



# ESPE

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,  
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN  
Y CONTROL**

**TEMA: “CARACTERIZACIÓN DE CELDAS SOLARES MEDIANTE  
EL ESTUDIO DE LA MOVILIDAD DE PORTADORES DE CARGA  
EN PELÍCULAS DELGADAS”.**

**AUTOR: MORENO TORRES, GALO FERNANDO.**

**DIRECTOR: ING. GUARDERAS BURBANO, GALO FERNANDO,  
PhD.**

**SANGOLQUÍ**

**2019**



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, “**CARACTERIZACIÓN DE CELDAS SOLARES MEDIANTE EL ESTUDIO DE LA MOVILIDAD DE PORTADORES DE CARGA EN PELÍCULAS DELGADAS**”. Fue realizado por el señor Moreno Torres Galo Fernando el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 31 de octubre del 2019

**Dr. Galo Fernando Guarderas Burbano, Ph.D.**  
C.C. 1706848163



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, Galo Fernando Moreno Torres, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: “**CARACTERIZACIÓN DE CELDAS SOLARES MEDIANTE EL ESTUDIO DE LA MOVILIDAD DE PORTADORES DE CARGA EN PELÍCULAS DELGADAS**”. es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas utilizadas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 31 de octubre del 2019



---

**Galo Fernando Moreno Torres**  
C.C. 1715969612



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL

**AUTORIZACIÓN**

Yo, Moreno Torres Galo Fernando, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “**CARACTERIZACIÓN DE CELDAS SOLARES MEDIANTE EL ESTUDIO DE LA MOVILIDAD DE PORTADORES DE CARGA EN PELÍCULAS DELGADAS**”. en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 31 de octubre del 2019

---

**Galo Fernando Moreno Torres**  
C.C. 1715969612

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar el presente trabajo de titulación a mis padres, por todo el apoyo que me han brindado a lo largo de los años, por cuidarme y por guiarme a lo largo de mi vida.

A mis hermanos por ser una fuente de inspiración y apoyo moral para los días difíciles.

A todas las personas que me han apoyado en los momentos de necesidad, me han extendido su mano en los momentos difíciles y me han brindado su amistad incondicional cada día.

## AGRADECIMIENTOS

A mi padre y madre que con su esfuerzo y dedicación me ayudaron a culminar mi carrera universitaria, por cada consejo, palabra de aliento, por ser los mejores consejeros y por todo el amor que me han brindado.

A mis hermanos que siempre me harán sentir orgulloso y me inspiran a ser más.

A mi familia por el apoyo y comprensión mostrado a lo largo de la carrera.

A todos mis amigos, los hermanos que elegí, por cada anécdota y risa que podremos contar como colegas.

De manera especial a mi tutor de tesis, por haberme acogido en un momento de desesperación, haberme guiado a lo largo del trabajo de titulación y brindarme su conocimiento y apoyo para mi desarrollo profesional.

Y finalmente, un agradecimiento a Laura Vallejo, por caminar junto a mí a lo largo de toda la carrera, brindarme su amor y ser un apoyo constante en cada momento.

## INDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO DEL DIRECTOR.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xix
 <b>CAPÍTULO I</b>	
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN</b>	
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Justificación e importancia.....	3
1.3 Alcance.....	5
1.4 Objetivos. ....	6
1.4.1 Objetivo general .....	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	6

## CAPÍTULO II

### CELDA SOLARES Y SU CARACTERIZACIÓN

2.1	Energía...	8
2.2	Energía no renovable.....	9
2.3	Energía renovable.....	10
2.4	Energía solar fotovoltaica.....	10
2.5	Panel solar .....	12
2.6	Celdas solares.....	12
2.7	Tipos de paneles solares.....	13
2.7.1	Paneles monocristalinos .....	13
2.7.2	Paneles policristalinos .....	14
2.7.3	Paneles de película delgada.....	15
2.7.4	Celdas solares orgánicas.....	16
2.8	Radiación solar .....	17
2.8.1	Espectro de luz .....	18
2.8.2	Masa de aire....	20
2.9	Estructura interna de las celdas solares .....	22
2.9.1	Unión P-N.....	23
2.9.2	Banda prohibida .....	24
2.10	Caracterización de una celda solar .....	25
2.10.1	Fuente de iluminación .....	26
2.10.2	Control de temperatura.....	27

2.11	Ecuación del diodo no ideal .....	27
2.12	Curva intensidad –voltaje.....	28
2.12.1	Corriente de cortocircuito $I_{sc}$ .....	30
2.12.2	Voltaje de circuito abierto $V_{OC}$ .....	31
2.12.3	Potencia máxima .....	31
2.12.4	Factor de forma $FF$ . .....	31
2.13	Eficiencia.....	33
2.14	Circuito equivalente de una celda solar y modelo matemático .....	33
2.15	Movilidad de portadores de carga en celdas solares de película delgada .....	39
2.15.1	Portadores de carga .....	40
2.15.2	Celdas solares de silicio amorfo.....	40
2.15.3	Celdas solares de polímero semiconductor .....	45
2.16	Medición de movilidad de portadores de carga en celdas orgánicas. Método CELIV .....	48

### **CAPÍTULO III**

#### **DESARROLLO**

3.1	Diseño del simulador solar.....	52
3.1.1	Cálculos para panel 1 .....	57
3.1.2	Cálculos para panel 2 .....	59
3.2	Instrumentación para la toma de datos curva $i-v$ .....	60
3.2.1	Acoplamiento de voltaje.....	60
3.2.2	Acoplamiento de la corriente .....	63
3.3	Interfaz en labview para obtención de curva $i-v$ .....	68

3.3.1 Programación...	68
3.3.2 Interfaz de usuario .....	74
3.4 Interfaz en labVIEW para la medición de movilidad de portadores de carga.....	78
3.4.1 Generador de onda .....	78
3.4.2 Osciloscopio... ..	81
3.4.3 Adquisición de datos CELIV .....	81
3.4.4 Cálculos CELIV.. ..	84

## **CAPÍTULO IV**

### **EQUIPOS**

4.1 Equipos .....	88
4.1.1 Hardware.....	88
4.1.2 Software.....	99

## **CAPÍTULO V**

### **PUEBAS Y RESULTADOS**

5.1 Prototipo de caracterización de celdas solares .....	104
5.2 Movilidad en celdas de silicio amorfo .....	127
5.3 Movilidad en celdas de polimero semiconductor.....	130
5.4 Resultados .....	137
5.4.1 Caracterización de celdas solares.....	137
5.5 Movilidad en silicio amorfo .....	145
5.6 Movilidad en celda ORGÁNICA.....	146

**CAPÍTULO VI****CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO**

6.1 Conclusiones .....148

6.2 Recomendaciones.....150

6.3 Trabajo futuro.....151

**ANEXOS** .....153

**BIBLIOGRAFÍA**.....159

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Formas de energía y su producto generado</i> .....	9
<b>Tabla 2</b> <i>Fuentes de energía no renovable</i> .....	9
<b>Tabla 3</b> <i>Fuentes de energía renovable</i> .....	10
<b>Tabla 4</b> <i>Ventajas y Desventajas de los paneles solares con celdas monocristalinas</i> .....	14
<b>Tabla 5</b> <i>Ventajas y Desventajas de los paneles solares con celdas policristalinas</i> .....	14
<b>Tabla 6</b> <i>Ventajas y Desventajas de los paneles solares con celdas de película delgada</i> .....	15
<b>Tabla 7</b> <i>Valores estándar de movilidad de electrones y huecos para silicio</i> .....	42
<b>Tabla 8</b> <i>Características del generador de onda triangular</i> .....	51
<b>Tabla 9</b> <i>Factor de desajuste espectral entre el espectro solar y luminaria Led</i> .....	53
<b>Tabla 10</b> <i>Medidas de los paneles solares a usar en el proyecto</i> .....	56
<b>Tabla 11</b> <i>Valores de Entrada y Salida del amplificador inversor para acoplamiento de voltaje</i> .61	61
<b>Tabla 12</b> <i>Valores de Entrada y Salida del amplificador para acoplamiento de corriente</i> .....	65
<b>Tabla 13</b> <i>Características Laptop Dell Inspiro 17R-N7110</i> .....	88
<b>Tabla 14</b> <i>Características reflector LED Jeta 30W</i> .....	94
<b>Tabla 15</b> <i>Resistencias utilizadas en el banco de resistencias</i> .....	97
<b>Tabla 16</b> <i>Valores característicos de los paneles 1,2,3 y 4</i> .....	105
<b>Tabla 17</b> <i>Valores medidos en LabVIEW del panel solar 1</i> .....	115
<b>Tabla 18</b> <i>Valores calculados en MATLAB del panel solar</i> .....	116
<b>Tabla 19</b> <i>Valores calculados en MATLAB del panel solar 4</i> .....	120
<b>Tabla 20</b> <i>Valores calculados en MATLAB del panel solar 4 como una celda única</i> .....	124
<b>Tabla 21</b> <i>Valores de eficiencia para Panel 1 y 4 respecto a variaciones de Área de la celda</i> ...	125

<b>Tabla 22</b> <i>Espesor de los componentes de la celda solar propuesta por Zimmerman</i> .....	132
<b>Tabla 23</b> <i>Error de medición entre prototipo y multímetros para Panel 1</i> .....	137
<b>Tabla 24</b> <i>Error de medición entre prototipo y aproximación para Panel 2</i> .....	138
<b>Tabla 25</b> <i>Error de medición entre prototipo y multímetros para Panel 4</i> .....	140
<b>Tabla 26</b> <i>Error de medición entre prototipo y aproximación para Panel 4</i> .....	142
<b>Tabla 27</b> <i>Clasificación de simulador solar de acuerdo a IEC 60904-9</i> .....	144
<b>Tabla 28</b> <i>Clasificación de simulador solar de acuerdo a IEC 60904-9</i> .....	147
<b>Tabla 29</b> <i>Mediciones Panel 1 día 1, 2 y 3</i> .....	153
<b>Tabla 30</b> <i>Mediciones Panel 2 día 1, 2 y 3</i> .....	154
<b>Tabla 31</b> <i>Mediciones Panel 3 día 1, 2 y 3</i> .....	156
<b>Tabla 32</b> <i>Mediciones Panel 4 día 1, 2 y 3</i> .....	157

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Panel solar colocado en una residencia. ....	11
<b>Figura 2</b> Espectro Electromagnético .....	17
<b>Figura 3</b> Espectro de radiación, Luz Visible.....	18
<b>Figura 4</b> Variación de ángulos de la Masa de Aire. ....	20
<b>Figura 5</b> Espectro solar estándar Fuera de la Atmosfera AM0, dentro de la atmosfera considerando radiación Directa AM1.5D y radiación total AM1.5G. ....	21
<b>Figura 6</b> Corte transversal de una célula solar. ....	22
<b>Figura 7</b> Estructura básica de un probador I-V para celdas solares. ....	26
<b>Figura 8</b> Curva I-V y curva de potencia de una celda solar. ....	29
<b>Figura 9</b> Curva I-V estándar.....	30
<b>Figura 10</b> Factor de forma en función de corriente de cortocircuito, voltaje de circuito abierto y potencia máxima. ....	32
<b>Figura 11</b> Circuito equivalente de celda solar.....	34
<b>Figura 12</b> Circuito equivalente de celda solar considerando resistencia en serie y paralelo .....	35
<b>Figura 13</b> Estructura de Bandas en un semiconductor .....	41
<b>Figura 14</b> Sección transversal de una celda solar con estructura heterojuntura en el volumen. ..	46
<b>Figura 15</b> Modelo de transporte de carga basado en saltos de posición .....	48
<b>Figura 16</b> Circuito esquemático para experimento CELIV.....	50
<b>Figura 17</b> Señal de Salida del experimento CELIV .....	51
<b>Figura 18</b> Espectro de una luminaria Led y Espectro solar de AM1.5G .....	52
<b>Figura 19</b> Eficacia luminosa luz visible .....	54
<b>Figura 20</b> Pirámide n-gonal derecha .....	56

<b>Figura 21</b> Diagrama de simulador solar colocación para el uso de ecuaciones de ángulo sólido.	57
<b>Figura 22</b> Amplificador Inversor .....	62
<b>Figura 23</b> Circuito propuesto para la linealización del voltaje y acoplamiento .....	63
<b>Figura 24</b> Circuito de conversor I-V .....	64
<b>Figura 25</b> Circuito sumador Inversor .....	66
<b>Figura 26</b> Circuito para la linealización de la corriente de la celda y acoplamiento .....	67
<b>Figura 27</b> Diagrama de bloques Programa para medición de Curva I-V .....	68
<b>Figura 28</b> Diagrama de flujo programa. ....	70
<b>Figura 29</b> Diagrama de flujo medición de curva I-V .....	72
<b>Figura 30</b> Diagrama de flujo Guardar .....	73
<b>Figura 31</b> Diagrama de flujo Importar .....	74
<b>Figura 32</b> Interfaz de usuario para medición de Curva I-V .....	75
<b>Figura 33</b> Controles de la interfaz de usuario .....	76
<b>Figura 34</b> Presentación de datos en la interfaz de usuario .....	77
<b>Figura 35</b> Alertas en la interfaz de Usuarios .....	78
<b>Figura 36</b> Diagrama de bloques CELIV.....	78
<b>Figura 37</b> Circuito para la amplificación del generador PXIe-5450 .....	79
<b>Figura 38</b> Ventana generador de Onda.....	80
<b>Figura 39</b> Adquisición de Datos CELIV .....	82
<b>Figura 40</b> Diagrama de Flujo toma de datos CELIV. ....	83
<b>Figura 41</b> Cálculo de Movilidad CELIV .....	84
<b>Figura 42</b> Parámetros a medir en la gráfica .....	85
<b>Figura 43</b> Valores de los cursores .....	86

<b>Figura 44</b> Valores y Constantes para cálculos de movilidad .....	87
<b>Figura 45</b> Módulo PXI .....	89
<b>Figura 46</b> Módulo PXIe-5160 .....	90
<b>Figura 47</b> Led reflector Jeta .....	94
<b>Figura 48</b> Vista lateral de la simulación del 3D del banco de carga diseñado en ARES.....	96
<b>Figura 49</b> Diseño PCB banco de resistencias variable realizado en ARES .....	96
<b>Figura 50</b> Banco de resistencias variable terminado.....	98
<b>Figura 51</b> Firmware Wizard de LINX.....	101
<b>Figura 52</b> Paneles solares 1,2,3 y 4.....	105
<b>Figura 53</b> Circuito empleado para caracterizar celdas solares .....	106
<b>Figura 54</b> Curva I-V panel 1 .....	106
<b>Figura 55</b> Curva de Potencia panel 1 .....	107
<b>Figura 56</b> Curva I-V panel 2 .....	107
<b>Figura 57</b> Curva de Potencia panel 2 .....	108
<b>Figura 58</b> Curva I-V panel 3 .....	108
<b>Figura 59</b> Curva de Potencia panel 3 .....	109
<b>Figura 60</b> Curva I-V panel 4 .....	109
<b>Figura 61</b> Curva de Potencia panel 4 .....	110
<b>Figura 62</b> Medición de 3 días de los paneles solares 1,2,3 y 4 respectivamente .....	111
<b>Figura 63</b> Mediciones a la Celda 1 en LabVIEW .....	113
<b>Figura 64</b> a) Tres mediciones realizadas en el sistema propuesto b) Mediciones de tres días del panel no consecutivas.....	114
<b>Figura 65</b> Curva I-V Panel 1 en MATLAB .....	116

