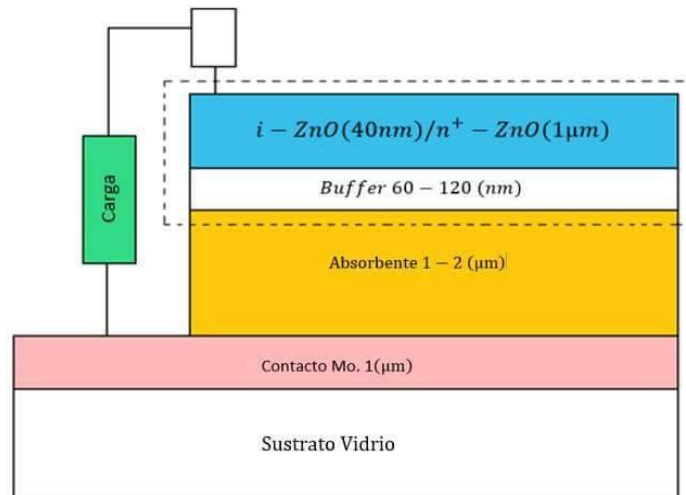
1. **Unión PN:** Capa que se encuentra de cara al sol donde se forma un campo eléctrico que conduce a la separación de las cargas (electrones y huecos) liberadas por los rayos solares.
2. **Capa base:** La capa está conformada por los semiconductores.
3. **Rejilla metálica frontal:** La celda solar posee contactos metálicos que se encuentran en la parte frontal y posterior de la celda, cuyo propósito es poder recolectar los watts generados mediante el efecto fotovoltaico. Dado que en la cara que esta frente al sol debe dejar pasar cuanto luz sea posible, los contactos son aplicados en la forma de una estructura arbolar o una estructura delgada.

4. **Rejilla metálica posterior:** Al contrario que en la pared frontal, para “imprimir” los contactos metálicos en la capa posterior de la celda se utiliza una pasta de aluminio o de plata.
5. **Capa anti-reflexiva:** Para reducir la reflexión de la luz se deposita una capa delgada (capa antirrefleitora) de nitruro de silicio u oxido de titanio en la capa frontal de la celda solar[15].

2.3 CELDAS SOLARES TIPO PELÍCULAS DELGADAS

Las celdas tipo película delgada se componen de capas de distintos materiales, cuyos espesores varían entre 20 [nm] y 5 [μm]; el área activa de una celda solar de este tipo presenta un espesor máximo de 7-8[μm], debido a esto se denominan celdas de película delgada. En la figura 4 se presenta el esquema básico de una celda solar de película delgada. Las celdas están constituidas por dos contactos eléctricos, la capa absorbente y la ventana óptica que a su vez está conformada por un oxido conductor transparente y por la capa buffer. Las celdas solares se fabrican de manera estratificada, es decir que el material crece uno encima del otro. Con el objetivo de reducir las pérdidas de fotocorriente en celdas tipo heterojuntura, se fabrican siguiendo un concepto denominado capa absorbente–ventana óptica [5].

Figura 4. Sección transversal de una celda solar con estructura ventana óptica / capa absorbente [5].



Una unión P-N provoca un elevado gradiente de concentración de portadores en las proximidades de la unión. De hecho, lo que se observa es por un lado, una corriente de difusión de huecos de la región P hacia la región N y por otro, una corriente de difusión de electrones de la región N hacia la P. Pero además, la marcha o difusión de estos portadores de su región inicial a la otra deja al descubierto algunos iones fijos en la red cristalina. Dicha zona es llamada zona de agotamiento o zona de carga espacial (ZCE) y es una región en que no existen ni electrones ni huecos, pero contiene átomos dadores ionizados positivamente a un lado y átomos aceptores ionizados negativamente al otro lado[16].

A continuación se mencionan las principales características de los componentes de la celda solar de película delgada:

- **capa absorbente:** absorbe la mayor cantidad de radiación solar, con el fin de generar una alta fotocorriente ya que la presencia de un gran campo eléctrico en la ZCE separará los portadores generados dentro de esta zona para poder

generar la fotocorriente y adicionalmente contribuirá a reducir las pérdidas de la misma asociadas a procesos de recombinación en estados de interface.

- **ventana óptica:** constituida por la capa buffer y el óxido conductor transparente (TCO) que tiene como función permitir que la mayor radiación solar llegue a la capa absorbente, además favorece la generación del campo eléctrico en la ZCE del dispositivo, protege la superficie de la capa absorbente durante la deposición del TCO, disminuye la cantidad de defectos interfaciales entre la capa absorbente y el TCO mejorando el acople entre las dos capas. La capa buffer reduce procesos interdifusivos hacia o desde la capa absorbente. La importancia de ésta capa se ve en el incremento de la eficiencia de la celda solar.

Los materiales que se utilizan como capa buffer deben ser altamente transparentes a la radiación incidente, deben presentar un E_g superior a 2,4 [eV]; deben tener espesores del orden de 50 nm – 150 nm para que la absorción de radiación sea baja y deben presentar una estructura cristalina definida[17].

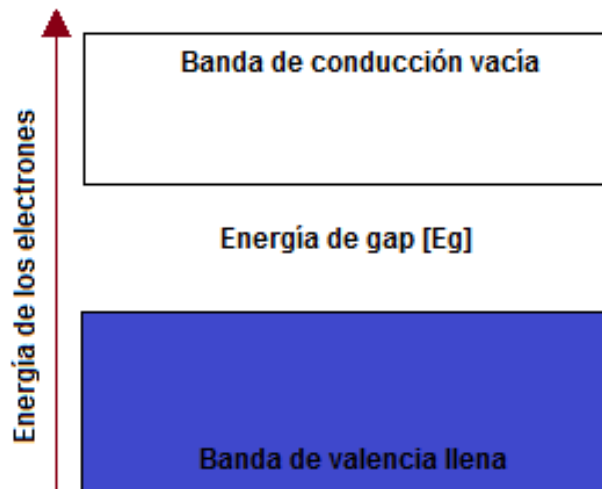
Como se evidencia, la parte más importante de la celda está conformada por la unión de los semiconductores con conductividad n y p.

2.4 SEMICONDUCTORES

Un semiconductor es un material que presenta conductividades entre los conductores y aislantes. Está conformado por bandas de energía separadas por una brecha de energía prohibida o gap. Las propiedades electrónicas del material se determinan por la distribución de los electrones en las bandas (Figura 5), las ocupadas con mayor energía se conoce como banda de valencia, mientras que la banda superior, llamada banda de conducción se encuentra vacía; para lograr que el material logre conducir corriente eléctrica se debe aplicar energía hasta superar

el gap, logrando que los portadores pasen de la banda de valencia a la banda de conducción[7].

Figura 5. Diagrama de bandas de energía de semiconductores



La conducción en un semiconductor se debe no sólo a los electrones (portadores negativos) en la banda de conducción, sino también por el movimiento de agujeros (portadores positivos) en la banda de valencia. Cuando un electrón adquiere la energía necesaria para superar el gap "salta" de la banda de valencia a la banda de conducción, dejando un agujero en la banda de valencia. Por tal motivo se dice que la conductividad de los semiconductores es aproximadamente proporcional a la densidad de portadores de carga[9].

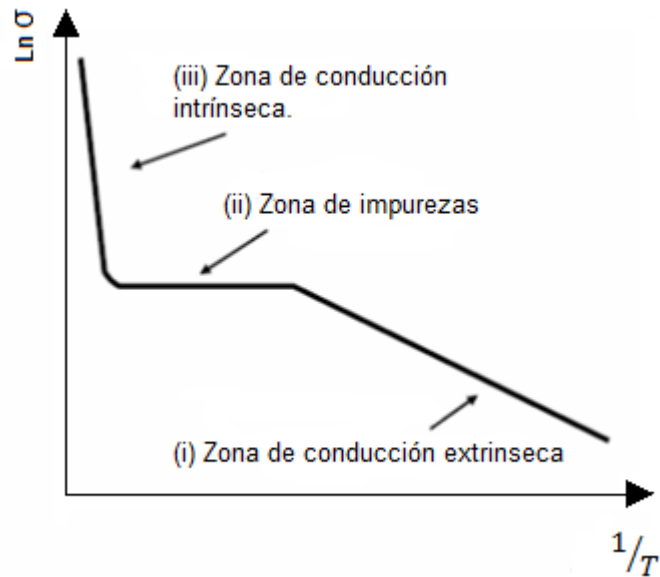
El transporte de carga por un material depende del movimiento de portadores a través del mismo, pasando de unos estados electrónicos a otros. La temperatura incide en el movimiento de la carga, ya que a mayor temperatura, mayor será el transporte de la carga y a su vez mayor será su conductividad. A bajas temperaturas los semiconductores tienden a comportarse como aislantes. Si el semiconductor contiene una mínima cantidad de impurezas poseerá conductividad apreciable

desde temperaturas relativamente bajas. Un semiconductor en su forma más pura se denomina semiconductor intrínseco, si se le agregan impurezas es llamado extrínseco y se dice que está dopado.

La dependencia de la conductividad (σ) de los semiconductores con la temperatura (T) muestra en general un comportamiento similar al mostrado en la Figura 6. Se evidencian tres rangos de temperatura.

- i. La conducción extrínseca se da a temperaturas bajas, y según aumenta la temperatura aumenta el número de portadores por activación térmica de las impurezas
- ii. A temperatura moderada no se presenta un cambio apreciable en el número de portadores con el cambio de temperatura, debido a que se produce una saturación de la ionización de las impurezas.
- iii. En este rango se transfieren portadores desde la banda de conducción a la banda de valencia y predomina la conducción intrínseca mediante la excitación térmica[7].

Figura 6. Comportamiento de la conductividad al variar la temperatura de un semiconductor[7].



En la figura 6, se presenta el aumento de temperatura de los semiconductores tomado desde la zona de conducción extrínseca hasta la zona de conducción intrínseca, de las cuales se irán a trabajar las zonas de conducción de impurezas y la extrínseca, ya que en estas zonas se encuentran conduciendo las impurezas del material; si se llegara a pasar el límite de temperatura de la zona de impurezas, la conducción estaría dada por el material base, produciendo una lectura errónea del dopado de la película delgada.