<b>Figura 66</b> Aproximaciones del funcionamiento de la celda solar 3 a partir de potencia máxima y corriente de cortocircuito .....	117
<b>Figura 67</b> Aproximación de la Curva I-V por el método de J.M. Ruiz Pérez.....	118
<b>Figura 68</b> Aproximación de la Curva I-V por método iterativo.....	118
<b>Figura 69</b> Aproximación de la Curva I-V por el método de J.M. Ruiz Pérez Celda 1 .....	119
<b>Figura 70</b> Aproximación de la Curva I-V por el método de J.M. Ruiz Pérez Celda 2 .....	121
<b>Figura 71</b> Curva I-V aproximada de la celda 4 considerando paneles de 36, 50 y 20 celdas .....	123
<b>Figura 72</b> Modelo Aproximado del Panel 4 considerándolo como una única celda.....	124
<b>Figura 73</b> Eficiencia Panel 1 y Panel 4 con variaciones de área de celda solar .....	127
<b>Figura 74</b> Movilidad de huecos en función de la densidad de potencia panel 1 .....	129
<b>Figura 75</b> Movilidad de huecos en función de la densidad de potencia panel 4.....	130
<b>Figura 76</b> Celda solar con material Activo P3HT:PCBM.....	131
<b>Figura 77</b> Celda solar en GPVDM con material Activo P3HT:PCBM .....	133
<b>Figura 78</b> Rampa de voltaje de 0.6 a -1V a 50KHz como entrada de CELIV .....	133
<b>Figura 79</b> Respuesta de la celda solar ante la rampa de voltaje .....	134
<b>Figura 80</b> Medición CELIV en simulador GPVDM .....	134
<b>Figura 81</b> Medición CELIV en LabVIEW.....	136
<b>Figura 82</b> Medición CELIV en LabVIEW.....	145

## RESUMEN

Con la reducción de las reservas mundiales de combustibles fósiles y el incremento poblacional a nivel mundial, la necesidad de búsqueda y mejora de fuentes energéticas se ha vuelto uno de los campos más importantes para la ciencia. Energías renovables, como la energía solar fotovoltaica, ha incrementado su uso de manera acelerada por sus características y ventajas, por tal razón, el contar con equipos adecuados para el análisis de nuevas técnicas de generación solar resulta imprescindible en centros de investigación y desarrollo. Los equipos propuestos en este proyecto están divididos según su función, en primer lugar, un prototipo para la medición de valores característicos de la celda solar con el objetivo de realizar aproximaciones del funcionamiento y equipo dedicado para estimar la movilidad de portadores de carga. Las señales correspondientes a los valores característicos de la celda solar se obtienen sometiendo el panel a radiación solar. Mediciones de corriente y voltaje permiten obtener valores característicos correspondientes a el modelo matemático de un solo diodo. Las señales de portadores de carga se obtienen sometiendo la celda solar a un incremento lineal de voltaje lo que permite conseguir valores de densidad de corriente en función del tiempo con la ayuda de un osciloscopio. Finalmente, las señales obtenidas se procesan y se obtiene valores característicos mediante las herramientas LabVIEW y Matlab. Los resultados obtenidos se cotejarán con estudios previos para su validación.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **CELDA FOTOVOLTAICA DE PELICULA DELGADA**
- **CARACTERIZACIÓN DE CELDAS**
- **MOVILIDAD DE PORTADORES**
- **MODELO DE CELDAS SOLARES DE UN DIODO**

## **ABSTRACT**

With the reduction of world fossil fuel reserves and the increase in population worldwide, the need for research and the improvement of energy sources have become one of the most important fields for science. Renewable energy, such as photovoltaic solar energy, has increased its use in an accelerated manner due to its characteristics and advantages, for this reason, having limited equipment for the analysis of new solar generation techniques is essential in research and development centers. The equipment proposed in this project is divided according to its function, first of all, a prototype for the measurement of characteristic values of the solar cell with the objective of carrying out approximations of the operation and dedicated equipment to estimate the mobility of the load carriers. The signals corresponding to the characteristic values of the solar cell are required at some point the solar radiation panel. Current and voltage measurements can obtain characteristic values of the mathematical model of a single diode. The signals corresponding to the load carriers are sometimes required by the solar cell at a linear voltage increase which allows to obtain current density values as a function of time with the help of an oscilloscope. Finally, the signals are processed and the mathematical model and characteristic values are obtained using the LabVIEW and MATLAB tools. The results will be checked against previous studies for validation.

### **KEYWORDS:**

- **THIN FILM PHOTOVOLTAIC**
- **SOLAR CELLS CHARACTERIZATION**
- **CARRIER MOBILITY**
- **SINGLE DIODE MODEL**

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

#### 1.1. ANTECEDENTES

Con la reducción de las reservas mundiales de combustibles fósiles y el incremento poblacional a nivel mundial, la necesidad de búsqueda y mejora de fuentes energéticas se ha vuelto uno de los principales campos de estudio para la ciencia. Las fuentes de energía renovable son una tendencia actual en este campo cuyo objetivo es generar energía limpia, es decir, sin emisión de gases de efecto invernadero, y que a su vez deben ser capaces de abastecer la demanda energética actual.

Dentro de las alternativas de generación eléctrica mediante recursos renovables la más popular es la fotovoltaica por sus características técnicas y facilidad de instalación en referencia a sus competidoras. Las celdas solares son dispositivos capaces de transformar la radiación solar en energía eléctrica (Ornelas-Soto, 2012). En la actualidad existen dos tipos de celdas solares: Orgánicas e Inorgánicas (Mishurny, V. A., & de Anda, 2007)(Tamasi, 2003). Las celdas solares inorgánicas, principalmente de silicio, han tenido un largo estudio a través de los años mientras que la mayor parte de estudios relacionados con celdas solares orgánicas están centrados en polímeros semiconductores.

Las celdas solares inorgánicas son las más comunes en el mercado y han mostrado un gran desarrollo en las últimas décadas, sin embargo, el alto costo de producción que involucra las celdas más eficientes limita su amplio uso. Las celdas inorgánicas más económicas y fáciles de producir, aunque no las más eficientes, son las celdas solares de silicio amorfo hidrogenado o de película

delgada. Estas, por sus características, se ven limitadas a dispositivos de bajo consumo como son, por ejemplo: cargadores solares de celulares, relojes o calculadoras.

El empleo de materiales orgánicos en la fabricación de celdas es una alternativa actualmente considerada por diversos grupos de investigación debido a su bajo costo de producción (Chapin, Fuller, & Pearson, 1954). La diferencia clave entre las celdas orgánicas e inorgánicas es la eficiencia en la conversión de la energía solar a energía eléctrica. En la actualidad, la mayor eficiencia de las células solares inorgánicas de silicio comerciales es del 18%, aunque también existen de otros materiales, como el arseniuro de galio, que alcanzan una eficiencia del 30% (Günes, Neugebauer, & Sariciftci, 2007) (Julio C. Durán, 2004) (Oyola, J.S., Gordillo G, 2007). Mientras que la eficiencia típica de las celdas solares orgánicas varía entre el 4 y 10% (Fagua1 & William Fernando Bernal S, 2015) (Oyola, J.S., Gordillo G, 2007).

La principal ventaja de utilizar elementos orgánicos es que son más fáciles de procesar y las cantidades de material que requieren son bajas por lo que facilita una producción a gran escala. Adicionalmente sus características de ligereza, semitransparencia y flexibilidad permite utilizarlas en un sin número de aplicaciones. Estas características son bastante similares a las presentadas por celdas solares de silicio amorfo.

El método más utilizado para conocer las características de una celda solar es la curva de intensidad-voltaje (abreviadamente curva I-V) que representa los valores de voltaje y corriente, obtenidos de forma experimental de un panel solar en condiciones determinadas de temperatura y luz solar. (López, 2014) Con esta curva se puede obtener una estimación del funcionamiento del panel en condiciones de trabajo real. Esto es aplicable para cualquier tipo de celda solar.

Dentro de los polímeros la movilidad de los portadores de carga es un factor importante para el funcionamiento de muchos dispositivos electrónicos basados en elementos orgánicos como los

Leds orgánicos (Organic Light Emission Diode - OLED). Las movilidades bajas o desbalanceadas de electrones y huecos pueden conducir a grandes pérdidas en el rendimiento del dispositivo debido a una mayor recombinación de los portadores de carga o la acumulación de cargas espaciales (Research, 2015). Una medición adecuada de la movilidad de electrones y huecos en la celda solar orgánica sirve para estimar las posibles limitaciones que el uso de la celda podría presentar en distintas aplicaciones.

Existen varios métodos disponibles para la extracción de información acerca de la naturaleza de los portadores de carga y la movilidad. La aparición del método CELIV (Charge Extraction by linearly increasing voltage) en el año 2000 por Juška (Juška, Arlauskas, Viliūnas, & Kočka, 2000) ha logrado la comprensión de varios mecanismos de recombinación y transporte de carga en celdas solares (Hanfland, Fischer, Brütting, Würfel, & MacKenzie, 2013) (Kazukauskas, Pranaitis, & Arlauskas, 2009). Este método requiere que las muestras se sometan a variaciones de voltajes e intensidades de luz. (Research, 2015). Mediante estas variaciones se produce voltajes transitorios característicos que se utilizará posteriormente para el análisis de la eficiencia de la celda.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

La necesidad de satisfacer la demanda energética creciente del mundo y la disminución en el uso de materiales fósiles como combustibles, promueve la generación de proyectos cuyo objetivo es mejorar tecnologías relacionadas a la energía renovable, como es la energía solar fotovoltaica. Ante esto, surge la necesidad de equipos especializados que faciliten el análisis y pruebas de estas nuevas propuestas.

La energía solar está acompañada de numerosos beneficios que la sitúan como una de las energías renovables más prometedoras. Es renovable, no contaminante y disponible en todo el

planeta, por lo que es capaz de contribuir al desarrollo sostenible. Dada su importancia es indispensable buscar alternativas para mejorar la eficiencia de los paneles solares.

Dentro de la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, el Objetivo 7.2 menciona que hasta el 2030 se plantea aumentar la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas (CEPAL, 2016). En este contexto diferentes grupos de investigación se encuentran trabajando en la proposición y diseño de nuevas celdas solares tanto orgánicas como inorgánicas.

En la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE los centros de investigación CENCINAT y CICTE se encuentran trabajando en investigación y desarrollo de nuevas tecnologías, una parte de esta investigación se centra en las nuevas tecnologías en celdas solares, dichos proyectos requieren métodos de prueba y verificación de funcionamiento. A fin de medir la eficiencia de las nuevas propuestas, es necesario contar con un método de caracterización y medición de los parámetros de las celdas solares.

El presente trabajo de titulación consiste en un sistema de caracterización de celdas solares mediante la obtención de curvas de voltaje-corriente y el estudio de la movilidad de portadores de carga en celdas de película delgada basado en el método CELIV.

El método CELIV se ha venido empleando en laboratorios para la extracción de información sobre portadores de carga en celdas orgánicas. Sin embargo, en el mercado no hay disponibilidad comercial de un equipo específico para las mediciones necesarias, por lo cual, los grupos de investigación a lo largo de los años han desarrollado e implementado sus propios sistemas de medición.

El sistema prototipo abarca las necesidades de caracterización requeridas y de medición de movilidad de portadores de carga con equipos disponibles en el CICTE los cuales han sido

facilitados para la elaboración del trabajo. Finalmente, se busca que el sistema diseñado de apertura al desarrollo de proyectos afines que continúen con la línea de investigación de celdas solares.

### 1.3. ALCANCE

Para cumplir con los objetivos de este proyecto es necesario:

- Proponer un sistema para la caracterización de celdas solares y la medición de movilidad de portadores de carga.
- Comprobación de funcionamiento
- Realizar pruebas de caracterización en celdas solares inorgánicas y orgánicas de película delgada.

Para el sistema de medición de la Curva I-V se propone el uso de una tarjeta de adquisición Arduino y un simulador solar LED. Es necesario la creación de una interfaz de usuario para la visualización y manejo de datos.

El sistema propuesto para la medición de movilidad de portadores de carga mediante CELIV se basa en un módulo de adquisición de datos de la marca National Instruments, el PXIe-1082, que está diseñado para un amplio rango de pruebas y medidas en aplicaciones de alto rendimiento. De forma adicional, es necesario el uso de varios módulos PXIe como complemento al chasis el cual consiste en un osciloscopio de alta velocidad y alta precisión que además condiciona las señales para la adquisición y un generador de onda arbitraria. (Instrument, 2017a). Los equipos aquí mencionados y las licencias necesarias para su uso se encuentran disponibles en los laboratorios del CICTE y se utilizarán a petición de los centros de investigación involucrados.

En base a los equipos previamente mencionados se procederá al diseño del sistema necesario para la adquisición de datos. La información será procesada mediante los algoritmos que

conforman la caracterización de una celda solar y el método CELIV implementándolos en la plataforma de desarrollo LabVIEW. La interfaz de usuario se empleará para la posterior visualización de datos obtenidos. El diseño de la interfaz de usuario debe ser apropiado para el uso de cualquier individuo independiente de su rama de especialización.

El segundo punto a desarrollar consiste en la calibración y pruebas del sistema desarrollado en el punto anterior. Para la calibración del equipo se realizará mediciones en paneles solares, esto debido a que, existen diversos estudios realizados e información que pueden ser tomados como referencia. Y a partir de estos resultados se busca contrastar con otros estudios para verificar el correcto funcionamiento del sistema.

Una vez el sistema se encuentre calibrado, se procederá al tercer punto el cual consiste en realizar pruebas en paneles solares. Del primer sistema se obtendrá las curvas características I-V y potencia, mientras que de las pruebas con CELIV se obtendrá voltajes transitorios característicos que se emplearán después para el análisis de movilidad de portadores. Finalmente, los resultados se validarán con la comparación con estudios previos.

## **1.4. OBJETIVOS.**

### **1.4.1. OBJETIVO GENERAL**

Caracterizar mediante curvas I-V y movilidad de portadores de carga, celdas solares de película delgada

### **1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diseñar e implementar un sistema de adquisición de datos de baja potencia para la recolección de parámetros característicos de celdas solares de película delgada.

- Diseñar algoritmos para la obtención de características de celdas solares inorgánicas y orgánicas.
- Desarrollar interfaces gráficas para la visualización de datos medidos.
- Calibrar los sistemas de medición en función a trabajos previos.
- Realizar mediciones de las características necesarias para determinar la eficiencia de las celdas solares orgánicas e inorgánicas.
- Comparar los resultados obtenidos para celdas solares orgánicas e inorgánicas con estudios previos para su validación.

## CAPÍTULO II

### CELDA SOLARES Y SU CARACTERIZACIÓN

#### 2.1. ENERGÍA

Se define energía como la capacidad que tiene la materia de producir trabajo en forma de movimiento, luz, calor, etc. Dependiendo del sistema físico que lo comprende nos podemos encontrar con distintos tipos de fuentes de energía.

Los procesos de conversión de energía mantienen una cantidad de energía constante de acuerdo al principio de conservación de la energía, el que establece que "la energía ni se crea ni se destruye, sólo se transforma". Sin embargo, la energía procedente de distintos medios puede transformarse en otros tipos de energía dependiendo de su requerimiento. Los ejemplos más sencillos de entender están basados en energía no renovable, esto debido a que el petróleo es la principal fuente de energía en la actualidad. Por ejemplo: Un barril de gasolina utilizado en un motor se transforma en energía mecánica o gas natural en una cocina se transforma en energía calórica, etc. (Roldán, 2008)

Desde un punto de vista social y económico, se entiende a la energía como un recurso natural primario, empleado para realizar trabajos o servir para el desarrollo de actividades económicas. Es importante mencionar que toda la producción de energía y sus formas derivadas puede ser medidas en las mismas unidades. Entre las unidades más comunes tenemos la tonelada equivalente de carbón que en términos de energía eléctrica se puede convertir en 8138.9 kW/h. Las distintas formas de energía son vitales para el desarrollo de nuestra vida y actividad, en la Tabla 1

se presenta el producto generado por la utilización de algunos tipos de energía.