2.5 MÉTODO DE TERMO-TENSIÓN

En el estudio de propiedades de materiales semiconductores, es muy importante la síntesis y caracterización, puesto que permite determinar las aplicaciones tecnológicas de los materiales[18].

En la práctica, rara vez se mide la termo-tensión absoluta del material de interés. Esto se debe a electrodos conectados a un voltímetro, deben estar colocados sobre el material semiconductor para medir la tensión termoeléctrica. El gradiente de temperatura en los electrodos también induce una tensión termoeléctrica a través de una de las puntas del elemento medidor. Por lo tanto la termo-tensión medida es una contribución entre la termo-tensión del material de interés y el material de los electrodos [19].

La Termo-tensión de un material mide la magnitud de una tensión termoeléctrica inducida en respuesta a una diferencia de temperatura a través de ese material, la termo-tensión tiene unidades de (V/K), aunque en la práctica es más común usar micro-voltios por kelvin. Los valores en los cientos de $\mu\text{V/K}$, negativos o positivos, son típicos de buenos materiales termoeléctricos. El término termo-tensión mide la tensión o campo eléctrico inducido en respuesta a la diferencia de temperatura. Una diferencia de temperatura aplicada genera portadores mayoritarios cargados en el material, si hay electrones o huecos, para difundirse desde el lado caliente al lado frío, similar al gas clásico que se expande cuando se calienta. Portadores móviles cargados migran al lado frío dejando atrás su núcleo inmóvil opuestamente cargado, dando origen así la tensión termoeléctrica (termoeléctrica se refiere al hecho que la tensión es creada por una diferencia de temperatura). Puesto que una separación de carga también crea un potencial eléctrico, la acumulación de portadores cargados en el lado frío finalmente cesa en algún valor máximo, ya que existe una cantidad de portadores cargados derivados movidos al lado caliente como resultado del campo eléctrico en equilibrio. Sólo un incremento en la diferencia de temperatura puede reanudar una acumulación de más portadores de carga en el lado frío y así conllevar a un incremento en la tensión termoeléctrica [20].

En la actualidad el estudio de propiedades de transporte eléctrico de materiales semiconductores, se lleva a cabo a través de diversas técnicas muy bien establecidas, tales como el efecto hall y la conductividad eléctrica. Esta técnica de

caracterización consiste básicamente en estimular el sistema bajo estudio (película delgada semiconductor) por medio de un gradiente de temperatura pequeño, y como consecuencia de este gradiente el sistema exhibe una diferencia de potencial denominada termo-tensión. La razón entre la termo-tensión y la diferencia de temperatura es lo que da como resultado el coeficiente cinético denominado termopotencia o coeficiente Seebeck (α)[19].

En el capítulo anterior se dio a conocer el funcionamiento básico de una celda solar, la conductividad en los semiconductores y el efecto que tienen ellos al aplicarle energía térmica; esto se estudió con el fin de diseñar e implementar un modelo funcional mostrado en el siguiente capítulo.

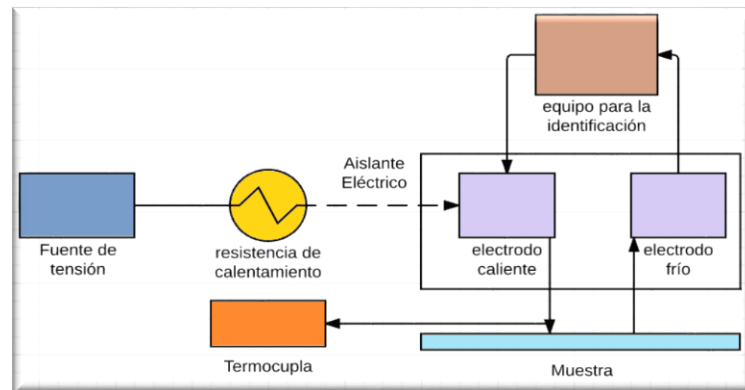
3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

El diseño y la implementación de este modelo funcional para identificar el tipo de conductividad en películas delgadas semiconductoras se realizó en la Universidad Industrial de Santander, con el fin de apoyar en la caracterización de películas delgadas semiconductoras sintetizadas por el grupo GISEL (Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica).

A continuación se presenta una breve descripción de lo que se diseñó e implementó en el modelo funcional, sus partes más importantes y los equipos que se utilizaron para demostrar el método de termo-tensión.

En la figura 7 se presenta un esquemático de los elementos que constituyen el montaje y la realización de las pruebas de termo-tensión. El experimento se constituye de un modelo que permita un fácil manejo, dos electrodos de igual material (uno con un gradiente de temperatura y el otro a temperatura ambiente), unas muestras de películas delgadas semiconductoras a las cuales se les hallará el tipo de conductividad, un equipo para la identificación, una fuente de DC la cual irá conectada a la resistencia con el electrodo de mayor temperatura y una termocupla que mida la temperatura a la que se debe llegar con el electrodo.

Figura 7. Esquemático para la prueba de termo-tensión [20].



En este capítulo se presentará de forma secuencial los procesos y métodos que se realizaron para el diseño e implementación del modelo funcional.

3.1 SELECCIÓN DEL MATERIAL DE CONTACTOS Y ELECTRODOS

La primera etapa de diseño es la elección del material a trabajar en la que se investigó las características de los diferentes metales más utilizados para la conducción de la energía térmica y eléctrica.

En los metales, la conductividad eléctrica está controlada por la movilidad de los electrones, únicos portadores de carga, que se mueven libremente debido a la ausencia de una brecha de energía prohibida (gap). La correlación entre la conductividad eléctrica y calorífica de los materiales seleccionados inicialmente se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Conductividades eléctricas y térmicas de varios metales a temperatura ambiente[21].

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (W/m*K)	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (m²/S)	PRECIO CO\$/Gramo fino
Plata	174	429	1201,91
Cobre	117	401	13,83
Oro	127	317	88723,75
Aluminio	97,1	237	3,93

Con base en la tabla 1, se estableció que la plata es el material más conveniente a utilizar en los electrodos y los contactos del modelo funcional, ya que este permite una conductividad eléctrica y a su vez una conductividad térmica [22], debido a que la cantidad de energía transmitida depende del número de electrones excitados y de su movilidad, factores que controlan la conductividad eléctrica.

Para la elaboración de los electrodos en plata, se tuvo la de la escuela de metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander, donde las medidas que se adecuaron para los electrodos fueron de 10 cm de largo y 5 mm de diámetro en forma de cilindro, éstas medidas fueron tomadas con la característica del largo del modelo y para la disminución de la resistencia de las puntas, la terminación de los electrodos de forma cónica permite la transferencia de temperatura hacia la muestra.

Con el fin de comprobar que el material adquirido como conductor térmico fuese plata, se realizó una prueba química, en la cual se utilizó un compuesto catalogado como agua regia; el cual está conformado por una mezcla de ácido nítrico y ácido clorhídrico, concentrado en la proporción de uno a tres respectivamente (HCL:HN03-3:1)[23]. Para la prueba se depositó este líquido sobre una muestra de la plata adquirida, de acuerdo a la teoría, si el material se vuelve de color verde es

una aleación, y si se vuelve de color marrón o negro es plata. Esta verificación se realizó con la colaboración de la profesora Verónica García de la Escuela de Química. En la figura 8 se puede evidenciar que los resultados obtenidos después de realizar esta prueba, es efectivamente plata.

Figura 8. Foto tomada a una porción de plata empleada para fabricar los contactos y electrodos. Esta prueba se realizó en el laboratorio II de química inorgánica de la UIS.



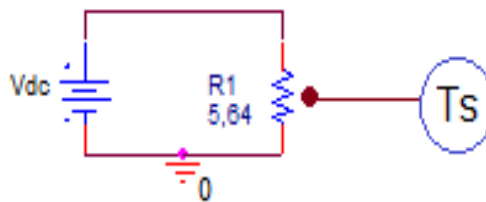
3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA RESISTENCIA DE CALENTAMIENTO

Luego de construir y verificar el material a trabajar, se da paso a la elección de la resistencia que ira ligada a uno de los electrodos en prueba para adquirir temperatura. Para la elección de esta resistencia se tienen en cuenta como especificación una conductividad eléctrica y térmica que dará paso al calor sin que se dañe o deforme. Teniendo en cuenta estos dos criterios, se elige una resistencia Thermocoax, donde el aumento de temperatura es rápido y puede alcanzar 250° C, permitiendo la excitación de portadores para que el proceso de difusión de electrones que se lleve a cabo[24].

Para demostrar que el material elegido cumple con las especificaciones requeridas, es necesario observar el comportamiento de la resistencia Thermocoax ante un

aumento de tensión, esto con el fin de seleccionar las temperaturas a trabajar en el método de termo-tensión; para examinar ese comportamiento se realizó un montaje el cual se presenta en la figura 9, este se compone de una fuente DC variable que permite modificar los valores de tensión inducidos en la resistencia Thermocoax, donde la corriente generada en el circuito crea un incremento de temperatura medido por la termocupla.

Figura 9. Esquema para la caracterización de la resistencia Thermocoax



A continuación se presenta en la tabla 2 los diferentes tipos de tendencia de los resultados obtenidos en la caracterización de la resistencia, con el fin de saber el comportamiento de la resistencia al aumento de la temperatura.