**Tabla 1***Formas de energía y su producto generado*

<b>Formas de energía</b>	<b>Produce o genera</b>
<b>Térmica</b>	Energía liberada en forma de calor
<b>Mecánica</b>	Energía producida por el movimiento y posición de un cuerpo
<b>Química</b>	Energía producida de reacciones químicas
<b>Eólica</b>	Energía cinética producida por corrientes de aire
<b>Eléctrica</b>	Energía resultante de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos
<b>Nuclear</b>	Energía liberada como consecuencia de una reacción nuclear
<b>Fotovoltaica</b>	Permite la transformación de energía solar en energía eléctrica
<b>Hidráulica</b>	Energía cinética y potencial que se obtiene aprovechando el movimiento y circulación de agua

Fuente: (Espejo Marín, 2004)

**2.2. ENERGÍA NO RENOVABLE**

Se considera fuentes de energía no renovable a las fuentes que una vez utilizada o transformada en otro tipo de energía desaparece. En esta lista de energía nos encontramos principalmente con combustibles fósiles. Entre las principales fuentes de energía no renovable tenemos las presentadas en la Tabla 2

**Tabla 2***Fuentes de energía no renovable*

<b>Tipo de energía</b>	<b>Procedencia</b>
<b>Carbón</b>	Minas
<b>Gas natural</b>	Pozos
<b>CONTINÚA</b>	

<b>Otros Gases</b>	Obtención diversa
<b>Petróleo y sus derivados</b>	Pozos
<b>Madera (Leña)</b>	Naturaleza
<b>Nuclear</b>	Mineral

Fuente: (Roldán, 2013)

### 2.3. ENERGÍA RENOVABLE

Se consideran fuentes de energía renovable a las fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales (Roldán, 2013). La Tabla 3 presenta las principales fuentes de energía renovable utilizadas en la actualidad.

**Tabla 3**

*Fuentes de energía renovable*

<b>Tipo de energía</b>	<b>Procedencia</b>
<b>Energía eólica</b>	Viento
<b>Energía geotérmica</b>	Calor interno de la tierra
<b>Energía hidráulica</b>	Agua
<b>Energía mareomotriz</b>	Mar
<b>Energía solar térmica</b>	Sol
<b>Energía fotovoltaica</b>	Sol
<b>Energía de biomasa</b>	Materias agrícolas diversas
<b>Energía de gradiente termino oceánico</b>	Mar

Fuente: (Espejo Marín, 2004)

### 2.4. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

La energía solar constituye la principal fuente de vida en la tierra, está relacionada con procesos biofísicos, geofísicos y químicos que permiten el desarrollo de la vida en el planeta. La

energía solar puede ser aprovechada de dos formas: térmica, que transforma la energía del sol en energía calorífica y fotovoltaica, que convierte la energía solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico. (Espejo Marín, 2004)

La obtención directa de electricidad a partir de luz se conoce como efecto fotovoltaico. Los sistemas fotovoltaicos constituyen un conjunto de elementos denominados celdas solares o células fotovoltaicas, dispuestas en paneles, los cuales se encargan de realizar una transformación directa de energía solar a eléctrica.

El material usado y la tecnología necesaria para la fabricación de células solares se asemeja a la necesaria para la elaboración de microchips de ordenadores, razón por la cual se considera estos dispositivos como alta tecnología. (Pereira, 2015) La Figura 1 muestra la instalación de un panel solar en una residencia privada, las cuales se instalan principalmente como medida de ahorro en el consumo eléctrico familiar.



**Figura 1** Panel solar colocado en una residencia.

*Fuente (nación.com, 2019)*

## **2.5. PANEL SOLAR**

Los paneles solares, también llamados paneles fotovoltaicos o módulos fotovoltaicos son dispositivos compuestos de células fotovoltaicas, las cuales, son capaces de producir energía eléctrica a partir de la energía solar que incide sobre estas. Los paneles fotovoltaicos, en función del tipo de célula que los forman, se dividen en:

- Cristalinas: con materiales cristalizados.
- Amorfas: cuando el silicio no se ha cristalizado.

La efectividad de conversión de los paneles depende del tipo de cristales, peso y grosor principalmente. La eficiencia que presentan los paneles va de entre un 10% a 20% de conversión dependiendo del material del que están compuestas y de esto también varía su costo. (Pareja, 2008)

Cabe mencionar que el costo de elaboración de paneles solares se ha venido reduciendo de forma constante desde que se fabricaron las primeras células solares comerciales y gracias a la eficiencia de conversión que presentan, son consideradas competitivas con las fuentes de energía convencionales en un creciente número de regiones geográficas.

## **2.6. CELDAS SOLARES**

Las celdas solares son los componentes del panel solar encargados de la conversión de la radiación proveniente del sol en energía eléctrica, mediante el efecto fotovoltaico. (Pereira, 2015) Por sí sola, Una celda es incapaz capaz de generar grandes cantidades de energía, por lo que se combina varias de ellas y se forma un panel solar. Los paneles solares pueden estar conformados por varios arreglos de celdas (Muerza, 2009), que definen el tamaño y la potencia a suministrar por el panel, de esto también dependerá la configuración de las conexiones dentro del panel.

Las condiciones de funcionamiento de una celda solar se pueden ver afectadas por variables como radiación solar y temperatura de funcionamiento. Por esta razón se ha definido condiciones de trabajo nominales. Estas condiciones normalizadas son 25°C de temperatura y 1000  $W/m^2$  de radiación solar.

Existen dos formas básicas de utilizar energía eléctrica a partir de módulos fotovoltaicos:

- Instalaciones aisladas: Generadores autónomos que producen su propia energía eléctrica para su auto consumo, generalmente respaldados con baterías
- Instalaciones conectadas a la red eléctrica: Generadores que se suman a la red principal de generación y distribución de energía eléctrica a través de dispositivos de procesamiento de potencia, son de mayor capacidad y pueden de ser el caso generar aisladas de la red principal.

## **2.7. TIPOS DE PANELES SOLARES**

La principal diferencia entre los distintos tipos de paneles solares que se presenta a continuación radica en la eficiencia de generación y el costo para su elaboración.

### **2.7.1. PANELES MONOCRISTALINOS**

Los paneles solares monocristalinos se componen de celdas de secciones de un único cristal de silicio. Esto forma una red cristalina que se distribuye de forma uniforme con muy pocas imperfecciones en su superficie.

Son las celdas solares con mayor eficiencia en el mercado logrando alcanzar eficiencias alrededor de 20%. (Pereira, 2015) Sin embargo, el proceso de cristalización es costoso y complicado.

**Tabla 4***Ventajas y Desventajas de los paneles solares con celdas monocristalinas*

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Presentan el índice de conversión de energía fotovoltaica más alto	Los paneles con celdas monocristalinas son más costosos debido a la complejidad de su proceso de fabricación.
Es tecnología con un gran desarrollo a lo largo de los años, lo que ha probado su durabilidad y eficiencia	
Son seguros para el medio ambiente.	

Fuente: (Pereira, 2015)

**2.7.2. PANELES POLICRISTALINOS**

Para los paneles solares policristalinos el proceso de cristalización no es ordenado y la red cristalina no es la misma en todo el material, esta se encuentra compuesta por pequeñas partículas cristalizadas lo que ocasiona reflexión de luz no uniforme. Se encuentran compuestas principalmente de silicio y suelen presentar eficiencias de entre el 11-15% de conversión de energía. (Pereira, 2015)

**Tabla 5***Ventajas y Desventajas de los paneles solares con celdas policristalinas*

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Más económicos que los paneles monocristalinos por trabajar con pedazos de cristal de silicio los cuales facilitan la fabricación	Son menos eficientes que los paneles solares monocristalinos debido al efecto de reflexión de luz no uniforme

Fuente: (Pereira, 2015)

### 2.7.3. PANELES DE PELÍCULA DELGADA

Los paneles solares de celdas de película delgada, de capa fina o amorfas se desarrollaron con el principal objetivo de reducir los procedimientos tradicionales de fabricación de las tecnologías cristalinas, las cuales están relacionadas con altas pérdidas de material. Las celdas de película delgada no cuentan con una red cristalina obteniendo resultados en eficiencia inferiores a los presentados por las celdas anteriores.

Los valores de eficiencia varían entre un 7 a 12%. (Pereira, 2015) Sin embargo, esta característica de baja eficiencia se ve compensada por su bajo costo de fabricación y una menor variación de las características de funcionamiento con el cambio de temperatura. Una de sus desventajas principales es que se considera necesaria el doble de área para lograr la misma potencia conseguida con una celda monocristalina.

**Tabla 6**

*Ventajas y Desventajas de los paneles solares con celdas de película delgada*

Ventajas	Desventajas
Son las celdas solares más económicas.	Menor eficiencia que las celdas mono y policristalinas.
Por su constitución son flexibles y se pueden doblar sin romperse	Requieren alrededor del doble de espacio para generar la misma cantidad de energía que las celdas mono y policristalinas.
Por su característica de flexibilidad pueden aplicarse a casi cualquier tipo de superficie, metal, plástico o vidrio.	Utilizan teluro de cadmio, una sustancia tóxica que representan un problema de contaminación al momento de desecharlas cuando llegan al final de su vida útil
<b>CONTINÚA</b>	

---

Superan el desempeño de otros paneles en condiciones de altas temperaturas.

---

Poseen un mejor desempeño en trabajo con luz indirecta.

---

Fuente: (Pereira, 2015)

#### **2.7.4. CELDAS SOLARES ORGÁNICAS**

Las celdas solares orgánicas están conformadas por al menos una capa activa de moléculas orgánicas. Existen tres tipos: moleculares, de polímeros orgánicos e híbridas. Las más utilizadas y estudiadas hasta el momento son las basadas en polímeros orgánicos semiconductores. Por lo general, las celdas solares orgánicas están formadas por sustratos plásticos, como pueden ser: sea naftalato de polietileno (PEN) o polietileno tereftalato (PET) lo cual facilita su fabricación a gran escala, lo que a su vez abarata costos.(Torres Camargo, 2016)

Se espera de las celdas solares orgánicas como una alternativa a las celdas de silicio mencionadas previamente. En estudios actuales la eficiencia de las celdas alcanza un máximo de 11% de conversión energética, sin embargo, el principal inconveniente con estas celdas, además de su baja eficiencia es su inestabilidad, es que presenta una rápida degradación (Ornelas-soto et al., 2014) debido a tratarse de componentes orgánicos, el oxígeno y agua degradan la vida útil de los materiales que conforman la celda solar, razón por la cual, la mayor parte de celdas solares orgánicas continúan en desarrollo.

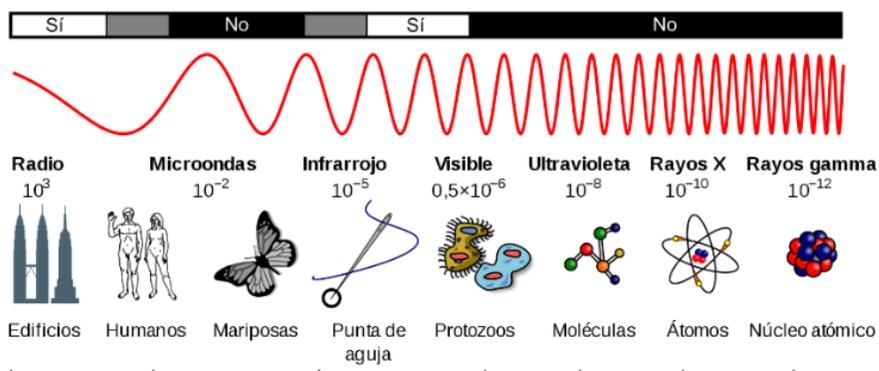
Entre algunas de las ventajas que podemos encontrar en las celdas solares orgánicas tenemos:

- Al igual que las celdas de película delgada de silicio amorfo, son flexibles.
- Facilidad de mantenimiento.
- Son biodegradables.

- Ligeras.
- Pueden funcionar en soportes transparentes, Por lo que se planea utilizarlas en superficies como ventanas.
- La materia prima requerida y el proceso de fabricación es económico.
- Se ha descubierto también que las celdas solares orgánicas, además de ser elementos eléctricos, son magnéticos, lo que implica que mediante la aplicación de campos magnéticos externos pueden modificar la corriente eléctrica que generan. (Torres Camargo, 2016)

## 2.8. RADIACIÓN SOLAR

Debido a las reacciones nucleares de fusión que tienen lugar en el interior del sol alrededor de 4 millones de toneladas de materia se transforman en energía cada segundo. Una pequeña parte de toda esta energía irradiada por el sol llega a la tierra ubicada a una distancia de 150 millones de kilómetros de distancia aproximadamente. Como tal, la radiación solar se entiende como el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol (Ordóñez, 2012) las cuales se pueden observar en la Figura 2.



**Figura 2** Espectro Electromagnético

Fuente: (astrofiscayfisica, 2012)

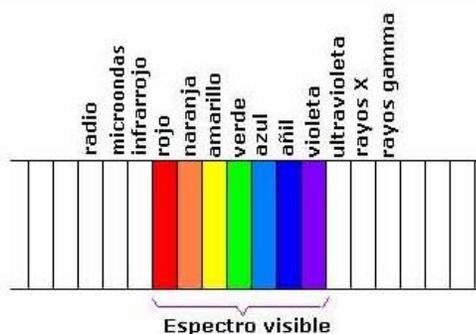
La irradiación solar es la magnitud utilizada para indicar el valor de la radiación que incide en una superficie, la irradiación representa la potencia incidente del sol por metro cuadrado. Tras atravesar la atmosfera, la radiación solar se atenúa debido a los gases y partículas que se encuentran en la atmosfera, llegando a valores alrededor de los  $1000 \text{ W/m}^2$  en la superficie terrestre, esto puede variar dependiendo del lugar, hora del día, época del año y condiciones atmosféricas.

Existe muchas características importantes de la energía solar que permiten determinar cómo interactúa la luz solar incidente con las celdas fotovoltaicas, las más importantes a tener en cuenta son (Honsberg & Bowden, 2014):

- El espectro de la luz incidente.
- La densidad de energía radiante proveniente del Sol.
- El ángulo con el que la radiación solar incide en el módulo fotovoltaico.
- La energía radiante del sol durante el año o día para una superficie particular.

### 2.8.1. ESPECTRO DE LUZ

La luz solar como tal es una forma de radiación electromagnética, y la luz visible es una pequeña fracción de la energía solar emitida por el sol, como se muestra en la Figura 3.



**Figura 3** Espectro de radiación, Luz Visible.

*Fuente: (Casanchi, 2003)*

El espectro electromagnético describe la luz como una onda con una longitud de onda particular. Esto funcionó como una primera premisa, sin embargo, a finales de 1800, surgió un problema con la idea basada en que la luz es una onda cuando se hizo evidente que los experimentos que miden el espectro de longitudes de onda de objetos calientes no podían ser explicados usando las ecuaciones basadas en la onda de la luz. Esta problemática se mantuvo hasta que alrededor de 1920 los trabajos conjuntos de Planck y Einstein determinaron que la luz se puede observar como un conjunto de partículas de energía, llamados fotones.

#### **2.8.1.1. FLUJO DE FOTONES**

Un fotón es la partícula elemental responsable de las manifestaciones cuánticas del fenómeno electromagnético. Se considera al fotón como la partícula que porta todas las formas de radiación electromagnética.

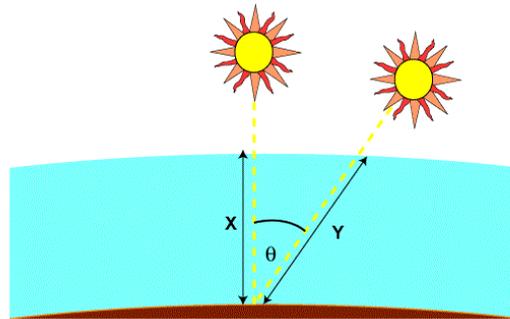
El flujo de fotones se encuentra definido como el número de fotones por segundo por unidad de área y la importancia que radica en estos es que permiten determinar el número de electrones que se generan en una celda solar y esto a su vez permite conocer la corriente producida.

En celdas solares:

- Cuando la energía de un fotón es igual o mayor que la banda prohibida del material, el fotón se absorbe y excita un electrón en la banda de conducción.
- Los portadores mayoritarios y minoritarios son generados cuando se absorbe un fotón.
- La generación de portadores de carga debido a fotones es la base de la producción de la energía fotovoltaica.

### 2.8.2. MASA DE AIRE

Se entiende como masa de aire a la longitud que toma la luz a través de la atmosfera normalizado a la ruta más corta posible que se considera la vertical, como se muestra en la Figura 4. La masa de aire proporciona un valor de la potencia de luz a medida que esta atraviesa la atmosfera y es absorbida por las partículas presentes. Se considera que cuando el sol está directamente vertical la masa de aire corresponde a un valor de 1.



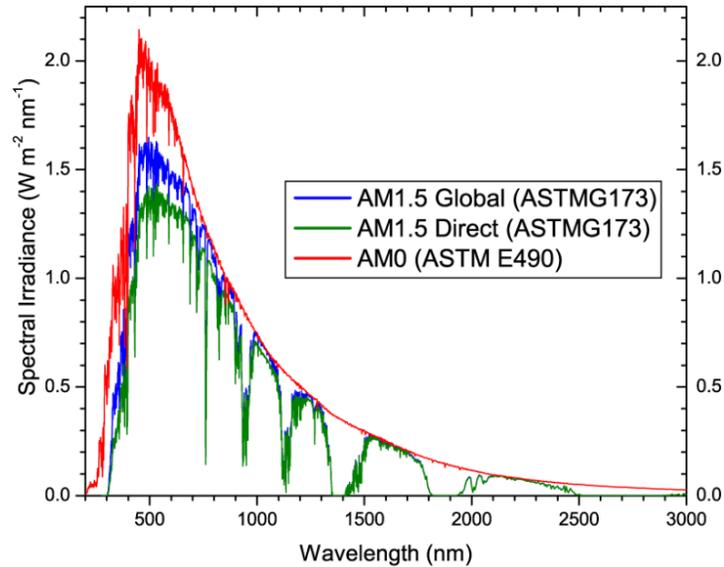
**Figura 4** Variación de ángulos de la Masa de Aire.

*Fuente: (PVeducacion, 2013)*

#### 2.8.2.1. ESPECTRO E IRRADIACIÓN SOLAR ESTANDARIZADAS

La eficiencia de una celda solar es sensible a las variaciones de potencia y al espectro de la luz que incide en esta. Por esto, con el fin de facilitar las mediciones y comparaciones de celdas medidas en diferentes lugares se creó una densidad de potencia y espectro estándar.

El espectro estándar en la superficie de la Tierra se llama AM1.5G. El valor de radiación para este estándar es aproximadamente  $970 \text{ W/m}^2$ . Sin embargo, el espectro AM1.5G estándar ha sido normalizado a  $1 \text{ W/m}^2$  por conveniencia. La Figura 5 podemos observar el espectro normalizado para condiciones fuera de la atmosfera y dentro de esta. Cabe mencionar que dentro de la atmosfera también existe una consideración de radiación en la cual se toma en cuenta solo la radiación directa para la cual el valor de radiación corresponde a  $900 \text{ W/m}^2$ .



**Figura 5** Espectro solar estándar Fuera de la Atmosfera AM0, dentro de la atmosfera considerando radiación Directa AM1.5D y radiación total AM1.5G.

*Fuente: (PVEDucation.org, 2013)*

### 2.8.2.2. RADIACIÓN SOLAR EN UNA SUPERFICIE INCLINADA

Se sabe que, en una celda solar o panel fotovoltaico, cuando la superficie absorbente y la luz solar son perpendiculares la densidad de potencia en la superficie es igual a la irradiancia solar, sin embargo, este ángulo cambia de forma continua y la densidad de potencia en la celda es menor a la luz solar incidente.

Es común que los paneles solares estén instalados con una inclinación respecto a la horizontal para aprovechar mejor las condiciones de luz dependiendo de la zona en que se coloquen, sin embargo, los fabricantes entregan condiciones de prueba con respecto a luz horizontal. Por esta razón suele ser necesario realizar cálculos adicionales para conocer la densidad de potencia real en la celda solar.

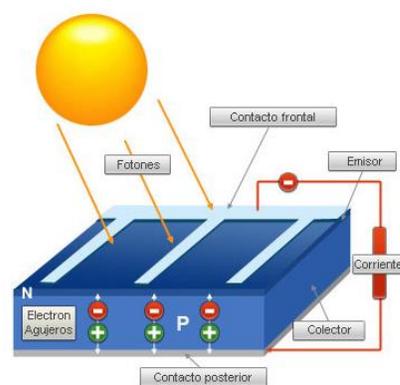
## 2.9. ESTRUCTURA INTERNA DE LAS CELDAS SOLARES

Como se ha venido hablando, las celdas solares se tratan de dispositivos eléctricos capaces de transformar energía lumínica (fotones) en energía eléctrica basado en el principio del efecto fotoeléctrico.

Para la generación de energía eléctrica, se requiere que la celda cumpla con dos procesos. El primero, requiere un material capaz de absorber luz, esta a su vez, debe ser capaz de excitar electrones en estado de energía más altos. El segundo proceso consiste en que el movimiento generado en estos electrones sea conducido a un circuito externo y luego de disipar su energía en este, volver a la célula solar (Montoya Rasero, 2010). La Figura 6 muestra el corte transversal de una celda solar y los componentes para su funcionamiento.

Los pasos básicos en el funcionamiento de una célula solar son (Honsberg & Bowden, 2014):

- Generación inducida por portadores por la luz.
- Recolección de portadores para generación de corriente.
- Generación de una tensión a través de la célula solar.
- Disipación de potencia en la carga.



**Figura 6** Corte transversal de una célula solar.

*Fuente: (Zytech, 2018)*

Existe variedad de elementos y procesos capaces de realizar la conversión de energía, sin embargo, en la práctica lo más común es el trabajo con semiconductores con unión P-N.

### **2.9.1. UNIÓN P-N**

La unión PN es una estructura fundamental comúnmente asociada a diodos y transistores, formado por la unión de dos sustratos de naturaleza N y P por su composición atómica (Mercado Miranda, 2009). Para lograr cristales N y P es necesario dopar cristales de metal puro con impurezas u otros compuestos químicos.

Para facilitar el entendimiento, se mencionará cristales de silicio de tipo N y P. Se explicará de esta manera debido a que el uso de silicio es el más extendido en semiconductores y se presenta como una alternativa factible para la comprensión del funcionamiento interno de las celdas solares tanto orgánicas como inorgánicas.

En forma resumida, lo que ocurre en una juntura tipo P-N es que, al unir los materiales tipo N con los P se equilibra el material semiconductor, los electrones (cargas mayoritarias en el sustrato tipo N), ocupan los huecos (cargas mayoritarias en el sustrato tipo P) Esto resulta en un campo de electrones en la unión y la creación de una región de agotamiento. Finalmente, un voltaje será el resultado del campo eléctrico que se forma en esta unión, siempre y cuando la celda este expuesta a la irradiación solar.

La razón principal de mencionar las junturas y el funcionamiento en base a diodos es que el modelo de celda solar en base al cual se trabaja en el proyecto es la aproximación de un Diodo. Las características intrínsecas del diodo dentro de las celdas solares nos permiten conocer valores como son corriente de saturación del Diodo ( $I_0$ ) y la corriente de oscuridad, valores que se mencionaran más adelante.

### **2.9.1.1. SILICIO TIPO N**

Para la construcción de un semiconductor de tipo N es necesario un proceso de dopado añadiendo un elemento pentavalente. Lo que se busca es aumentar el número de portadores de carga libres, para este caso en particular se integra electrones libres dejando como resultado portadores de carga negativos (Ifent, 2005).

### **2.9.1.2. SILICIO TIPO P**

Para la construcción de un semiconductor de tipo P es necesario un proceso de sustitución de átomos del semiconductor por átomos con menos electrones de valencia. Por lo general se realiza con un elemento trivalente. Lo que se busca, al igual que en el caso anterior, es aumentar el número de portadores de carga libres, sin embargo, para este caso integra portadores de carga positivos libres los cuales se conocen también como huecos o ausencia de carga. (Ifent, 2005)

## **2.9.2. BANDA PROHIBIDA**

Para que se produzca el efecto fotovoltaico en un semiconductor es necesario que los fotones incidentes en esta tengan una energía mayor que el valor mínimo determinado por la banda prohibida ( $E_g$ ), también denominada “GAP” o barrera de energía la cual se presenta como un valor en Electrón-Voltios, el cual corresponde a la energía que un electrón adquiere al pasar a través de una diferencia de potencial de exactamente un voltio (Lebo, 2001). Algunas características que presenta la banda prohibida son:

- La energía de cada fotón que la celda solar aprovecha se denominada  $E_g$ .
- Dependiendo de los materiales que componen la celda solar se puede obtener valores de  $E_g$  bajos, en este caso la energía que se desaprovecha es mayor.

- El valor óptimo de  $E_g$  suele encontrarse alrededor de 1.5 [eV] para dispositivos de silicio.

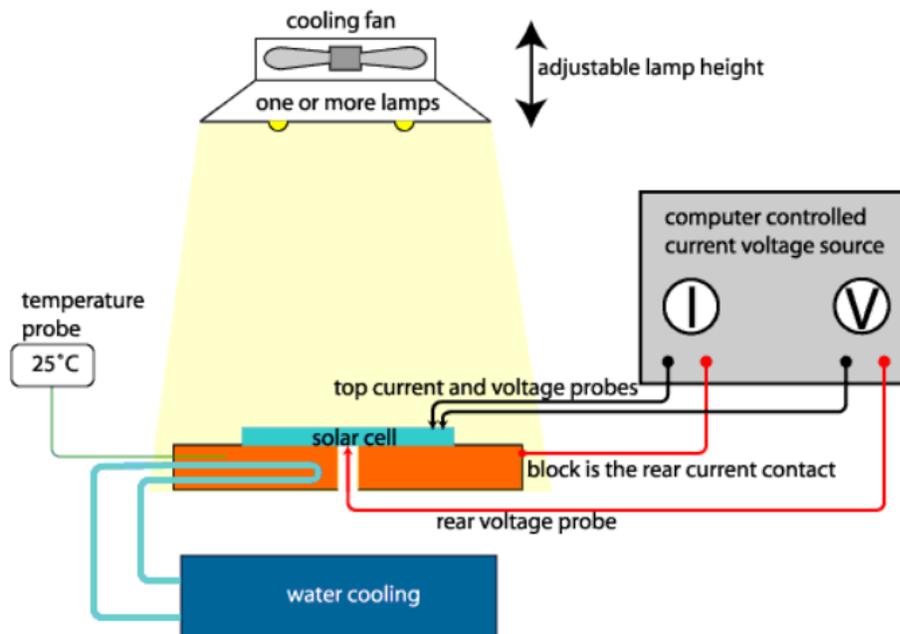
## 2.10. CARACTERIZACIÓN DE UNA CELDA SOLAR

La medición de la eficiencia de las celdas solares es la técnica fundamental para la caracterización tanto de celdas orgánicas como inorgánicas. Este método permite comparar dispositivos de diferente fabricación en laboratorios con diferente tecnología logrando resultados similares. Los estándares para estas pruebas son:

- Espectro de masa de aire 1.5 (AM1.5) para células terrestres
- Intensidad de  $1000 \text{ W/m}^2$  o un sol de iluminación
- Temperatura estándar de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$

La razón principal de tener estos valores estándar es el cambio que sufren las celdas solares a las alteraciones de los mismos, más adelante se detallará los cambios surgidos en las celdas al alterar estos valores. La Figura 7 muestra el esquema básico de un equipo para la medición de la curva I-V de una celda solar. Se puede observar de la imagen que está compuesto por una fuente de iluminación, un sistema para la regulación de temperatura y finalmente un equipo para la medición de corriente y voltaje de la celda solar.

Al trabajar con lámparas es importante mencionar que se puede variar la altura de estas para cambiar la potencia incidente en la celda sin que se afecte el espectro de Luz.



**Figura 7** Estructura básica de un probador I-V para celdas solares.  
Fuente. (PVEDucation, 2015)

### 2.10.1. FUENTE DE ILUMINACIÓN

Para la caracterización se requiere que la fuente de luz coincida lo más posible con las condiciones de luz solar. Es importante que tanto el espectro como la intensidad lumínica estén lo más apegadas posible al estándar.

La solución más obvia sería usar la energía solar directamente para realizar mediciones, dependiendo de la época del año y algunas correcciones adicionales es factible, sin embargo, para pruebas en laboratorios es más común utilizar fuentes de luz artificial. La lámpara más utilizada suele ser de arco de xenón con filtros instalados para aproximarse al espectro AM1.5G. (Honsberg & Bowden, 2014)

Un punto a tener en consideración al momento de utilizar las lámparas es el incremento de temperatura que estas ocasionan en la celda solar. La elevada temperatura en la celda puede ocasionar un mal funcionamiento de las placas solares debido a que su rendimiento se ve reducido.

### **2.10.2. CONTROL DE TEMPERATURA**

La iluminación tanto del sol como de la fuente artificial suelen ser intensas por lo que es necesario la eliminación del exceso de calor. La solución más común suele ser trabajar sobre una superficie de metal con una fuente de agua que corriendo bajo esta y mediante un sistema de control se procura mantener una temperatura constante de 25°C como requiere la norma.

Los incrementos de temperatura tienden a reducir el rendimiento de las placas solares. Un incremento en la radiación suele significar también un incremento en la temperatura de la celda. Es importante mencionar que las celdas de silicio amorfo hidrogenado no ven su funcionamiento alterado por los incrementos de temperatura.

### **2.11. ECUACIÓN DEL DIODO NO IDEAL**

Una aproximación para el funcionamiento de una celda solar está dada por el modelo de un diodo. Este modelo muestra una buena relación entre facilidad de cálculos y exactitud por lo que es de gran utilidad a la hora de comprender el funcionamiento interno de una celda.

Para poder comprender las ecuaciones del modelo matemático que parten de este método es necesario abordar en primer lugar la ecuación del diodo o Modelo de Shockley del Diodo. Este modelo matemático permite aproximar el comportamiento del diodo en la mayoría de aplicaciones y está basado en la relación entre la intensidad de corriente y la diferencia de potencial. Esta relación la podemos observar en la ecuación ( 1 )

$$I_D(V) = I_o \left[ \exp\left(\frac{eV}{mkT_c}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

Donde:

$I_D(V)$	Corriente del diodo
$I_o$	Corriente de saturación del diodo o corriente inversa
$e$	Carga del electrón ( $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ )
$m$	Factor de idealidad del Diodo
$k$	Contante de Boltzman ( $1.381 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ )
$T_c$	Temperatura en la Celda solar
$V$	Voltaje

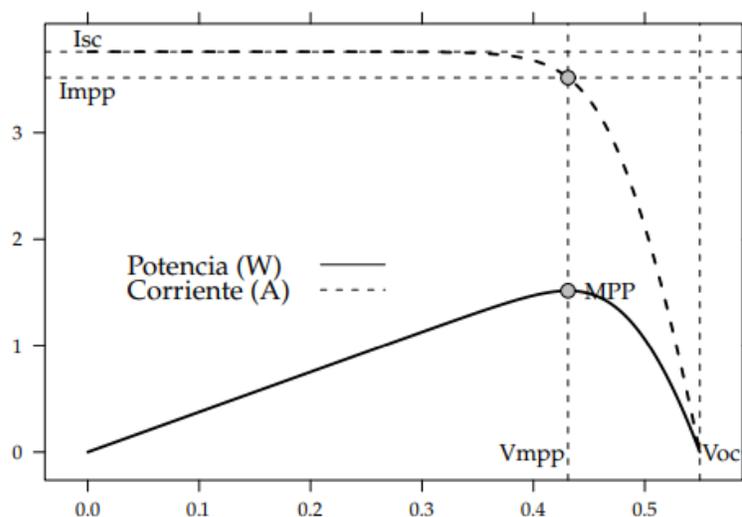
## 2.12. CURVA INTENSIDAD –VOLTAJE

La curva I-V de una célula solar es la superposición de la curva I-V del diodo de las células solares en oscuridad con la corriente inducida. (Honsberg & Bowden, 2014) La curva I-V es una de las representaciones más utilizadas del funcionamiento de las celdas solares, como se muestra en la Figura 8, en esta se presenta la corriente que proporciona el panel o celda solar en función del voltaje generado.