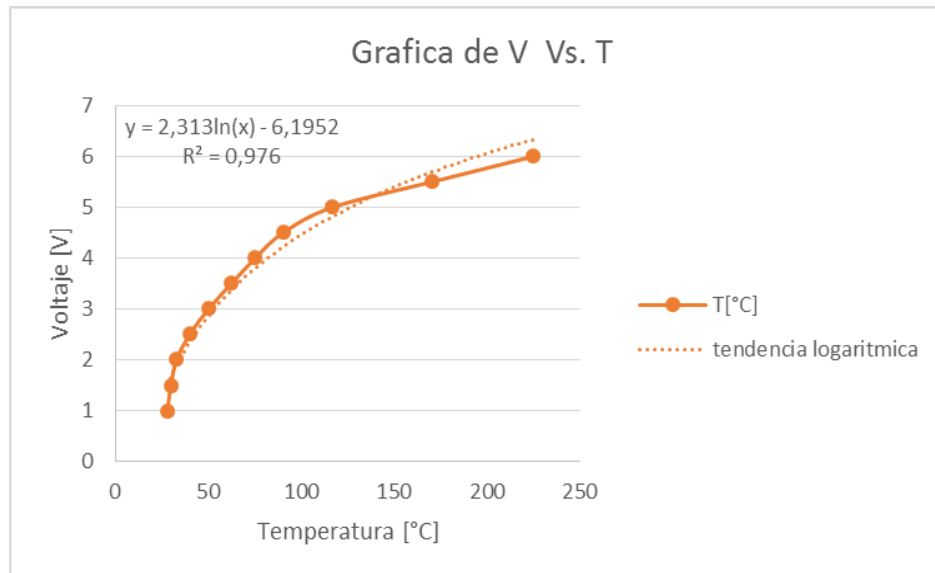
Tabla 2. Ecuación y valor de R² para las distintas líneas de tendencias

Tendencia	R ²	Ecuación
Logarítmica	0,976	$y = 2,313\ln(x) - 6,1952$
Potencia	0,8664	$y = 0,1356x^{0,7447}$
Polinómica	0,9664	$y = -0,0002x^2 + 0,0653x - 0,1013$

De acuerdo a la tabla 2 se determinó que la línea de tendencia que más se ajusta a la realidad es la logarítmica, ya que ésta es más precisa cuando su coeficiente de correlación (R²) tiende a 1. Esto se realiza con el fin de identificar temperaturas puntuales que permitan obtener datos para la selección del material aislante, ya que

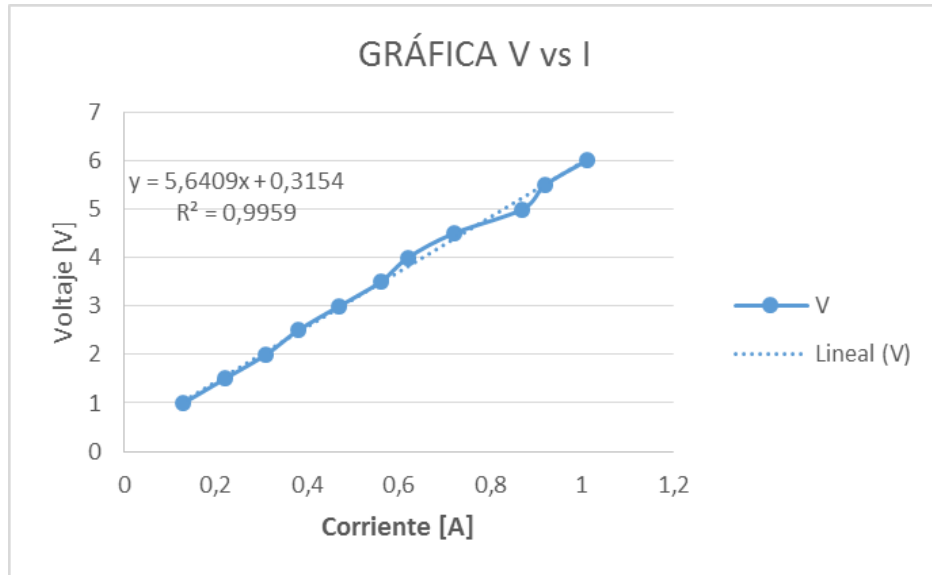
este debe tener un límite de temperatura el cual seguirá trabajando como aislante eléctrico. El valor del coeficiente de correlación calculado se presenta en la figura 10.

Figura 10. Curva Temperatura [° C] Vs. Tensión [V]



Para obtener el valor óhmico de la resistencia, se realizó una curva de tensión vs corriente, con el fin de calcular la potencia consumida por la resistencia al momento de elegir el voltaje de trabajo, en la figura 11 se presenta la pendiente para poder obtener el valor de la resistencia Thermocoax, el cual da como resultado 5,64 [Ω].

Figura 11. Curva Corriente Vs. Tensión para identificar el valor óhmico del Thermocoax.



3.3 AISLANTE ELÉCTRICO ENTRE EL ELECTRODO Y LA RESISTENCIA THERMOCOAX

Posteriormente a la asignación de la resistencia de calentamiento, se busca la forma de aislar el electrodo que irá ligado a ella, esto con el fin de evitar el paso de corriente de la fuente de tensión hacia el instrumento de medición; a continuación evaluaremos una pequeña gama de materiales aislantes eléctricos para asignar el más adecuado.

Para la medición de tensión se deben tener en cuenta los distintos factores que pueden afectar la identificación, uno de estos factores son las corrientes de fuga que se presentan entre la resistencia Thermocoax y el electrodo de mayor temperatura; estas corrientes se dan debido a las altas conductividades eléctricas de los materiales. Sabiendo esto es inherente la búsqueda de un material que permita aislar eléctricamente los elementos en contacto, permitiendo la mayor

transferencia de temperatura entre ellos, además el material escogido debe soportar como máximo 150° C sin dañarse o deformarse, debido a que el Thermocoax se trabajará máximo a esa temperatura, esto con el fin de asegurar que en todo momento de la prueba se conserve el aislamiento eléctrico. En la tabla 3 se observan algunos materiales a tener en cuenta para su utilización.

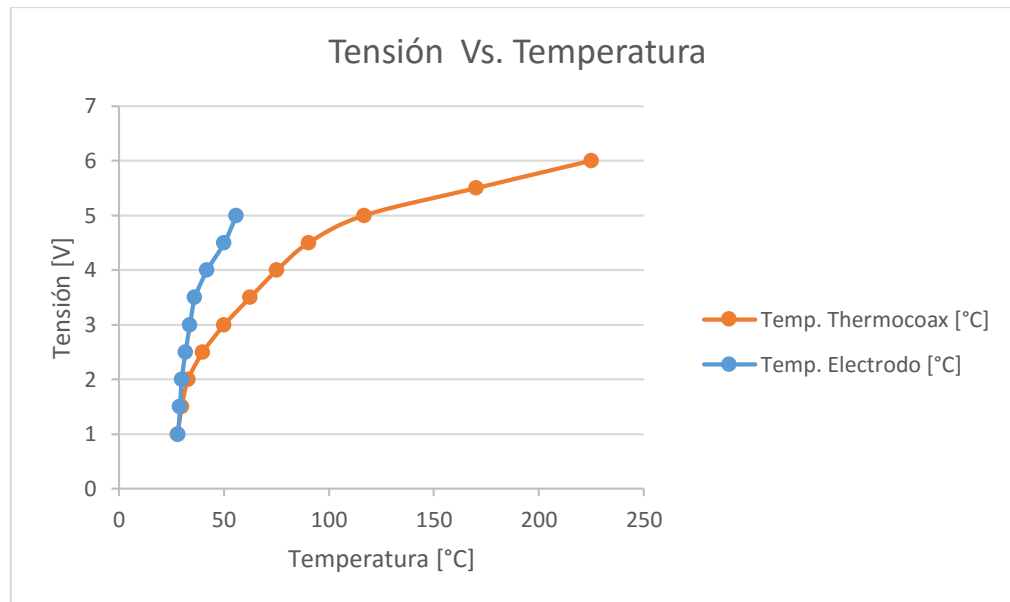
Tabla 3. Característica de los posibles aislantes resistentes a la temperatura

Material	conductor eléctrico	conductor térmico	temperatura máxima
polietileno [25]	No	No	100°C
scotch69 [26]	No	Si	200°C
MTN Industria [27]	Si	Si	600°C
Anti-solder[28]	No	Si	250°C

Como se presenta en la tabla 3, sólo dos materiales cumplen con las especificaciones establecidas, se decide utilizar la cinta scotch 69, ya que una de las ventajas que tiene este materiales llegar a temperaturas de los 200° C y la temperatura máxima a la que se debe llegar es de 150°C, además este material no necesita ser importado en comparación al anti-solder, esto reduce costos y tiempo de adquisición, que son un ente importante al momento de realizar el proyecto.

Adicionalmente de las pruebas del material Thermocoax, se realizan pruebas con el aislante y el electrodo conectado, con el fin de caracterizar la atenuación de temperatura ofrecida por el elemento aislante, los datos se pueden observar en la figura 12.

Figura 12. Atenuación de la temperatura debido al aislante



De la figura 12 se puede concluir que el aislante eléctrico es mejor conductor térmico cuando no se expone a grandes temperaturas, por este motivo los voltajes menores a 4,5 [V] consumen las menores potencias y la transferencia de temperatura es mayor al 50%.

3.4 SELECCIÓN DE LA TEMPERATURA DE TRABAJO

Teniendo todos los materiales plenamente seleccionados, se procede a la elaboración de pruebas al electrodo para la selección de los valores a trabajar, donde se harán ensayos de tensión y temperatura ante el paso del tiempo; estas pruebas tendrán en cuenta algunos parámetros que se mencionan a continuación. Para una adecuada selección de la temperatura, se deben tener en cuenta dos parámetros importantes, el primero es trabajar en la zona de saturación de impurezas; ya que en esta región se puede detectar el tipo de impureza con la que se dopa el semiconductor, esta zona se presenta en la figura 6, en la zona de conducción intrínseca se identificará el tipo de conductividad del semiconductor sin

importar el dopaje al que ha sido expuesto, por esta razón se puede estar tomando una Identificación errónea del material. El segundo parámetro, está dado por los materiales seleccionados en el diseño del montaje funcional, ya que el aislante seleccionado soporta hasta 150° C y permite una transferencia de calor a 80° C, esto es una limitante a tener en cuenta ya que si la resistencia Thermocoax supera los 150° C en un tiempo determinado puede dañar el aislante y generar Identificaciones erróneas.