La curva además de representar valores de corriente y voltaje en función de la temperatura e irradiación que recibe el panel también permite encontrar valores característicos como son corriente de cortocircuito  $I_{sc}$  y voltaje de circuito abierto  $V_{oc}$ . De esta gráfica también se puede calcular la

curva de Potencia-Voltaje mediante el producto de  $V * I$ , la cual permite encontrar puntos de máxima corriente y máximo voltaje.

Para obtener esta gráfica de forma experimental se somete la celda a una fuente de iluminación contante y se realizan incrementos de carga en los bornes del panel.



**Figura 8** Curva I-V y curva de potencia de una celda solar.

Fuente: (Perpiñán, 2015)

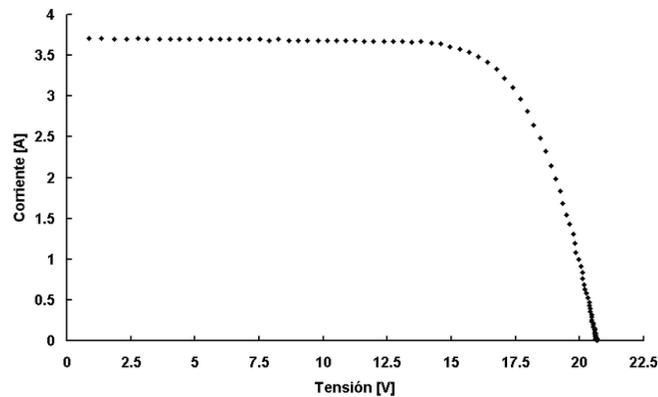
La ecuación característica para representar una celda solar está dada por la ecuación ( 2 ). En esta se representa la corriente eléctrica suministrada por la celda solar como la diferencia entre la corriente fotogenerada o fotocorriente ( $I_L$ ) y la corriente de recombinación o corriente del diodo ( $I_D(V)$ ).

$$I = I_L - I_D(V) \quad (2)$$

Considerando la ecuación ( 1 ), que representa el funcionamiento de un diodo tenemos que

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{mkT_c}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

Si reemplazamos valores en la ecuación ( 3 ), nos encontraremos con una curva característica I-V que presenta una forma estándar, similar a la presentada en la Figura 9.



**Figura 9** Curva I-V estándar.

Fuente: (Firman, 2019)

### 2.12.1. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO $I_{sc}$

La corriente de cortocircuito se presenta como la corriente máxima que puede entregar el panel solar. Para la medición de esta es necesario la conexión directa de un amperímetro en los terminales de la celda y al no existir una carga para el paso de corriente el voltaje es cero.

Una de las principales utilidades de esta medición es que la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) es igual a la corriente fotogenerada ( $I_L$ ) en condiciones de circuito abierto. Esta igualdad en ciertas condiciones es importante al momento de obtener la curva I-V de funcionamiento aproximado de la celda solar.

### 2.12.2. VOLTAJE DE CIRCUITO ABIERTO $V_{oc}$

El voltaje de circuito abierto se presenta como el voltaje máximo que puede entregar la celda solar. Para la medición de este parámetro es necesaria la conexión de un voltímetro en los terminales de la celda y al realizar mediciones en circuito abierto la corriente asociada será cero.

### 2.12.3. POTENCIA MÁXIMA

El punto de potencia máxima expresa el punto en que la corriente y voltaje de la celda solar logran su valor máximo. Este valor se puede obtener de la curva I-V, sin embargo, se pueden encontrar también a través de una variación de la ecuación ( 3 ).

$$I_M = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV_M}{mkTc}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

La obtención de los valores de potencia máxima nos permite encontrar otros parámetros característicos de la celda solar como son el factor de forma ( $FF$ ) e incluso permiten el cálculo de resistencia en serie y paralelo del modelo de la celda solar como se mostrará más adelante.

### 2.12.4. FACTOR DE FORMA $FF$ .

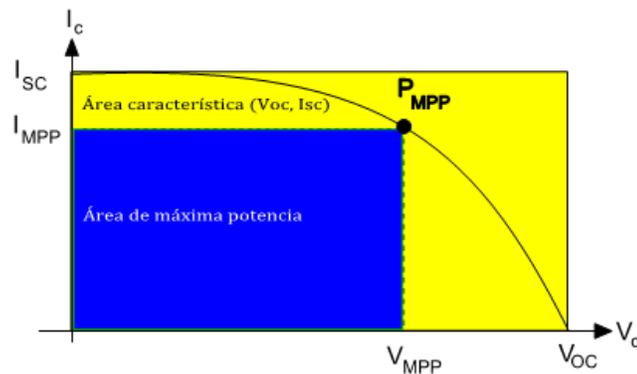
El factor de forma se utiliza como una cuantificación de la forma de la curva característica I-V y está dado por la ecuación ( 5 ).

$$FF = \frac{I_M V_M}{I_{sc} V_{OC}} \quad (5)$$

Haciendo uso de la definición del factor de forma, se puede encontrar también el valor de potencia máxima como se presenta en la ecuación ( 6 ). Los valores típicos de  $FF$  se sitúan alrededor

de 0.7 – 0.8 para celdas de conductores semicristalinos. (Lorenzo, 2006). La forma gráfica que presenta el factor de forma se puede apreciar en la Figura 10. En esta se puede observar el factor de forma como la relación entre las áreas rectangulares formadas por  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$  y el voltaje y corriente máxima ( $V_M$ ,  $I_M$ ). (López, 2014)

$$P_M = FF I_{SC} V_{OC} \quad (6)$$



**Figura 10** Factor de forma en función de corriente de cortocircuito, voltaje de circuito abierto y potencia máxima.

Fuente (Ramón A, 2014)

Otro valor útil que se desprende del factor de forma es el factor de forma en condiciones estándar, el cual está dado por la ecuación ( 7 ) y representa el área de potencia máxima en condiciones estándar.

$$I = I_{SC} \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{V - V_{OC} + I R_S}{V_t} \right] \right\} \quad (7)$$

### 2.13. EFICIENCIA

La eficiencia es el parámetro más comúnmente utilizado para comparar el rendimiento entre celdas solares. La eficiencia se define como la relación entre la producción de energía de la celda solar y la energía entrante del sol.

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \quad (8)$$

Donde:

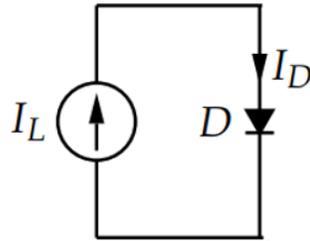
$\eta$  Eficiencia

$P_{in}$  Potencia de entrada (La potencia de entrada para los cálculos de eficiencia es de  $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ )

### 2.14. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA CELDA SOLAR Y MODELO MATEMÁTICO

La ecuación ( 3 ) describe el comportamiento de una celda solar de forma analítica. De forma practica el uso de un circuito equivalente de celda es útil para el estudio de celdas solares interconectadas ya sean estas en serie o paralelo, como ocurre un panel fotovoltaico.

El circuito presentado en la Figura 12 constituido por un diodo ideal, generador de corriente presenta el mismo comportamiento que una celda solar descrita por la ecuación ( 3 ). Sin embargo, en una celda solar real existen efectos no considerados por esta ecuación, que afectan el comportamiento externo de la misma (Lorenzo, 2006). Los efectos están dados por una resistencia en serie y una en paralelo.



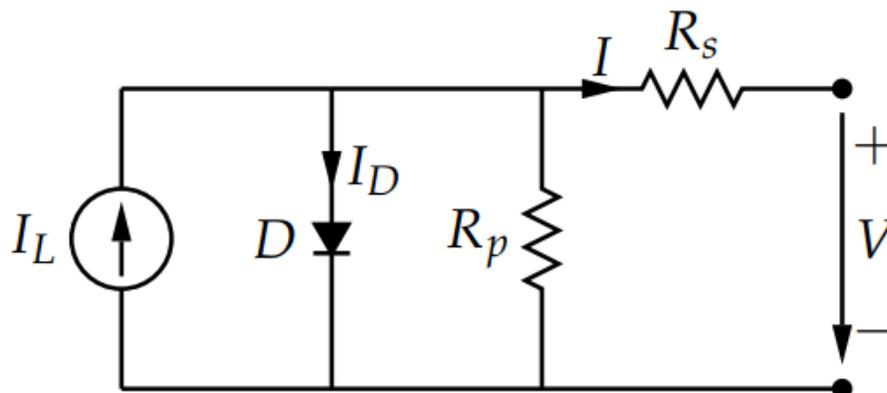
**Figura 11** Circuito equivalente de celda solar.

*Fuente: (Perpiñan, 2015)*

La resistencia en paralelo corresponde a las fugas de corriente proporcionales a la tensión y tiene su mayor influencia en la región de baja tensión. El origen de esta resistencia se debe a fugas de corriente por la superficie de la celda, pequeños cortocircuitos metálicos, etc. La resistencia en serie se debe a los contactos metálicos con los semiconductores. Teniendo en cuenta las resistencias en serie ( $R_s$ ) y la resistencia en paralelo ( $R_p$ ) en la ecuación ( 9 ), la ecuación de la celda solar viene a ser:

$$I = I_L - I_o \left[ \exp\left(\frac{e(V + I R_s)}{mkT_c}\right) - 1 \right] - \frac{(V + I R_s)}{R_p} \quad (9)$$

El nuevo circuito equivalente resultante se presenta en la Figura 12. En este se puede observar los efectos de las resistencias en el circuito. Cuando la resistencia en paralelo es pequeña esta reduce la tensión de circuito abierto y el factor de forma, manteniendo la corriente de cortocircuito. En cambio, la resistencia en serie reduce el factor de forma y la corriente de cortocircuito manteniendo el valor del voltaje de circuito abierto.



**Figura 12** Circuito equivalente de celda solar considerando resistencia en serie y paralelo.

Fuente: (Perpiñan, 2015)

#### 2.14.1.1. CONSIDERACIONES PARA EL CÁLCULO DE VALORES A PARTIR DEL MODELO MATEMÁTICO

La ecuación ( 9 ) describe el funcionamiento de una celda solar, sin embargo, presenta dificultades para estimar directamente el comportamiento de la celda solar debido a que involucra parámetros que no se pueden medir directamente los cuales son ( $I_L$ ) e ( $I_0$ ).

Para dar solución a este problema de medición se debe tomar en cuenta los siguientes supuestos (Lorenzo, 2006):

- Los efectos de la resistencia en paralelo son despreciables.
- La corriente fotogenerada es igual a la corriente de cortocircuito

$$I_{SC} = I_L \quad (10)$$

- Para cualquier condición de operación:

$$\left[ \exp\left(\frac{V+I R_S}{V_t}\right) \right] \gg 1 \quad (11)$$

A partir de estos supuestos, se puede reescribir la ecuación ( 9 ) como:

$$I = I_{SC} - I_O \exp\left[\frac{V + I R_S}{V_t}\right] \quad (12)$$

Siendo:

$$V_t = \frac{m k T_C}{e} \quad (13)$$

Haciendo  $I = 0$  en la ecuación ( 12 ) se obtiene una ecuación para la tensión de circuito abierto

$$V_{OC} = V_t \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_O}\right) \quad (14)$$

De ( 14 ), se puede deducir el valor de corriente de oscuridad ( $I_O$ )

$$I_O = I_{SC} \exp\left(\frac{-V_{OC}}{V_t}\right) \quad (15)$$

Finalmente, con la sustitución de la ecuación ( 15 ) en ( 12 ) tenemos:

$$I = I_{SC} \left\{ 1 - \exp\left[\frac{V - V_{OC} + I R_S}{V_t}\right] \right\} \quad (16)$$

La ecuación ( 16 ) a diferencia de la presentada por la ecuación ( 9 ), involucra parámetros que se pueden obtener con facilidad de la curva I-V. La aplicación de esta expresión es casi inmediata, el único punto a considerar es la necesidad de un método iterativo para resolución, esto se debe a la dependencia de ( $I$ ) en la ecuación para dar solución.

#### 2.14.1.2. APROXIMACIÓN A CURVA I-V SIN MÉTODO ITERATIVO

Como se mencionó en el apartado anterior, el uso de la ecuación ( 16 ) permite una aproximación de la curva I-V de la celda mediante la sustitución de valores, sin embargo, la necesidad de un método iterativo complica los cálculos para la obtención de valores en cualquier punto de la curva.

Para facilitar el cálculo de los valores de la curva I-V en cualquier punto J.M. Ruiz (Ruiz, 2005) presenta un procedimiento basado en los valores normalizados, teniendo entonces: resistencia en serie normalizada ( $r_s$ ) y voltaje de circuito abierto normalizado ( $v_{oc}$ ). La forma de calcular estos parámetros se muestra en las ecuaciones ( 17 ) y ( 18 ) respectivamente.

$$r_s = \frac{R_s}{\left(\frac{V_{oc}}{I_{sc}}\right)} \quad (17)$$

$$v_{oc} = \frac{V_{oc}}{V_T} \quad (18)$$

Para los cálculos se define voltaje y corriente normalizados, estos se presentan en las ecuaciones ( 19 ) y ( 20 ) respectivamente.

$$v = \frac{V}{V_{oc}} \quad (19)$$

$$i = \frac{I}{I_{SC}} \quad (20)$$

Luego, realizando cambios de variables

$$v = v' - i r_S \quad (21)$$

$$i = i' \quad (22)$$

Aplicando estos cambios en la ecuación ( 16 )

$$i' = 1 - \exp[-v_{OC}(1 - v')] - \exp [-v_{OC}(1 - r_S)] \quad (23)$$

Con estas expresiones, dando valores a  $v'$  en las ecuaciones ( 21 ), ( 22 ) y ( 23 ) se puede calcular cualquier punto de la curva I-V o incluso la curva completa.

Para poder aplicar este modelo matemático es necesario obtener parámetros de la curva I-V de forma experimental, los valores necesarios serán  $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ,  $I_M$ ,  $V_M$ ,  $FF$  y  $R_S$ . La forma de encontrar estos valores se presentó anteriormente exceptuando el cálculo de  $R_S$ , Para el cual existen dos métodos de cálculo.

El primer método permite encontrar la resistencia en serie a partir del factor de forma y está dado por la ecuación ( 24 ).

$$R_S = \left(1 - \frac{FF}{FF_0}\right) \left(\frac{V_{OC}}{I_{SC}}\right) \quad (24)$$

El segundo método está basado en el uso de los valores de corriente y voltaje máximos. Una de las ventajas principales del uso del segundo método es que los valores de potencia máxima en condiciones estándar, así como valores de cortocircuito y circuito abierto suelen venir dados por el fabricante de paneles solares y está definida por la ecuación ( 25 ).

$$R_S = \frac{\left[V_{OC} - V_M + V_T \ln \left(1 - \frac{I_M}{I_{SC}}\right)\right]}{I_M} \quad (25)$$

## **2.15. MOVILIDAD DE PORTADORES DE CARGA EN CELDAS SOLARES DE PELÍCULA DELGADA**

El estudio del presente proyecto está centrado en el análisis de celdas solares de película delgada, razón por la cual se tomará mayor importancia en el estudio de las celdas de capa amorfa basadas en silicio y las celdas solares orgánicas de película delgada basadas en polímeros semiconductores. El principal objetivo de este apartado es hablar de la movilidad de portadores de carga para estos dos tipos de celda.

La razón principal del estudio de movilidad de portadores se debe a que las movilidades bajas de electrones y huecos pueden provocar pérdidas en el rendimiento del dispositivo debido a una mayor recombinación de los portadores de carga. (Research, 2015) Por este motivo, el

conocimiento de la movilidad de portadores proporciona al investigador una idea de las limitaciones de la celda solar y es un factor crítico para determinar la eficiencia. (Shieh et al., 2010)

En el caso de las celdas inorgánicas, el estudio de movilidad de portadores permite a los investigadores el análisis del fenómeno de recombinación dentro de semiconductores, el cual está relacionado con el tiempo de vida útil de las celdas y su eficiencia. (Honsberg & Bowden, 2014)

### **2.15.1. PORTADORES DE CARGA**

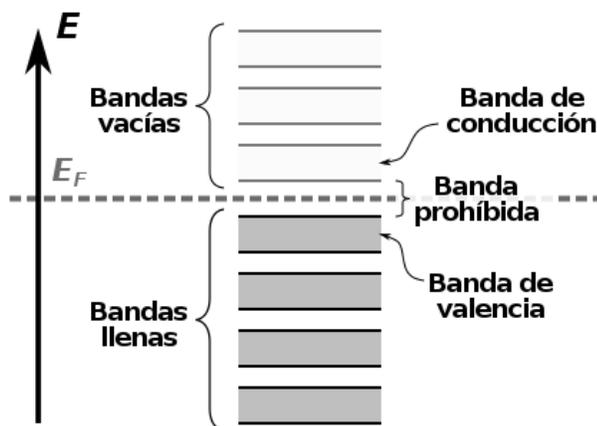
En física, se entiende como portador de carga a una partícula libre o no enlazada portadora de una carga eléctrica. Ejemplos de este tipo de carga son los electrones libres y los iones. (Academic, 2010) Cuando se trabaja con semiconductores, como es el caso de las celdas solares, los portadores de carga presentes son los electrones como portadores de carga negativos y los huecos producidos por falta de electrones son tratados como portadores de carga positivos.

Los portadores más abundantes son los llamados portadores mayoritarios. Por ejemplo: en los semiconductores tipo N son los electrones, y en el semiconductores tipo P son los huecos. Los portadores de la carga menos abundantes son los llamados portadores minoritarios.

### **2.15.2. CELDAS SOLARES DE SILICIO AMORFO.**

La tecnología en una celda solar de película delgada o amorfa, por ser de silicio, está basada en el principio de semiconductores dopados. El movimiento de portadores de carga para semiconductores a su vez, está basado en el modelo de bandas de energía. El modelo de bandas de energía se usa para describir los estados de energía de los portadores de carga en un cristal como en el silicio. (UPV, 2011) Los portadores de carga en el modelo de banda de energía son negativos (electrones) o positivos (huecos).

En este modelo, los electrones ligados en un enlace covalente se representan en una banda de energía llamada banda de valencia. Por otro lado, los electrones libres están situados en la banda de conducción. Ambas bandas están separadas por un rango de energías prohibidas, denominado banda prohibida. (B.G. Streetman, 2000) Como se muestra en la Figura 13.



**Figura 13** Estructura de Bandas en un semiconductor

*Fuente: (Honsberg, 2018)*

En estado de equilibrio, la banda de valencia de un semiconductor está completa, es decir, no tiene portadores de carga positivos, por lo tanto, no puede haber conducción porque tampoco hay electrones en la banda de conducción. Para que sea posible la conducción, es necesaria la generación de electrones en la banda de conducción y huecos en la banda de valencia. (Dimitrijevi, 2000) Para que esta condición se cumpla, un electrón de la banda de valencia debe ser capaz de cruzar a la de conducción para lo cual debe tener la energía suficiente para atravesar la banda prohibida.

Con el fin de lograr el intercambio de portadores entre bandas se introduce impurezas donadoras ya sean de tipo N o tipo P. La introducción de impurezas donadoras tipo N equivale a la presencia de un nivel energético en el interior de la banda prohibida, ubicado al fondo de la banda de

conducción. Gracias a esto los electrones situados en este nivel donador pueden saltar con mayor facilidad a la banda de conducción, suministrándole electrones sin crear huecos. Cuando se introducen impurezas de tipo P estas corresponden a impurezas aceptadoras, lo cual equivale a la presencia de un nivel energético en el interior de la banda prohibida esta vez cercano a la banda de valencia, y que contrario al caso anterior permite que se generen huecos al pasar electrones de la banda de valencia a este nivel aceptador.

### 2.15.2.1. CÁLCULO DE MOVILIDAD DE PORTADORES DE CARGA EN CELDAS SOLARES DE SILICIO AMORFO.

Se considerada a las celdas solares de película delgada basadas en silicio amorfo hidrogenado a-SI:H como dispositivos de baja movilidad de portadores de carga en comparación a celdas basadas en silicio cristalino. El valor de movilidad característico de estos dispositivos a temperatura ambiente se presenta en la siguiente tabla.

**Tabla 7**

*Valores estándar de movilidad de electrones y huecos para silicio cristalino y amorfo hidrogenado*

Material	Movilidad de Electrones	Movilidad de Huecos
Silicio Cristalino	$1400 \frac{cm^2}{V s}$	$450 \frac{cm^2}{V s}$
Silicio amorfo hidrogenado a SI:H	$1 \frac{cm^2}{V s}$	$0.003 \frac{cm^2}{V s}$

Fuente:(Hu, 2016)

Existen diversos métodos para la medición de portadores de carga tanto para semiconductores como para celdas solares. Para la medición directa en semiconductores existe la medición de “movilidad de hall”, que parte de mediciones de efecto hall. El método consiste en

aplicar campo magnético al material y mediante ecuaciones correspondientes obtener la movilidad de portadores general, es decir, la movilidad de electrones y huecos combinadas.

Cuando se presentan celdas solares, los valores de portadores de carga se pueden obtener a través de mediciones de TOF (time of Fly) el cual consiste en someter la celda solar a variaciones mediante luz láser, censar los resultados y a partir de estos calcular la movilidad general de portadores. Sin embargo, estas mediciones requieren realizar algunas modificaciones sobre la celda solar ya que no se puede realizar directamente.

Los métodos funcionan bien si se considera que se puede hacer pruebas directamente sobre el semiconductor del que se compondrá la celda solar o bien de la celda solar en sí mismo. Sin embargo, ninguno de los dos métodos puede ser aplicados directamente a paneles solares como los que se utilizará en este trabajo por lo que es necesario encontrar otra manera de calcular movilidad de portadores de carga.

E.A. Schiff en su reporte técnico (Schiff, 2008) propone un modelo para el cálculo de la densidad de potencia en celdas solares de película delgada de silicio amorfo. Este método permite un cálculo aproximado de la movilidad de huecos en función de la densidad de potencia y el voltaje de circuito abierto. La ecuación se muestra a Continuación.

$$P = \left(\frac{2}{3} V_{OC}\right)^{\frac{3}{2}} (\mu_h \epsilon (eG)^3)^{\frac{1}{4}} \quad (26)$$

Donde

$P$       Potencia

$\mu_h$      Movilidad de Huecos

$\varepsilon$	Permitividad del absorbedor
$e$	Carga Fundamental ( $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ )
$G$	Poder de la tasa de generación

De la ecuación, contamos con dos parámetros conocidos. El primero se obtiene del simulador solar y corresponde a la densidad de potencia, mientras que, el segundo se obtiene de la curva I-V del dispositivo y es el voltaje de circuito abierto  $V_{OC}$ . El parámetro de permitividad es un valor típico del a-Si:H y corresponde al valor de  $\varepsilon = 1.05 \times 10^{-10} \text{ C}^2 / \text{N m}^2$ . El valor de  $G$  se selecciona a partir de la magnitud que presenta el a-Si:H bajo radiación solar y toma un valor de  $G = 3.3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3} / \text{s}$ .

El modelo ofrece también el cálculo de la longitud de difusión ambipolar a partir del cual se puede obtener un valor aproximado de la movilidad de los electrones. La ecuación planteada se presenta a continuación:

$$L_{amb} = \sqrt{2 \left( k_B \frac{T}{e} \right) \mu_P \tau_R} \quad (27)$$

$$\tau_R = (G b_R)^{-\frac{1}{2}} \quad (28)$$

Donde:

$L_{amb}$	Longitud de difusión Ambipolar
$k_B$	Constante de Boltzmann
$T$	Temperatura
$\mu_P$	Movilidad de Electrones
$\tau_R$	Tiempo de recombinación

$b_R$  Coeficiente de recombinación entre bandas

Al igual que con el caso anterior, son muy pocos los parámetros que se pueden obtener directamente de la medición del panel solar, sin embargo, valores como el coeficiente de recombinación entre bandas del a-Si:H es conocido y tienes un valor aproximado de  $b_R = 10^{-9} cm^3/s$  y como valor de temperatura se toma el estándar. Si tomamos el valor de longitud de difusión Ambipolar del trabajo de M. Goerlitzer (Goerlitzer et al., 1996) que realiza múltiples mediciones a temperatura ambiente de celdas de a-Si:H , se obtiene todos los valores necesarios para despejar la movilidad de electrones.

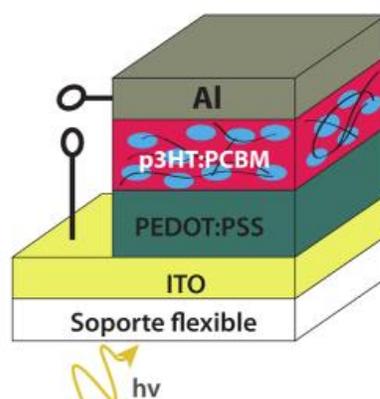
Mediante este proceso podemos obtener valores aproximados de movilidad de electrones y huecos. Es importante mencionar que este procedimiento es aplicable únicamente a celdas solares basadas en silicio amorfo hidrogenado.

### **2.15.3. CELDAS SOLARES DE POLÍMERO SEMICONDUCTOR**

Para poder hablar de este tipo de celdas, es importante primero comprender que es un polímero semiconductor. William Chamorro (Chamorro & Urregos, 2013) define un polímero semiconductor como: “ *una macromolécula que presenta unidades repetitivas denominadas monómeros que, a diferencia de los polímeros tradicionales, son altamente conjugados, presentando dentro de su estructura electrones de orbitales  $\pi$ , lo que permite tener cadenas con una alta densidad electrónica deslocalizada, dándole propiedades electrónicas únicas, comparables a los semiconductores inorgánicos.*” De forma más sencillas, podemos decir que los polímeros semiconductores se comportan de manera similar a los semiconductores dopados de silicio, razón por la cual, los métodos de análisis propuestos para celdas solares basadas en silicio son aplicables también para estos semiconductores.

Las celdas solares orgánicas más estudiadas en laboratorios son las llamadas de heterojuntura en volumen o BHJ (Bulk Heterjunction). La razón principal de centrarse en estas celdas es que son las que mayor eficiencia han logrado, alcanzando eficiencias de 8.3%. (Chamorro & Urregos, 2013) Este tipo de celdas está compuesto por una capa activa dentro de la cual tiene un aceptor y un donador de electrones. La capa activa está formada por P3HT [poly(3-hexylthiophene)] y el derivado del fullereno PCBM [Phenyl-C61-Butyric-Acid-Methyl-Ester], (Mercado Miranda, 2009) como materiales donador y aceptor de electrones respectivamente.

En la Figura 14 se observa la sección transversal de celdas tipo BHJ. En estas celdas, la luz atraviesa el sustrato transparente, y se absorbe en su mayoría por la capa activa, de esta forma, se da la generación de fotocorriente en el dispositivo. El contacto inferior es el encargado de la conducción de huecos, generalmente se usa PEDOT:PSS sobre ITO, el primero facilita el transporte de huecos desde la capa activa hasta el segundo, pues es un semiconductor inorgánico transparente que actúa como ánodo. Finalmente, una película de aluminio actúa como contacto superior.



**Figura 14** Sección transversal de una celda solar con estructura heterojuntura en el volumen.

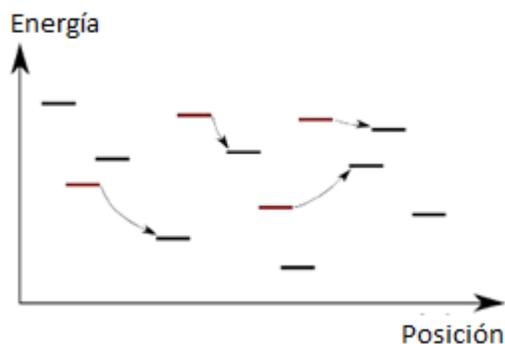
*Fuente (Chamorro, 2012)*

### **2.15.3.1. TRANSPORTE DE CARGA EN POLÍMEROS SEMICONDUCTORES**

La teoría convencional de semiconductores presenta el transporte de carga como un modelo de bandas, teniendo una banda de conducción y una banda de valencia separadas en energía. Los electrones se mueven a través del material si son excitados desde la banda de valencia hacia la banda de conducción. En los semiconductores orgánicos existen niveles de energía similares, sin embargo, debido a su constitución química ocupan otra terminología, siendo el equivalente a la banda de valencia la llamada HOMO (High Occupied Molecular Orbital) y la banda de conducción LUMO (Low Unoccupied Molecular Orbital) (Chamorro & Urregos, 2013). Para este caso, la absorción de fotones puede excitar electrones de la región HOMO a LUMO.

Por su estructura química, los semiconductores orgánicos poseen cargas deslocalizadas en segmentos conjugado (Tessler, 2009). Una manera más intuitiva de entender esto es considerar el transporte de carga para estos materiales como saltos localizados entre sitios, como se muestra en la Figura 15. Donde los portadores de carga ocupan sitios que se distribuyen de acuerdo a energía y posición. Por lo tanto, el movimiento de cargas se produce por la transición de un sitio a otro de los portadores.

Es importante mencionar también que los defectos del material pueden producir estados energéticos entre las dos bandas denominados “trampas”. Cuando un portador cae en una trampa se entiende que este ha caído fuera de la banda de conducción y por consiguiente es incapaz de continuar con el transporte. Con el paso del tiempo, las fluctuaciones térmicas que ocurren dentro del material aportaran la energía necesaria para que el portador sea liberado de vuelta a la banda de conducción.



**Figura 15** Modelo de transporte de carga basado en saltos de posición

*Fuente (Bronson, 2014)*

La efectividad del transporte de carga está definida por el parámetro conocido como movilidad de portadores de carga, el cual representa una constante de proporcionalidad entre la velocidad de arrastre y el campo eléctrico. Para la electrónica se prefiere movilidades altas, debido a que un mayor rendimiento de la celda es el resultado de movilidad de portadores más rápidos. (Bronson, 2014). Movilidades típicas para celdas solares orgánicas se encuentran entre  $10^{-5}$  a  $10^{-3} \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  (Baumann, 2012).

## **2.16. MEDICIÓN DE MOVILIDAD DE PORTADORES DE CARGA EN CELDAS ORGÁNICAS. MÉTODO CELIV (CHARGE EXTRACTION BY LINEARLY INCREASING VOLTAGE)**

La caracterización de movilidad de portadores de carga en semiconductores orgánicos es un tema complejo debido a parámetros como morfología de las películas, concentración de portadores o la geometría de los dispositivos, sin embargo, a lo largo de los años se han venido desarrollando varias técnicas que permiten medición de movilidad de portadores (Hertel & Bäessler, 2008).

CELIV es un método para la medición de movilidad de portadores de carga dentro de dispositivos de investigación usado para pruebas, así como para desarrollo de materiales. Una gran parte de la comprensión de mecanismos de recombinación y transporte de carga en las células solares orgánicas se basa en CELIV, el cual fue propuesto por Juska (Juška et al., 2000). CELIV surgió como una alternativa a la medición de tiempo de vuelo (ToF), método altamente usado y bien establecido, usado para la medición de movilidad de portadores en dispositivos con mayor movilidad de portadores de carga que la presentada por polímeros semiconductores.