Para determinar la tensión de trabajo, se realiza una prueba que consiste en aplicar una tensión a la resistencia Thermocoax, la cual permite elevar la temperatura a uno de los electrodos, ésta medida de temperatura se tomó con la termocuplafluke 52 II en intervalos de 1 minuto hasta llegar a un tiempo de establecimiento de 6 minutos. Al finalizar cada medida, se dejó un tiempo de enfriamiento el cual evita alterar los datos de las medidas, los valores fueron registrados en la tabla 4.

Tabla 4. Variación de la temperatura del electrodo en función del tiempo, con tensiones constantes

voltaje [V]	Tiempo de la toma de datos desde que inicia la fuente DC					tiempo de enfriamiento
	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	
	temperatura en el contacto [°C]					
1	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	0:00
1,5	28,6	29,2	29,5	29,7	29,9	1:50
2	28,9	30,8	32,1	33,2	33,8	4:33
3	33,1	36,9	39,7	41,6	42	5:50
4	38,6	45,3	50,4	53,6	55,8	9:39
temperatura ambiente 28,2 [°C]						

Una característica para elegir la tensión, es tener un balance entre el aumento de temperatura y el tiempo de enfriamiento, esto con el fin de garantizar una medición eficiente y correcta, por tal motivo de la tabla 4 se elige el valor de 3 voltios, ya que su temperatura está en un rango de 33,1 a 43,8 [° C] permitiendo un delta de 10 [° C] y un tiempo de enfriamiento de 5'50''.

3.5 SELECCIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN

Con los parámetros asignados de temperatura y tensión, es necesaria la selección de un equipo de medición que cumpla con algunos criterios establecidos, esto con el fin de tener una correcta identificación al momento de realizar las pruebas.

Para la realización del método de termo-tensión, se requiere de un equipo de medición que satisfaga ciertos requerimientos para garantizar una identificación adecuada del tipo de conductividad en películas delgadas semiconductoras, los requisitos más importantes se mencionan a continuación: el equipo debe tener una alta sensibilidad para la medida de la diferencia de potencial sobre la película; debe tener una resolución del orden de los μV , alta resistencia de entrada y un bajo ruido. Teniendo en cuenta las anteriores especificaciones se consultaron equipos de medida disponibles en la UIS (ver tabla 5).

Tabla 5. Parámetros de los equipos de medición. keithley 2182A[29], hewlett packard 3478a[30] y keithley 196[31].

RESUMEN DE ESPECIFICACIONES					
PARÁMENTROS	Resolución de dígitos	Max. resolución:	Mín. resolución:	Ancho de Banda	Razón de rechazo del modo común (CMRR)
nanovoltmetro keithley 2182A	7 $\frac{1}{2}$ dígitos	1100 V	1 nV	300 KHz	140 dB
hewlett packard 3478a multimeter	5 $\frac{1}{2}$ dígitos	300 V	100 nV	300 KHz	130 dB
Keithley 196 System Digital Multimeter	6 $\frac{1}{2}$ dígitos	300 V	100 nV	300 KHz	120 dB

En las especificaciones presentadas en la tabla 5, se comparan los tres equipos con mejores parámetros para su elección, donde los números de dígitos permiten observar las pequeñas variaciones de tensión con resolución tanto mínima como máxima, el filtrado por variación de datos y el rechazo del modo común da una mayor amplificación de las medidas captadas por el instrumento, dicho lo anterior, el mejor equipo para la identificación del tipo de conductividad es el keithley 2182A, el cual cumple con los requisitos descritos, y se encuentra en el laboratorio de Integración Energética del Grupo de Investigación de Energía Eléctrica (GISEL). Los equipos hewlett packard 3478a y el keithley 196 no poseen el filtrado de variación de datos y poseen bajo el rechazo al ruido, por estas razones fueron descartados.

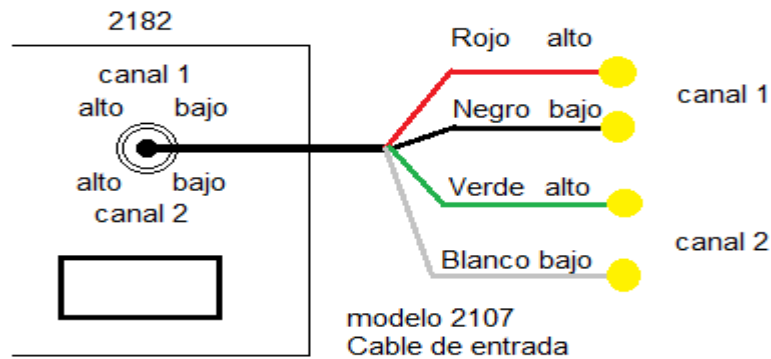
3.6 PROCEDIMIENTO PARA LA CONFIGURACIÓN DEL NANO-VOLTÍMETRO

Debido a que el uso del nano-voltímetro no es común, se realizó una breve descripción del manejo del equipo, funcionamiento y configuración los cuales se presentan a continuación:

Para el uso del nano-voltímetro se debe tener en cuenta las siguientes recomendaciones: no tocar los cables del test, remover las tensiones parásitas descargando capacitores, el chasis del instrumento solo debe ser conectado como protección mas no como tierra y por último no exceder los rangos de trabajo en cada canal.

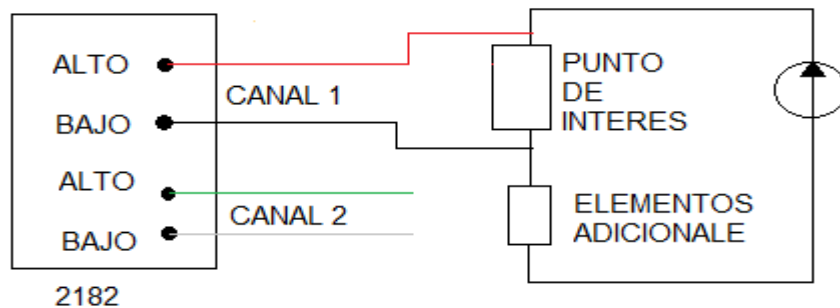
Al observar el nano-voltímetro lo primero que se debe tener en cuenta para su conexión es el conector de 2 canales, el cual para conectar se debe tener un cable modelo 2107 que está construido específicamente para tomar medidas de bajo nivel o de temperatura, en la figura 13 se enseña la unión del cable con el conector.

Figura 13. Conexión del cable 2107 al equipo 2182A[32]



Los rangos de trabajo definidos por el equipo son los siguientes: para el canal 1 (CH1) de 10 [mV] hasta 100 [V] con una resolución de hasta 1 [nV] y para el canal 2 (CH2) de 100 [mV] hasta 10 [V] con una resolución de hasta 10 [nV]; ya teniendo los canales plenamente identificados, se pasa a elegir el canal 1 ya que este ofrece una mayor resolución; para realizar la conexión, el cable rojo se conecta a tensión alta y el cable negro a tensión baja como se presenta en la figura 14.

Figura 14. Conexión para la medida de la tensión con equipo 2182A.[32]



El valor de tensión máximo que se puede suministrar en el nano-voltímetro es del 20% al rango seleccionado. Para obtener las resoluciones deseadas se necesita

tener en cuenta la cantidad de dígitos a utilizar. Al empezar la identificación se debe configurar el equipo en un cero relativo.

Al momento de realizar las pruebas se deben tener en cuenta dos parámetros importantes, el tiempo de respuesta y el ruido aplicado por la línea de alimentación, éstos se encuentran relacionados de forma inversamente proporcional, donde al mejorar un parámetro el otro disminuye y viceversa. Para la configuración de estos parámetros se tiene en cuenta el tiempo de respuesta, el cual se obtiene ajustando el número de ciclos de la línea de alimentación (NPLC); el valor que se elige es de 1 PLC ya que este permite que la velocidad y el ruido sean óptimos, esto se debe a que la configuración se realiza para una frecuencia de 60 HZ con el fin de evitar ruidos en la línea de alimentación y obtener datos para la identificación de forma instantánea ya que la temperatura en la superficie tienes a buscar el equilibrio térmico, este valor se obtiene pulsando el botón RATE hasta llegar al valor requerido.

Por último para obtener un resultado que no afecte la medida, el nano voltímetro tiene en la entrada un filtro pasa bajas de 20 [dB] con frecuencia de corte en 18 [Hz] y un retraso de la señal de 125 [ms], el filtro debe estar encendido (ON).

Para ajustar los filtros se necesita seguir los siguientes pasos:

1. Seleccionar la función DCV1
2. Oprimir la techa SHITF y luego TYPE muestra en la pantalla si el filtro analógico está activo o no.
3. Si se desea cambiar el estado de ON a OFF o viceversa se oprime RANGE ▲ o ▼.
4. Presione ENTER para mostrar si el filtro digital está activado o no.
5. El filtro digital se activa de la misma forma que el filtro analógico.
6. Presione ENTER para observar el valor del “filter Windows”.

7. Configúrelo como el paso 3
8. Presione ENTER para observar el valor del “filtercount”.
9. Configúrelo como el paso 3.
10. Presione ENTER para observar el “filtertype”
11. Configúrelo como el paso 3.
12. Presione ENTER para finalizar.

Con esta configuración se puede realizar la medida con una resolución adecuada. El procedimiento descrito anteriormente fue configurado para el canal 1 [33].

3.7 ESTRUCTURA DEL MODELO FUNCIONAL

Seleccionados todos los parámetros y equipos para la identificación del tipo de conductividad, se implementa un modelo construido en madera el cual permite tener como característica ser resistente a la temperatura y aislante eléctrico, criterios importantes para la construcción del modelo.

En el transcurso del trabajo de grado, el primer modelo implementado fue permitiendo descubrir mejoras que se podían reemplazar en un nuevo modelo, por lo que se construyeron dos, de los cuales, el primero se piensa implementar para realizar medidas de fotoconductividad y el segundo para la identificación del tipo de conductividad en películas delgadas semiconductoras.