En sus estudios, Juska presento ecuaciones para el cálculo de movilidad de portadores de carga dependiendo de ciertos factores. Los factores de los que depende la ecuación son la conductividad y el tipo de generación de foto portadores. La ecuación ( 29 ) presenta el método general para el cálculo de movilidad de portadores de carga.

$$\mu = K \frac{d^2}{A t_{max}^2 \left( 1 + 0.36 \frac{\Delta j}{j(0)} \right)} \quad (29)$$

Siendo

K        Constante de generación de fotoportadores

A        Rampa en función de una tensión triangular

*d*        Espesor de la celda solar

*t<sub>max</sub>*    Corriente máxima en el estado transitorio

$\frac{\Delta j}{j(0)}$     Relación de corriente debido a la carga siendo extraída del semiconductor dividido

para la corriente generada por la capacidad geométrica del dispositivo.

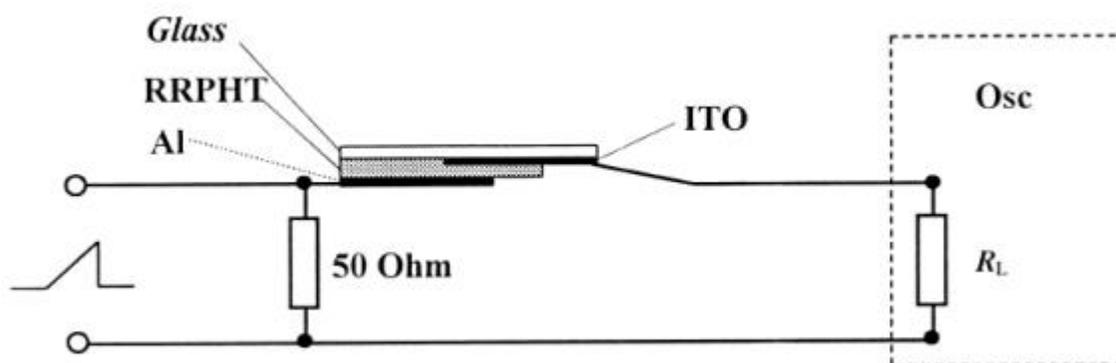
En función de la conductividad se presentan correcciones a la ecuación ( 29 ), las cuales se muestran a continuación. El valor de la contante K está definido por la generación de fotoportadores siendo  $K = 2/3$  para generación de volumen de fotoportadores y  $K = 2$  para generación de superficie de foto portadores.

$$\mu = K \frac{d^2}{A t_{max}^2} \quad \Delta j \ll j(0) \quad \text{Baja Conductividad}$$

$$\mu = K \frac{d^2}{A t_{max}^2 \left( 1 + 0.36 \frac{\Delta j}{j(0)} \right)} \quad \Delta j \approx j(0) \quad \text{Equilibrio}$$

$$\mu = \frac{d^2 j(0)}{A t_{max}^2 \Delta j} \quad \Delta j \gg j(0) \quad \text{Alta Conductividad}$$

El circuito para la medición de movilidad de portadores de carga se presenta en la Figura 16. En este se puede observar que el circuito es bastante simple en su composición, es necesario únicamente un generador de señal triangular y un osciloscopio para la adquisición de datos.



**Figura 16** Circuito esquemático para experimento CELIV

Fuente: (Berguer, 2009)

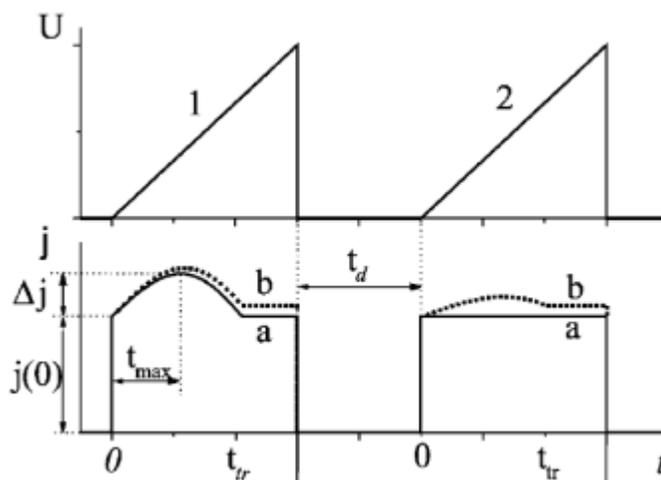
Las características para el generador se detallan en la Tabla 8. En el caso del osciloscopio la única característica relevante es el poder censar en un rango de 50 – 100KHz o 10-20 uS. (Berger, 2009)

**Tabla 8**

*Características del generador de onda triangular*

	Mínimo	Máximo
<b>Voltaje</b>	-1V	-8V
<b>Frecuencia</b>	50KHz	100KHz

El resultado esperado al ingresar la señal triangular se presenta en la Figura 17. En la señal de salida es necesario encontrar los valores de  $j(0)$ ,  $\Delta j$  y  $t_{max}$  para poder obtener el valor de movilidad de portadores de carga.



**Figura 17** Señal de Salida del experimento CELIV

Fuente: (Berger, 2009)

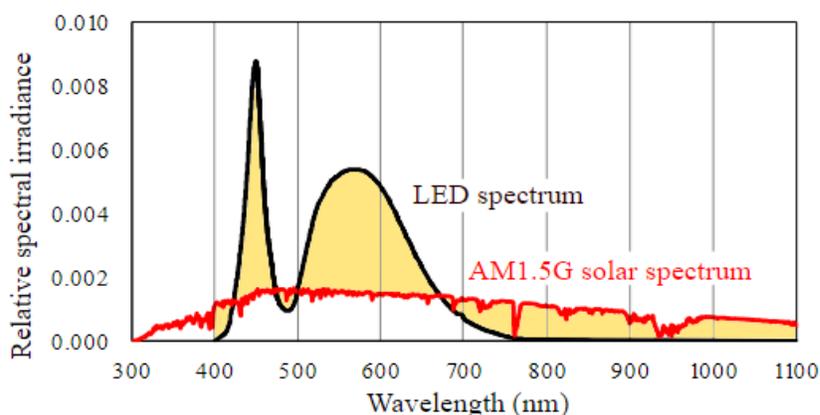
## CAPÍTULO III

### DESARROLLO

#### 3.1. DISEÑO DEL SIMULADOR SOLAR

La obtención de la curva características I-V de una celda solar dentro de un laboratorio se obtiene a partir de un simulador solar. Las consideraciones para el simulador solar en este proyecto están basadas en el trabajo de Daveshed (DAVESHED, 2017), en el cual se presentan los requisitos necesarios para utilizar una luminaria Led como simulador solar.

Lo primero punto a tomar en cuenta es que el espectro lumínico que presenta el reflector Led es diferente al presentado por el espectro solar AM1.5G, como se muestra en la Figura 18. Se puede observar a simple vista que existe una amplia variación en el espectro. La Tabla 9 muestra el factor de desajuste espectral entre el espectro solar y una luminaria Led genérica. El principal inconveniente se da en los puntos donde la referencia del Led toma valores de 0.0% ya que la radiación solar si obtiene valores en estos rangos.



**Figura 18** Espectro de una luminaria Led y Espectro solar de AM1.5G

*Fuente: (Daveshed, 2017)*

Este problema se va a presentar siempre que usemos un reflector Led como simulador solar. Existen maneras de corregir la diferencia tan grande de espectro como es por ejemplo utilizar Lámparas de Xenón.

**Tabla 9**

*Factor de desajuste espectral entre el espectro solar y luminaria Led*

Intervalo de longitud de onda $\mu m$	Porcentaje de irradiancia total	
	Solas (AM1.5G)	LED
0.4 a 0.5	18.4%	27.2%
0.5 a 0.6	19.9%	46.0%
0.6 a 0.7	18.4%	24.7%
0.7 a 0.8	14.9%	2.1%
0.8 a 0.9	12.5%	0.0%
0.9 a 1.1	15.9%	0.0%

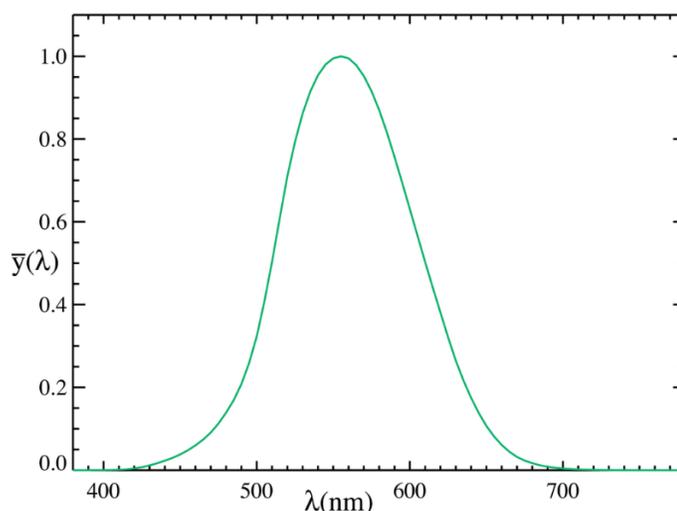
Una de las principales ventajas de utilizar una fuente Led como simulador solar es la eliminación del disipador de calor en la celda solar. Esto se debe a que, a diferencia de una lámpara de Xenón, un reflector Led se puede encender para realizar mediciones y apagarla inmediatamente después de terminar las mediciones evitando el incremento de temperatura en la celda.

Con el reflector Led como fuente de simulación solar, es momento de calcular la potencia de salida. Es necesario saber cuánta luz entregará el Led a la celda solar. En otras palabras, se necesita encontrar la irradiancia total en la superficie frontal de la celda solar. Lo que se busca es lograr un valor de potencia lo más cercano posible a  $1 \text{ kW}/m^2$ .

Partimos del valor nominal en lúmenes del reflector, el cual podemos encontrar en su hoja de características y es un valor de  $2700 \text{ lm}$  en condiciones de operación nominal. La salida de luz

en lúmenes nos indica qué tan brillante es el Led para nuestros ojos, pero no nos permite conocer cuánta potencia hay en realidad.

Lo que se requiere es convertir los lúmenes que tenemos como dato a valores de lúmenes por vatio. Para encontrar este valor es necesario conocer el color de la luz, por ejemplo: Los ojos humanos son sensibles a la luz verde, esta presenta la mayor cantidad de  $lm/W$ , un total de 683  $lm/W$  a 555 nanómetros de longitud de onda. (Dailuxled, 2017) La eficacia luminosa de la luz visible se puede observar en la siguiente figura.



**Figura 19** Eficacia luminosa luz visible

Fuente: (Comparalux, 2015)

Para facilitar el proceso de encontrar la irradiancia, Daveshed (DAVESHED, 2017) procede a realizar la siguiente suposición. Suponiendo que el espectro del Led se aproxima a un cuerpo negro truncado en la región visible, entonces, la eficacia luminosa de la radiación será de 350  $lm/W$ . A partir de esto, sabemos que la potencia de salida radiante total del Led será:

$$\frac{2700lm}{350 \frac{lm}{W}} = 7.71W$$

La potencia radiante total es útil, sin embargo, es necesario conocer la intensidad o la cantidad de vatios emitidos en un área determinada. Una forma práctica de proceder es asumir que la emisión de luz sigue la ley de coseno de Lambert (Daveshed, 2017). Las fuentes lambertianas tienen la característica de emitir el mismo brillo no importa el ángulo en que se mire, incluso si su emisión no es uniforme. (Gómez González, 2006). Con esto, la intensidad máxima emitida hacia el frente del simulador será:

$$\frac{7.71W}{\pi} = 2.45 \frac{W}{sr}$$

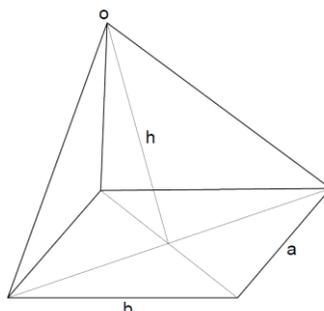
Siendo:

$sr$  estereorradián (una unidad de ángulo en el espacio 3D)

Finalmente, para obtener la potencia en la superficie frontal de la celda solar, es necesario saber cuántos estereorradianes cubre y multiplicarlos. El proceso consiste en aplicar la fórmula de ángulo sólido, para esto primero encontramos el circunradio para un rectángulo, que vendría a ser el rectángulo formado por la celda solar y esta dado por la ecuación ( 30 )

$$r = \frac{1}{2} \sqrt{b^2 + a^2} \quad (30)$$

Luego, Aplicando la fórmula de ángulo sólido para de una pirámide n-gonal derecha, donde la base de la pirámide es un polígono regular de  $n$  lados de circunradius  $r$ , con una altura de pirámide  $h$ , como se muestra en la Figura 20, está dada por la ecuación ( 31 )



**Figura 20** Pirámide n-gonal derecha

$$\Omega = 2\pi - 2n \arctan \left( \frac{\tan \left( \frac{\pi}{n} \right)}{\sqrt{1 + \frac{r^2}{h^2}}} \right) \quad (31)$$

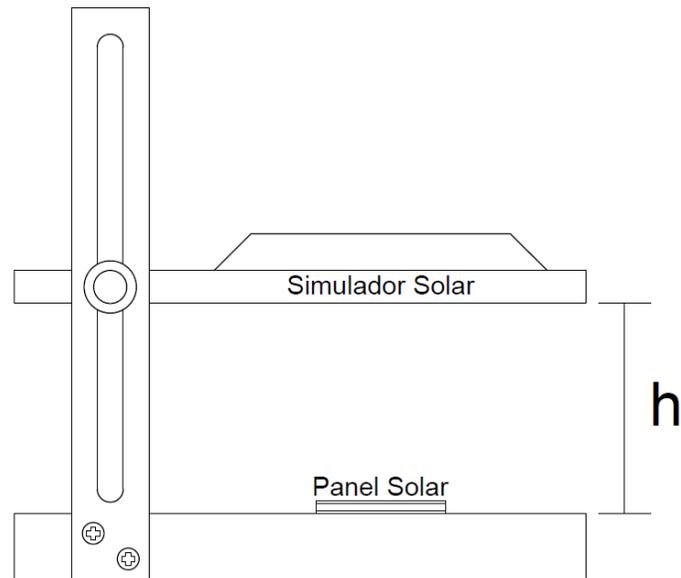
Una vez definidas las ecuaciones necesarias para encontrar la potencia en la superficie frontal nos queda definir las dimensiones de los paneles solares que se utilizarán para el proyecto, que se reemplazarán en la ecuación ( 30 ), además, es importante mencionar que el valor de h en la ecuación ( 31 ) representa la altura a la que el reflector Led estará ubicado respecto al panel solar de forma perpendicular. Las medidas de los paneles solares se presentan en la Tabla 10.

**Tabla 10**

*Medidas de los paneles solares a usar en el proyecto*

	<b>Panel 1</b>	<b>Panel 2</b>
<b>Base</b>	6 cm	10.5 cm
<b>Altura</b>	3.5 cm	7.5 cm

Como se observa en la Figura 21 es necesario colocar el panel solar de forma perpendicular a la fuente de radiación. Ahora procedemos a realizar los cálculos para ambos paneles.