Para el montaje del modelo funcional se tomaron en cuenta todos los elementos elegidos anteriormente, donde su criterio de selección fue el más conveniente. En la figura 15 se presenta la estructura del modelo funcional 1.

Figura 15. Estructura del modelo funcional 1 para la identificación del tipo de conductividad en películas delgadas semiconductoras.



En la figura 15, se observa el diseño del modelo funcional ya implementado, donde (1) representa las posiciones en las que pueden ser ubicados los electrodos y el movimiento en una dimensión de éstos; en (2), la movilidad de los electrodos a lo ancho del modelo y en (3), la base para depositar las muestras.

Para el diseño y construcción del modelo funcional se deseaba que fuera portable, que los electrodos presentaran movilidad en dos dimensiones y que además permitiera realizar pruebas a muestras de distintos tamaños. Para facilitar la portabilidad del modelo funcional, se debe garantizar una estructura de tamaño reducido y ligera, esto se consigue utilizando materiales ligeros como la madera MDF. La estructura diseñada permite el movimiento de los electrodos en 2D; para que el área donde se ubique la muestra sea suficientemente grande y así garantizar un buen contacto entre la muestra y los electrodos. Por último se tiene en la parte superior una cuadrícula de agujeros en una lámina de baquelita, para medir muestras con áreas mayores a $2 \text{ [cm}^2\text{]}$; la separación se hace con el fin de evitar la transferencia de calor por convección entre los dos electrodos, esta se representa con la siguiente ecuación:

$$Q = h * A * (T_s - T_g) \quad (3)$$

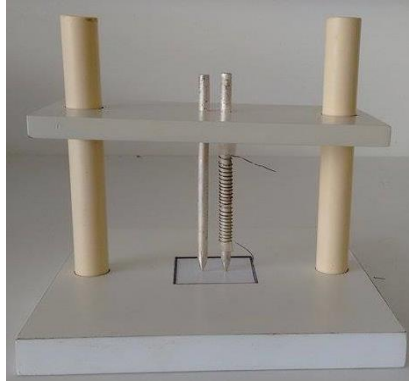
Donde Q es la distancia máxima a la cual el calor es transferido, h es el coeficiente de transferencia, Ts es la temperatura de la superficie y Tg es la temperatura del gas.

Para un medio como el aire, el coeficiente de transferencia de calor varia en un rango entre 5-25 [W/m²*K], donde el área superficial del elemento se toma como un rectángulo de altura 9 [cm] y una capa de transición de 1[mm], la temperatura promedio que se toma para la ciudad de Bucaramanga es de 302,15[K], y la temperatura máxima a la que se va a trabajar en el electrodo es de 323,15 [K], si se remplazan estos valores en la ecuación (3) se obtiene que la distancia mínima de transferencia es de 5[mm], por lo tanto para asegurar que no se transfiera el calor de uno de los electrodos al otro, se emplea una distancia entre los agujeros de la baquelita de 6 [mm][34].

Basados en el modelo descrito anteriormente, se hallaron nuevas formas de mejorar e implementar un modelo nuevo (ver figura 16), al cual se agregan las siguientes características:

- Realizar un movimiento vertical el cual caliente los electrodos de forma independiente de la muestra, esto con el fin de llegar a una temperatura establecida para ser aplicada a la muestra en el menor instante de tiempo.
- Permitir una mejor maniobrabilidad en las muestras.
- Mantener fija la distancia entre los electrodos para facilitar la estabilidad del modelo funcional.

Figura 16. Estructura del modelo funcional 2 para la identificación del tipo de conductividad en películas delgadas semiconductoras.



Los modelos presentados anteriormente se diseñaron y dibujaron en el programa solidwork, donde el modelo 1 (ver anexo A) y el modelo 2 (ver anexo B), presentan las distancias y medidas exactas que se realizaron para implementar y desarrollar a cabo las pruebas de termo-tensión.

Todas estas características fueron pensadas para asegurar que el modelo funcional se adaptará a las necesidades del usuario, teniendo mayor libertad en cuanto a la elección de las muestras de trabajo y así permitir la evaluación de muestras con diversas formas y tamaños. En el siguiente capítulo se muestra la operación del modelo funcional anteriormente diseñado e implementado.

3.8 PROCESO PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE CONDUCTIVIDAD

Luego de diseñar, elaborar e implementar el modelo funcional para la identificación del tipo de conductividad en películas delgadas semiconductoras, damos paso a la aplicación experimental del método de termo-tensión. Para la obtención de los resultados se realiza un procedimiento el cual se presenta en la figura 17 con su respectiva descripción.

Figura 17. Sistema usado para determinar el tipo de conductividad de materiales semiconductores a través de medidas de termo-tensión[35]. (a) Esquemático, (b) montaje final.

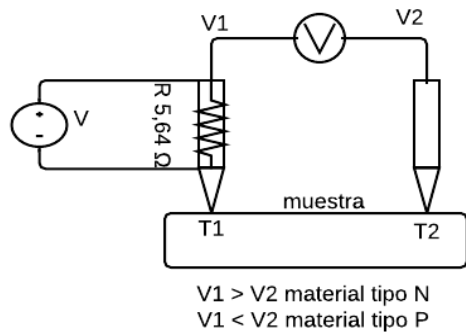


Figura 17. (a)



Figura 17. (b)

De la figura 17a, la conexión del nano-voltímetro con el modelo funcional corresponderá de forma que la tierra (cable negro) irá conectado al electrodo de mayor temperatura, y la señal (cable rojo) irá conectado al electrodo con temperatura ambiente. Esto con el fin de tomar como referencia que el tipo de conductividad P sea positivo y el N sea negativo.

El electrodo a calentar se le transferirá una temperatura por medio de una resistencia Thermocoax, la cual trabajará a una tensión de 3 [V] y una corriente de 0,45 [A] inducida por una fuente de DC, esta tensión generará variaciones de temperatura que ira ligado al tiempo, en estas variaciones se tomaron datos en intervalos de un minuto, hasta llegar a un punto de estabilidad. En la tabla 4 se especifica el rango de valor que se implementará, y las temperaturas a las cuales debe llegar el electrodo con la tensión proporcionada por la fuente. Cuando la temperatura en la punta llegue al valor de estabilidad, los electrodos descenderán hasta hacer contacto con la muestra durante 10 o 15 segundos, y dependiendo de

la conductividad del material generará una diferencia de potencial positiva o negativa según sea el caso.

Las muestras a medir son películas delgadas semiconductoras de las cuales se tiene: ZnS (tipo n), SnS (tipo p) y ZnS:In (tipo n). Estas películas estaban caracterizadas previamente.

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En esta sección se trabajará todo el proceso para realizar el montaje del modelo funcional diseñado e implementado, explicando el proceso para la obtención del tipo de conductividad en diferentes películas delgadas y comparándolos en una tabla con los registros.

4.1 VERIFICACIÓN DEL TIPO DE CONDUCTIVIDAD

La obtención y caracterización de las muestras a prueba fueron sintetizadas en la tesis doctoral “síntesis y caracterización de nuevos materiales no tóxicos empleados como capa buffer y capa absorbente en la fabricación de celdas solares”[35], desarrollada por la profesora Mónica Andrea Botero Londoño y realizada en el laboratorio de Celdas Solares de la Universidad Nacional de Colombia; éstas muestras fueron obtenidas con el fin de saber el tipo de conductividad del material para poder presentar una comparación con los resultados que se darán al realizar las pruebas de termo-tensión, los resultados de las muestras obtenidas en la tesis son presentadas en la tabla 6.

Tabla 6. Tipo de conductividad de las muestras

Muestra	Tipo de conductividad
ZnS	Tipo N
SnS	Tipo P
ZnS:In	Tipo N

A continuación se presenta en la tabla 7 los resultados obtenidos al realizar las pruebas con el modelo funcional utilizando el método de termo-tensión, donde se presenta el signo de la tensión y su representación para el tipo de conductividad.

Los datos obtenidos fueron realizados en el laboratorio 308 del Parque Tecnológico de Guatimar de la Universidad Industrial de Santander. Vv1 v2

Tabla 7. Resultados obtenidos con la prueba de termo-tensión e identificados con el nano-voltímetro.

nano-voltímetro keithley 2182a Prueba 1						
MUESTRA	temperatura en contacto					tipo de conductividad
	Signo					
	33,1 [°C]	36,9 [°C]	39,7 [°C]	41,6 [°C]	42 [°C]	
ZnS - H11	v1> v2	v1> v2	v1> v2	v1> v2	v1> v2	N
ZnS:In - 15A	v1> v2	v1> v2	v1> v2	v1> v2	v1> v2	N
ZnS - 03	v1> v2	v1> v2	v1> v2	v1> v2	v1> v2	N
ZnS - 02	v1> v2	v1> v2	v1> v2	v1> v2	v1> v2	N
ZnS - H7	v1> v2	v1> v2	v1> v2	v1> v2	v1> v2	N
ZnS:In - 5A	v1> v2	v1> v2	v1> v2	v1> v2	v1> v2	N
SnS	v1< v2	v1< v2	v1< v2	v1< v2	v1< v2	P

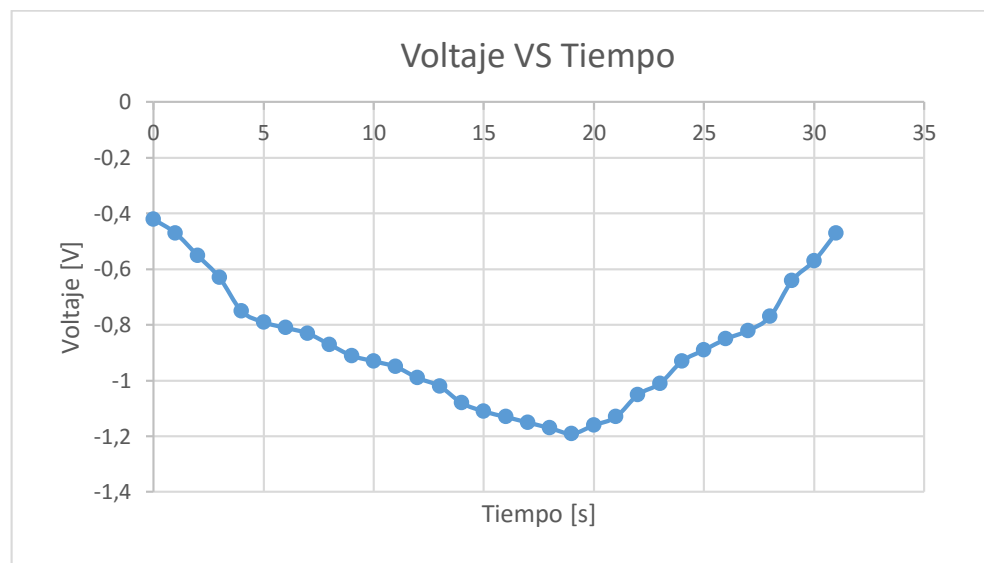
Con los resultados obtenidos, se realiza un análisis en las muestras de películas delgadas semiconductoras de los distintos materiales como el ZnS y el ZnS:In, estos semiconductores son de distintos compuestos pero con igual tipo de conductividad, esto se debe a que el material ZnS se le agregan más cargas negativas del material In o viceversa, las cuales hacen que el material obtenga más portadores libres.

Adicionalmente se demuestra que las películas delgadas de materiales semiconductores no varían con respecto al tiempo y la temperatura en el rango establecido. Si la temperatura se eleva a un rango mayor del asignado, el semiconductor puede entrar en la región de conducción intrínseca, donde los rangos de temperaturas varían dependiendo de la cantidad de impurezas con los que se haya dopado el material. Los valores de temperatura para las pruebas no están

seleccionados para operar al límite, ya que se tienen semiconductores de la misma composición pero de diferentes concentraciones.

Se observó que al momento de aplicar el calor a la muestra, su valor en tensión crecía exponencialmente hasta llegar a un punto máximo, para luego tener una caída de la misma forma, este proceso duró entre un intervalo de 30 a 35 segundos máximo, a continuación se presenta la figura 18 para observar el comportamiento.

Figura 18. Curva de Termo-tensión VS Tiempo



El comportamiento de la figura 18 se debe a que la muestra al entrar en contacto con el calor, la temperatura empieza a desplazarse y en cuestión de segundos ocurre un equilibrio térmico.

Para demostrar que los resultados obtenidos fueran exactos, se realizaron dos pruebas de repetitividad en la que se demostró la veracidad del método de termo-tensión. La prueba 1 se realizó en el laboratorio GISEL (Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica) en el campus principal de la Universidad Industrial

de Santander, y la prueba 2 se realizó en el Parque Tecnológico de Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander. A continuación se presenta en la tabla 10 los resultados obtenidos.

Tabla 8. Verificación de la repetitividad para el método de termo-tensión

Muestra	Tipo de conductividad	
	Prueba 1	Prueba 2
ZnS - H11	N	N
ZnS:In - 15A	N	N
ZnS - 03	N	N
ZnS - 02	N	N
ZnS - H7	N	N
ZnS:In - 5A	N	N
SnS	P	P

Al comprobar que los resultados de las pruebas a efectuar fueron arrojadas en unidades de voltios, se realizaron pruebas con varios equipos de medición con multímetros como Fluke 179[36] (ver tabla 8) y Fluke CNX 3000[37] (ver tabla 9).

Tabla 9. Resultados obtenidos con la prueba de termo-tensión e identificados con el Fluke 179

fluke 179						
MUESTRA	temperatura en contacto					tipo de conductividad
	Signo					
	33,1 [°C]	36,9 [°C]	39,7 [°C]	41,6 [°C]	42 [°C]	
ZnS - H11	- / +	- / +	- / +	- / +	- / +	No identificado
ZnS:In - 15 ^a	- / +	- / +	- / +	- / +	- / +	No identificado
ZnS - 03	- / +	- / +	- / +	- / +	- / +	No identificado
ZnS - 02	- / +	- / +	- / +	- / +	- / +	No identificado
ZnS - H7	- / +	- / +	- / +	- / +	- / +	No identificado
ZnS:In - 5 ^a	- / +	- / +	- / +	- / +	- / +	No identificado
SnS	- / +	- / +	- / +	- / +	- / +	No identificado

Tabla 10. Resultados obtenidos con la prueba de termo-tensión e identificados con el Fluke CNX3000

fluke CNX 3000						
MUESTRA	temperatura en contacto					tipo de conductividad
	Signo					
	33,1 [°C]	36,9 [°C]	39,7 [°C]	41,6 [°C]	42 [°C]	
ZnS - H11	- / +	- / +	- / +	- / +	- / +	No identificado
ZnS:In - 15A	- / +	- / +	- / +	- / +	- / +	No identificado
ZnS - 03	- / +	- / +	- / +	- / +	- / +	No identificado
ZnS - 02	- / +	- / +	- / +	- / +	- / +	No identificado
ZnS - H7	- / +	- / +	- / +	- / +	- / +	No identificado
ZnS:In - 5A	- / +	- / +	- / +	- / +	- / +	No identificado
SnS	- / +	- / +	- / +	- / +	- / +	No identificado

Los resultados obtenidos de las tablas 9 y 10 no fueron los esperados porque la identificación no fue posible, ya que los equipos utilizados no poseen una resolución y un rechazo al ruido tan precisas como el del nano-voltímetro.

Con todo el estudio de los materiales semiconductores, el diseño e implementación del modelo funcional y los resultados arrojados por la prueba realizados en todos los capítulos anteriores, se entrará a concluir el conocimiento generado por este trabajo de grado.

5. RECOMENDACIONES

- Mejorar el diseño del modelo funcional para optimizar una mejor movilidad al momento de realizar las pruebas.
- Optimizar el aislamiento del electrodo con la resistencia para disminuir pérdidas por transferencia de calor.
- Automatizar el sistema que permita la obtención de los resultados.
- Limpiar los electrodos del óxido en cada uso para evitar errores en la identificación del tipo de conductividad.
- El modelo funcional que se construyó al inicio del proyecto, se piensa adaptar para realizar medidas de fotoconductividad.

6. CONCLUSIONES

Este trabajo de grado estuvo enmarcado en el diseño, elaboración e implementación de un modelo funcional, de fácil uso y acceso, el cual permite la identificación del tipo de conductividad en películas delgadas semiconductoras, realizado con el método de termo-tensión. A continuación presentamos los aportes más importantes obtenidos como resultado del trabajo de grado:

- En los materiales semiconductores al aplicar un gradiente de temperatura de 5°C , el semiconductor empezaría a agrupar los portadores mayoritarios al lado caliente y los portadores minoritarios al lado frío, permitiendo la conducción y haciendo posible la identificación de la película delgada semiconductoras.
- A medida que aumentaba el delta de temperatura aplicado a la muestra, el resultado del tipo de conductividad no varía, debido a que el semiconductor se encontraba en el rango de zonas de conducción de impurezas y extrínsecas.
- Se observó que el fenómeno de termo-tensión desaparece al transcurrir unos segundos, ya que el calor aplicado a la superficie semiconductoras se hace uniforme y no permite la separación de portadores de carga libre.
- Al momento de manipular el equipo de medición se debe mantener los cables fijos puesto que, al tocar involuntariamente los cables, éstos provocarían corrientes parasitas, impidiendo la correcta toma de datos.
- Se debe tener total cuidado al momento de hacer la identificación, ya que si no se hace un buen contacto entre los electrodos y la muestra, el circuito no logrará cerrarse, y el resultado en el nano-voltímetro sería el ruido del laboratorio.

- Se evidenció que el equipo de medición que se debe utilizar para identificar el tipo de conductividad, debe tener un apantallamiento al ruido y un filtrado de datos por variación.
- El nano-voltímetro tiene una configuración para rechazar el ruido del ambiente producido por las líneas de alimentación, esta configuración tiene que ubicarse en 1 PLC para eliminar el ruido capturado de 60 Hz.
- Después de realizar las pruebas donde se obtuvieron los resultados de las películas delgadas semiconductoras, se realizó la comparación con las muestras previamente identificadas, dando como resultado lo esperado.
- Luego de obtener los resultados de las muestras, se realizaron dos pruebas de repetitividad, las cuales confirma que el método de termo-voltaje no varía con respecto al tiempo.

REFERENCIAS

- [1] J. Ignacio and O. Rojas, "Síntesis y Estudio de Propiedades de Películas Delgadas de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$," Univ. Nac. Colomb., 2012.
- [2] F. Tecnicas and S. D. E. Fabricacion, "Películas semiconductoras policristalinas para fotovoltaicas: técnicas sencillas de fabricación," vol. 12, 1993.
- [3] H. R. Murcia, "Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas Development of Solar Energy in Colombia and its Prospects," Rev. Ing., vol. 28, pp. 83–89, 2009.
- [4] O. M. Micheloud and R. A. Vicini, Smart Grids: Fundamentos, Tecnologías y Aplicaciones. Cengage Learning Editores, 2012.
- [5] M. Fernando and H. Morales, "SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS DEL SEMICONDUCTOR $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ Y SU USO COMO CAPA ABSORBENTE EN CELDAS SOLARES PELÍCULAS DELGADAS DEL SEMICONDUCTOR $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ Y SU USO COMO CAPA ABSORBENTE EN," 2014.
- [6] M. M. Vallina, INSTALACIONES SOLARES FOTOVOLTAICAS. Editorial Paraninfo, 2010.
- [7] "Caracterización de las propiedades electrónicas de un semiconductor." [Online]. Available: <http://www.yumpu.com/es/document/view/14068783/caracterizacion-de-las-propiedades-electronicas-de-un-semiconductor>. [Accessed: 11-May-2015].
- [8] "Fundamentos Físicos De Las Celdas Solares." [Online]. Available: http://paginas.fisica.uson.mx/horacio.munguia/aula_virtual/Cursos/Electronica/Documentos/Celdas_Solares1.pdf. [Accessed: 11-Sep-2015].
- [9] R. Foster, M. Ghassemi, and A. Cota, SOLAR ENERGY, Abbas Ghas. New Mexico State University.

- [10] "Prototipo de planta solar autónoma para uso rural: instalación, prueba y análisis del desempeño." [Online]. Available: http://web.www3.unicordoba.edu.co/sites/default/files/Informe_Final_FCB_02-08_Felix_Aguas_Lastre.pdf. [Accessed: 11-Sep-2015].
- [11] "Tecnologías Fotovoltaicas en Lámina Delgada." [Online]. Available: http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45348/componente45346.pdf. [Accessed: 25-Jan-2016].
- [12] "Master Executive en Energías Renovables." [Online]. Available: <http://www.eoi.es/blogs/meerron/page/14/>. [Accessed: 17-Oct-2015].
- [13] "Principles of Solar Cells, LEDs and Diodes." [Online]. Available: http://samples.sainsburysebooks.co.uk/9781119974550_sample_415012.pdf. [Accessed: 26-Jan-2016].
- [14] W. a. Chamorro and S. Urrego Riveros, "Cedas solares orgánicas, una perspectiva hacia el futuro," Elementos, vol. 2, pp. 139–148, 2012.
- [15] "energía solar fotovoltaica." [Online]. Available: <http://es.slideshare.net/fvelasquez1973/imp-0a7-energiasolarfotovoltaica>. [Accessed: 26-Jan-2016].
- [16] "Física de la Unión P-N." [Online]. Available: [http://www.uv.es/candid/docencia/Tema3\(01-02\).pdf](http://www.uv.es/candid/docencia/Tema3(01-02).pdf). [Accessed: 25-Jan-2016].
- [17] C. Andrés and A. Orozco, "Síntesis De Películas Delgadas $\text{AgIn}(\text{S},\text{Se})_2$ Con Propiedades Adecuadas Para Ser Usadas Como Capa Absorbente En Celdas Solares Tipo Tandem," 2010.
- [18] C. E. Jacome, J. M. Flórez, Y. G. Gurevich, B. A. Paez, and G. Gordillo, "Estudio de Propiedades de Transporte Eléctrico en Películas Delgadas Semiconductoras de SdS," vol. 31, pp. 243–246, Jan. 1999.
- [19] T. T. Instruments, "Diseño Y Construcción De Un Equipo Para Medir El Coeficiente Termoeléctrico, A, De Materiales En Bloque O En Película Delgada," vol. 34, no. 2, pp. 537–540, 2002.

- [20] "Room Temperature Seebeck Coefficient Measurement of Metal and Semiconductors ." [Online]. Available: <file:///D:/usuario/Downloads/Room-Temperature-Seebeck-Coefficient-Measurement.pdf>. [Accessed: 25-Jan-2016].
- [21] "Colección de Tablas, Gráficas y Ecuaciones de Transmisión de Calor." [Online]. Available: http://www.esi2.us.es/~jfc/Descargas/TC/Coleccion_tablas_graficas_TC.pdf. [Accessed: 25-Jan-2016].
- [22] "Propiedades térmicas." [Online]. Available: http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm11/fcm11_4.htm.
- [23] "[Mcgraw hill]raymond chang quimica general 7 edicion." [Online]. Available: <http://es.slideshare.net/yoel88/mcgraw-hillraymond-chang-quimica-general-7-edicion>. [Accessed: 17-Oct-2015].
- [24] "About THERMOCOAX Heating Elements." [Online]. Available: <http://www.thermocoax.com/heating-elements/>. [Accessed: 22-Oct-2015].
- [25] F. Breu, S. Guggenbichler, and J. Wollmann, "Estudio De Las Propiedades Y Aplicaciones Industriales Del Polietileno De Alta Densidad (Pead)," Vasa, p. 96, 2008.
- [26] D. Sheet, "3M TM Glass Cloth Electrical Tape 69 with Silicone Pressure-Sensitive Adhesive," no. May, pp. 3–5, 2014.
- [27] "SPRAY PLANET :: MTN Industrial Negro Mate." [Online]. Available: <http://www.sprayplanet.com/es/shop/all/spray/1714/mtn-industrial-negro-mate>. [Accessed: 17-Oct-2015].
- [28] "PCB UV Curable Solder Mask Repairing Paint Blue 100g | eBay." [Online]. Available: <http://www.ebay.com/itm/PCB-UV-Curable-Solder-Mask-Repairing-Paint-Blue-100g-/190547440482>. [Accessed: 17-Oct-2015].
- [29] "2182A Nanovoltmeter." [Online]. Available: http://eu.flukecal.com/es/products/data-acquisition-and-test-equipment/specialty-instruments/nanovolt%C3%ADmetro-2182a?quicktabs_product_details=2. [Accessed: 17-Oct-2015].

- [30] "Hewlett Packard 3478A Digital Multimeter, Refurbished HP Agilent Hewlett Packard - Used Test Equipment at Test Equipment Depot." [Online]. Available:
<http://www.testequipmentdepot.com/usedequipment/hewlettpackard/digitalmultimeters/3478a.htm>. [Accessed: 17-Nov-2015].
- [31] "US Instrument Services Test Equipment Rental, Sales,Service." [Online]. Available:
http://www.us-instrument.com/commerce/catalog/product.jsp?product_id=1770. [Accessed: 17-Nov-2015].
- [32] Keithley, Ed., Low level measurements handbook, Sixth Edit. .
- [33] R. a June, Model 2182 / 2182A Nanovoltmeter User ' s Manual, no. June. 2004.
- [34] "2011 Ayuda de SOLIDWORKS - Coeficiente de transferencia de calor por convección."
- [35] N. Andrea and B. Londo, "SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE NUEVOS MATERIALES NO TÓXICOS EMPLEADOS COMO CAPA BUFFER Y CAPA," 2008.
- [36] "Fluke 179 True RMS Digital Multimeter." [Online]. Available: <http://en-us.fluke.com/products/digital-multimeters/fluke-179-digital-multimeter.html>. [Accessed: 27-Jan-2016].
- [37] "Multímetro inalámbrico Fluke CNX 3000." [Online]. Available: <http://www.fluke.com/fluke/coes/multimetros-digitales/general-purpose-multimeters/fluke-cnx-3000-wireless-multimeter.htm?pid=74899>. [Accessed: 27-Jan-2016].

BIBLIOGRAFÍA

- ❖ 2011 Ayuda de SOLIDWORKS - Coeficiente de transferencia de calor por convección.”
- ❖ 2182A Nanovoltmeter. [Online]. Available:
http://eu.flukecal.com/es/products/data-acquisition-and-test-equipment/specialty-instruments/nanovolt%C3%ADmetro-2182a?quicktabs_product_details=2. [Accessed: 17-Oct-2015].
- ❖ About THERMOCOAX Heating Elements. [Online]. Available:
<http://www.thermocoax.com/heating-elements/>. [Accessed: 22-Oct-2015].
- ❖ C. Andrés and A. Orozco, “Síntesis De Películas Delgadas AgIn (S, Se)₂ Con Propiedades Adecuadas Para Ser Usadas Como Capa Absorbente En Celdas Solares Tipo Tandem,” 2010.
- ❖ C. E. Jacome, J. M. Flórez, Y. G. Gurevich, B. A. Paez, and G. Gordillo, “Estudio de Propiedades de Transporte Eléctrico en Películas Delgadas Semiconductoras de SdS,” vol. 31, pp. 243–246, Jan. 1999.
- ❖ Caracterización de las propiedades electrónicas de un semiconductor. [Online]. Available: <http://www.yumpu.com/es/document/view/14068783/caracterizacion-de-las-propiedades-electronicas-de-un-semiconductor>. [Accessed: 11-May-2015].
- ❖ Colección de Tablas, Gráficas y Ecuaciones de Transmisión de Calor. [Online]. Available:
http://www.esi2.us.es/~jfc/Descargas/TC/Coleccion_tablas_graficas_TC.pdf. [Accessed: 25-Jan-2016].
- ❖ D. Sheet, “3M TM Glass Cloth Electrical Tape 69 with Silicone Pressure-Sensitive Adhesive,” no. May, pp. 3–5, 2014.
- ❖ Energía solar fotovoltaica. [Online]. Available:
<http://es.slideshare.net/fvelasquez1973/imp-0a7-energiasolarfotovoltaica>. [Accessed: 26-Jan-2016].

- ❖ F. Breu, S. Guggenbichler, and J. Wollmann, “Estudio De Las Propiedades Y Aplicaciones Industriales Del Polietileno De Alta Densidad (Pead),” Vasa, p. 96, 2008.
- ❖ F. Técnicas and S. D. E. Fabricación, “Películas semiconductoras policristalinas para fotovoltaicas: técnicas sencillas de fabricación,” vol. 12, 1993.
- ❖ Física de la Unión P-N. [Online]. Available: [http://www.uv.es/candid/docencia/Tema3\(01-02\).pdf](http://www.uv.es/candid/docencia/Tema3(01-02).pdf). [Accessed: 25-Jan-2016].
- ❖ Fluke 179 True RMS Digital Multimeter. [Online]. Available: <http://en-us.fluke.com/products/digital-multimeters/fluke-179-digital-multimeter.html>. [Accessed: 27-Jan-2016].
- ❖ Fundamentos Físicos De Las Celdas Solares. [Online]. Available: http://paginas.fisica.uson.mx/horacio.munguia/aula_virtual/Cursos/Electronica/Documentos/Celdas_Solares1.pdf. [Accessed: 11-Sep-2015].
- ❖ H. R. Murcia, “Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas Development of Solar Energy in Colombia and its Prospects,” Rev. Ing., vol. 28, pp. 83–89, 2009.
- ❖ Hewlett Packard 3478A Digital Multimeter, Refurbished HP Agilent Hewlett Packard - Used Test Equipment at Test Equipment Depot. [Online]. Available: <http://www.testequipmentdepot.com/usedequipment/hewlettpackard/digitalmultimeters/3478a.htm>. [Accessed: 17-Nov-2015].
- ❖ J. Ignacio and O. Rojas, “Síntesis y Estudio de Propiedades de Películas Delgadas de Cu₂ZnSnS₄,” Univ. Nac. Colomb., 2012.
- ❖ Keithley, Ed., Low level measurements handbook, Sixth Edit. .
- ❖ M. Fernando and H. Morales, “SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS DEL SEMICONDUCTOR Cu₂ZnSnS₄ Y SU USO COMO CAPA ABSORBENTE EN CELDAS SOLARES PELÍCULAS DELGADAS DEL SEMICONDUCTOR Cu₂ZnSnS₄ Y SU USO COMO CAPA ABSORBENTE EN,” 2014.
- ❖ M. M. Vallina, INSTALACIONES SOLARES FOTOVOLTAICAS. Editorial Paraninfo, 2010.

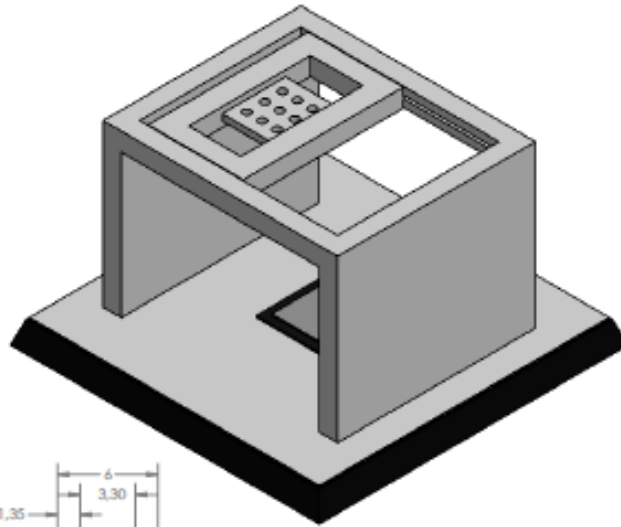
- ❖ Master Executive en Energías Renovables. [Online]. Available: <http://www.eoi.es/blogs/meerron/page/14/>. [Accessed: 17-Oct-2015].
- ❖ Multímetro inalámbrico Fluke CNX 3000. [Online]. Available: <http://www.fluke.com/fluke/coes/multímetros-digitales/general-purpose-multimeters/fluke-cnx-3000-wireless-multimeter.htm?pid=74899>. [Accessed: 27-Jan-2016]
- ❖ N. Andrea and B. Londo, “SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE NUEVOS MATERIALES NO TÓXICOS EMPLEADOS COMO CAPA BUFFER Y CAPA,” 2008.
- ❖ O. M. Micheloud and R. A. Vicini, Smart Grids: Fundamentos, Tecnologías y Aplicaciones. Cengage Learning Editores, 2012.
- ❖ PCB UV Curable Solder Mask Repairing Paint Blue 100g | eBay.” [Online]. Available: <http://www.ebay.com/itm/PCB-UV-Curable-Solder-Mask-Repairing-Paint-Blue-100g-/190547440482>. [Accessed: 17-Oct-2015].
- ❖ Principles of Solar Cells, LEDs and Diodes. [Online]. Available: http://samples.sainsburysebooks.co.uk/9781119974550_sample_415012.pdf. [Accessed: 26-Jan-2016].
- ❖ Propiedades térmicas. [Online]. Available: http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm11/fcm11_4.htm.
- ❖ Prototipo de planta solar autónoma para uso rural: instalación, prueba y análisis del desempeño. [Online]. Available: [http://web.www3.unicordoba.edu.co/sites/default/files/Informe Final _FCB 02-08 Felix Aguas Lastre.pdf](http://web.www3.unicordoba.edu.co/sites/default/files/Informe%20Final%20_FCB%2002-08%20Felix%20Aguas%20Lastre.pdf). [Accessed: 11-Sep-2015].
- ❖ R. a June, Model 2182 / 2182A Nanovoltmeter User' s Manual, no. June. 2004.
- ❖ R. Foster, M. Ghassemi, and A. Cota, SOLAR ENERGY, Abbas Ghas. New México State University.

- ❖ Raymond chang Química general 7 edición [McGraw hill]. [Online]. Available:

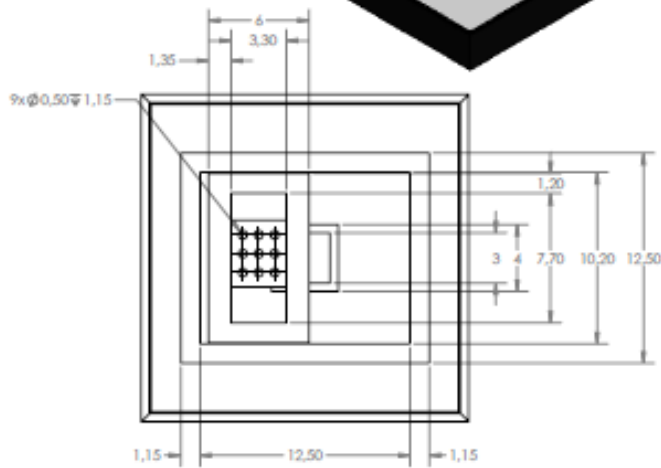
- <http://es.slideshare.net/yoel88/mcgraw-hillraymond-chang-quimica-general-7-edicion>. [Accessed: 17-Oct-2015].
- ❖ Room Temperature Seebeck Coefficient Measurement of Metal and Semiconductors. [Online]. Available: <file:///D:/usuario/Downloads/Room-Temperature-Seebeck-Coefficient-Measurement.pdf>. [Accessed: 25-Jan-2016].
 - ❖ SPRAY PLANET :: MTN Industrial Negro Mate. [Online]. Available: <http://www.sprayplanet.com/es/shop/all/spray/1714/mtn-industrial-negro-mate>. [Accessed: 17-Oct-2015].
 - ❖ T. T. Instruments, “Diseño Y Construcción De Un Equipo Para Medir El Coeficiente Termoeléctrico, A, De Materiales En Bloque O En Película Delgada,” vol. 34, no. 2, pp. 537–540, 2002.
 - ❖ Tecnologías Fotovoltaicas en Lámina Delgada. [Online]. Available: http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45348/componente45346.pdf. [Accessed: 25-Jan-2016].
 - ❖ US Instrument Services Test Equipment Rental, Sales, Service. [Online]. Available: <http://www.us-instrument.com/commerce/catalog/product.jsp?product>
 - ❖ W. a. Chamorro and S. Urrego Riveros, “Cedas solares orgánicas, una perspectiva hacia el futuro,” Elementos, vol. 2, pp. 139–148, 2012.

ANEXOS

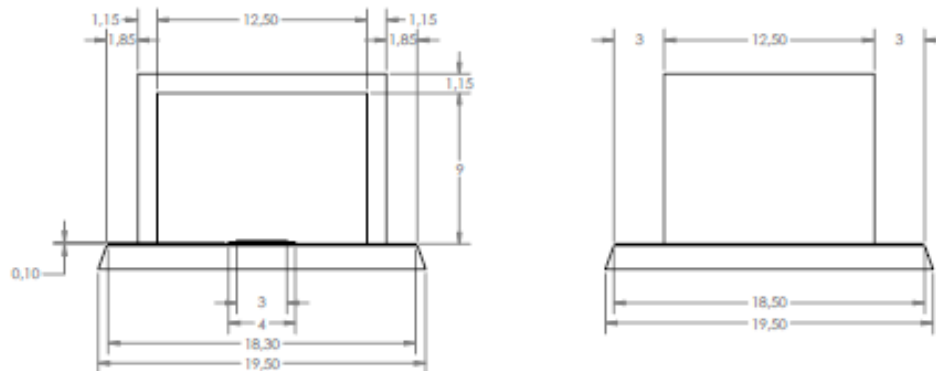
Anexo A. Modelo pruebas de fotoconductividad isométrica



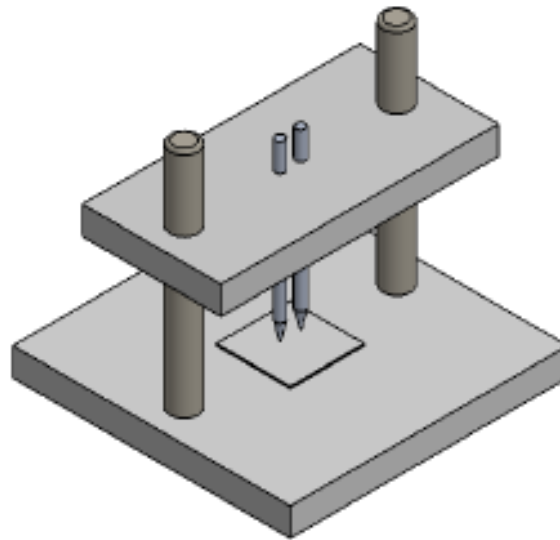
MODELO PRUEBAS DE
FOTOCONDUCTIVIDAD
ISOMETRICA
ESC 1:1
CENTIMETRICO



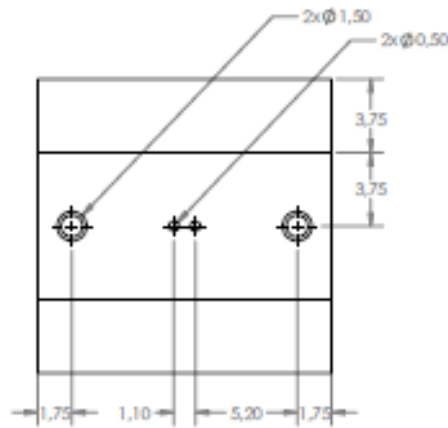
MODELO PRUEBAS DE
FOTOCONDUCTIVIDAD
VISTAS
PRINCIPALES
ESC 1:1
CENTIMETRICO



Anexo B. Modelo para identificación del tipo de conductividad isométrica



MODELO PARA IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE CONDUCTIVIDAD ISOMETRICA ESC. 2:3 CENTIMETRICO



MODELO PARA IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE CONDUCTIVIDAD VISTAS PRINCIPALES ESC. 1:2 CENTIMETRICO