**Figura 21** Diagrama de simulador solar como debe ser colocado para el uso de ecuaciones basadas en ángulo sólido.

### 3.1.1. CÁLCULOS PARA PANEL 1

Aplicando la ecuación ( 30 )

$$r = \frac{1}{2} \sqrt{3.5^2 + 6^2}$$

$$r = 3.47$$

Con este valor procedemos a calcular el Ángulo solido aplicando la ecuación ( 31 ). Para este caso utilizaremos una distancia de 5 *cm* entre la fuente de luz y el panel solar

$$\Omega = 2\pi - 2 \times 4 \times \arctan \left( \frac{\tan \left( \frac{\pi}{4} \right)}{\sqrt{1 + \frac{3.47^2}{5^2}}} \right)$$

$$\Omega = 0.78 \text{ sr}$$

Con el valor del ángulo sólido y el valor de intensidad máxima encontramos la potencia incidente

$$fi = 2.45 \frac{W}{sr} \times 0.78sr$$

$$fi = 1.91 W$$

Y una vez tenemos la potencia incidente podemos encontrar irradiancia que no es más que la potencia incidente por unidad de superficie

$$IT = \frac{1.91W}{6cm * 3.5cm}$$

$$IT = \frac{4.018W}{21cm^2}$$

$$IT = 0.091 \frac{W}{cm^2} * 100^2 \frac{cm^2}{m^2}$$

$$IT = 910 \frac{W}{m^2}$$

Tomando cuenta que las condiciones estándar para medición nos piden un valor de irradiancia de  $1000 W/m^2$ , y que al utilizar el reflector Led a una distancia de  $5 cm$  logramos un total de  $910 W/m^2$ . Es necesario ajustar la distancia del simulador solar con el fin de acercarse de mejor manera al valor requerido.

Tras realizar una nueva medición, con una distancia de  $4.7 cm$  logramos obtener una irradiancia de  $1003.33 W/m^2$ . Este valor se ajusta de mejor manera al estándar y por tanto  $4.7 cm$  es la altura a la que se colocara el reflector Led del panel solar para realizar las mediciones de la curva I-V.

Ahora se procede a realizar los mismos cálculos para el Panel 2 con el mismo objetivo, conocer la altura del reflector con respecto a este panel.

### 3.1.2. CÁLCULOS PARA PANEL 2

Aplicando la ecuación ( 30 )

$$r = \frac{1}{2} \sqrt{10.5^2 + 7.5^2}$$

$$r = 6.45$$

Con este valor procedemos a calcular el Ángulo solido aplicando la ecuación ( 31 ). Para este caso utilizaremos una distancia de 2.8 cm entre la fuente de luz y la celda solar

$$\Omega = 2\pi - 2x4x \arctan \left( \frac{\tan \left( \frac{\pi}{4} \right)}{\sqrt{1 + \frac{6.45^2}{2.8^2}}} \right)$$

$$\Omega = 3.25 \text{ sr}$$

Con el valor del ángulo sólido y el valor de intensidad máxima encontramos la potencia incidente

$$fi = 2.45 \frac{W}{sr} \times 3.25 sr$$

$$fi = 7.96 W$$

Y una vez tenemos la potencia incidente podemos encontrar irradiancia

$$IT = \frac{7.96 W}{7.5 cm * 10.5 cm}$$

$$IT = \frac{7.96 W}{78.75 cm^2}$$

$$IT = 0.091 \frac{W}{cm^2} * 100^2 \frac{cm^2}{m^2}$$

$$IT = 1011.11 \frac{W}{m^2}$$

Para este caso ya se consideró una altura más acorde al área del panel con el objetivo de lograr la irradiancia de referencia directamente. Es importante notar que, al aumentar el área del panel solar, será necesario disminuir la distancia entre el reflector y el panel solar.

### **3.2. INSTRUMENTACIÓN PARA LA TOMA DE DATOS CURVA I-V**

Para la toma de datos de la curva I-V es necesario la medición de corriente y voltaje en el panel mientras se realizan incrementos de carga. El presente proyecto realiza las mediciones en base a un Arduino Mega, por lo que es importante comentar algunas limitaciones y consideraciones a tener en cuenta. En primer lugar, la tarjeta Arduino es incapaz de medir corriente directamente por lo que es necesario buscar un método alternativo para realizar la medición. El segundo punto a tomar en consideración es que las entradas analógicas están limitadas de 0-5V y los paneles suelen estar en valores de 0-10V por lo que es necesario acoplar la entrada para aceptar estos valores. El último punto a tener en cuenta es la resolución de 10 bits para entradas analógicas (0-1023).

#### **3.2.1. ACOPLAMIENTO DE VOLTAJE**

El acoplar el rango de medición de voltaje de 0-10V a 0-5V se puede realizar a través de una linealización de valores mediante de amplificadores operacionales. En la

Tabla 11 se definen los valores necesarios para realizar la linealización. Para el cálculo se tomará como valor máximo **10.5V** a **5V** este aumento de valor se hace por seguridad, debido a un posible aumento en la tensión causado por una mala selección de la altura del simulador solar, con el fin de evitar daños en las entradas analógicas del Arduino. Teniendo los valores especificados en las entradas del Arduino se realizará transformaciones por software en LabVIEW para obtener los valores reales de entrada.

**Tabla 11**

*Valores de Entrada y Salida del amplificador inversor para acoplamiento de voltaje al Arduino*

	X	Y
<b>Mínimo</b>	0V	0V
<b>Máximo</b>	10.5V	5V

Para la linealización se emplea la ecuación de la recta presentada en la ecuación ( 32 )

$$\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} (X - X_1) = Y - Y_1 \quad ( 32 )$$

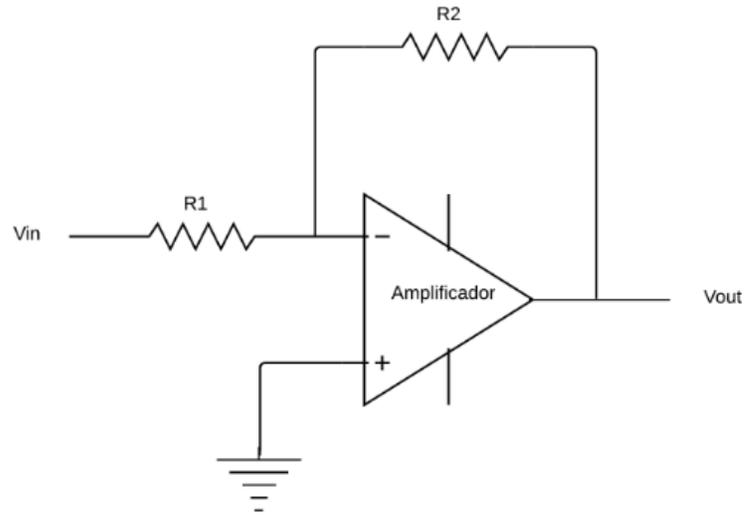
Reemplazando valores tenemos:

$$\frac{5 - 0}{10.5 - 0} (X - 0) = Y - 0$$

$$Y = 0.47X$$

El resultado de esta ecuación indica que para acoplar las salidas es necesario multiplicar el valor de entrada por una constante de 0.47.

Para realizar la multiplicación por una constante se utilizará un amplificador inversor, el cual está dado por la ecuación ( 33 ) y corresponde al circuito presentado en la Figura 22. La razón de usar amplificador inversor y no uno no inversor directamente es la facilidad de selección de valores de ganancia en el amplificador inversor y que esta no depende de resistencias en paralelo. Luego, aumentando otra etapa de amplificador inversor de ganancia uno se obtendrá el valor deseado.



**Figura 22** Amplificador Inversor

$$V_{out} = -V_{in} \frac{R_2}{R_1} \quad (33)$$

Aplicando la ecuación ( 33 ) con un valor de resistencia de  $R_2 = 10K\Omega$  tenemos:

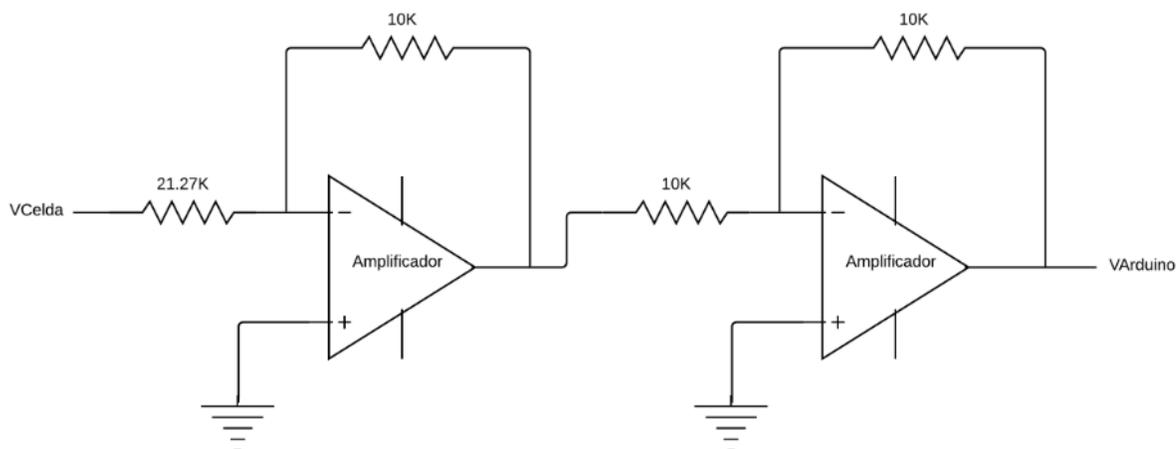
$$\frac{R_2}{R_1} = 0.47$$

$$R_1 = \frac{0.47}{10K\Omega}$$

$$R_1 = \frac{10K\Omega}{0.47}$$

$$R_1 = 21.27K\Omega$$

Obteniendo un valor de  $R_1 = 21.27K\Omega$ . Para la segunda etapa, la etapa de ganancia 1, se usará dos resistencias del mismo valor, en este caso,  $R_1 = R_2 = 10K$ . La Figura 23 muestra el circuito resultante con los valores de resistencia propuesto.

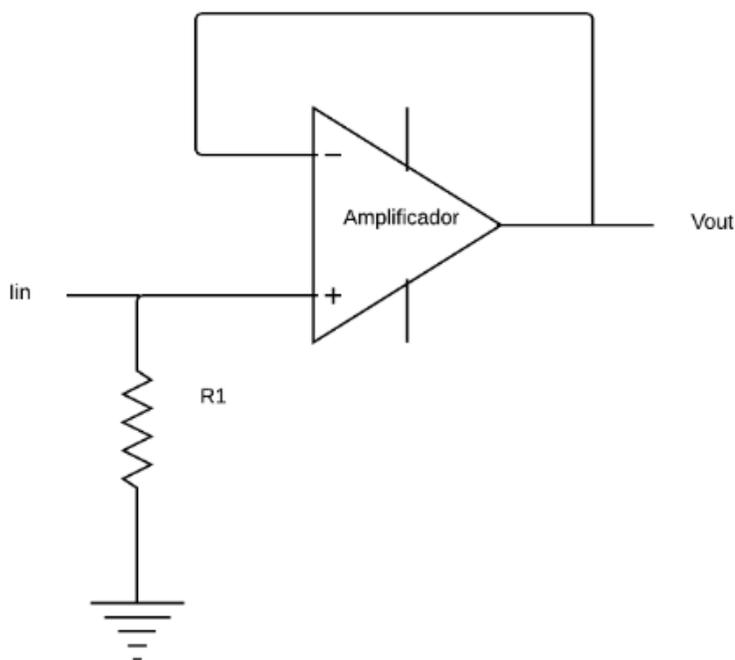


**Figura 23** Circuito propuesto para la linealización del voltaje de la celda y acoplamiento con la tarjeta Arduino

### 3.2.2. ACOPLAMIENTO DE LA CORRIENTE

Existen distintos dispositivos comerciales que nos permiten transformar corriente en voltaje directamente, sin embargo, de las mediciones realizadas bajo luz solar directa sabemos que la corriente a medir esta entre  $0 - 20\text{mA}$ . Módulos como el sensor de corriente ACS712-05A permite medir corrientes de  $-5$  a  $5$  A y son económicos, sin embargo, por la sensibilidad de este dispositivo de  $185\text{ mV/A}$  no se puede usar directamente.

Luego de varios análisis, la solución encontrada para la medición de corriente se realizó a partir de un convertidor de corriente a voltaje (conversor I-V) a partir de amplificadores operacionales. Un amplificador de transresistencia o conversor I-V es un circuito que entrega una tensión de salida proporcional a la corriente de entrada (Tacca, 2006). El circuito para un conversor I-V de salida no invertida se muestra en la Figura 24. Y las ecuaciones para encontrar valores de resistencias se presenta en ( 34 ).



**Figura 24** Circuito de conversor I-V

$$I_{in} = \frac{V_{out}}{R_1} \quad (34)$$

De la ecuación ( 34 ) podemos notar que se trata de una aplicación de la Ley de Ohm. Tras varios ensayos de prueba y error se tomó la decisión de utilizar una resistencia de  $50\Omega$ . Debido a que con valores de resistencia menores el circuito se comportaba de forma inestable. Otro punto importante a mencionar es el uso de un amplificador operacional para instrumentación Ad620, esto, debido a la necesidad de un equipo de medición de corriente de alta impedancia lo cual es una sugerencia común para la medición de corriente en paneles solares.

Con el valor de conversión de  $50\Omega$  podemos obtener una nueva tabla con valores para linealización. La razón de linealizar en este caso es ocupar todo el canal de entrada de voltaje 0 –

5V, sin embargo, se utilizará un rango de 0.5 – 4.5V para evitar errores o daños en la tarjeta. Al igual que en el caso anterior, después se realizará la conversión por software para obtener el valor real de corriente. La Tabla 12 muestra los valores para la linealización.

**Tabla 12**

*Valores de Entrada y Salida del amplificador inversor para acoplamiento de corriente al Arduino*

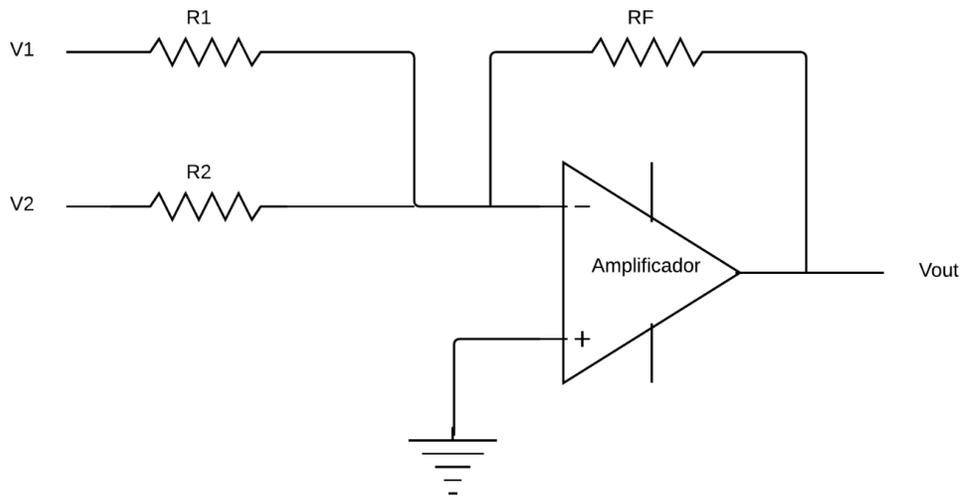
	X	Y
Mínimo	0.05V	0V
Máximo	1.5V	5V

Empleado una vez más la ecuación ( 32 ) tenemos:

$$\frac{5 - 0}{1.5 - 0.05}(X - 0.05) = Y - 0$$

$$Y = 3.44X - 0.1724$$

Los valores encontrados nos indican que además de una salida multiplicada por una constante es necesario realizar una resta constante al valor. Para esto podemos utilizar al igual que el caso anterior un amplificador inversor para la multiplicación constante y un amplificador sumador para la resta constante. El circuito de un amplificador sumador se presenta en la Figura 25 y el método para el cálculo de las resistencias en la ecuación ( 33 ). Es importante mencionar que las configuraciones con sumadores requieren del uso de una fuente adicional para realizar la suma de señales.



**Figura 25** Circuito sumador Inversor

$$V_{out} = -R_f \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \right) \quad (35)$$

Con la ecuación ( 35 ) procedemos a calcular la resistencia  $R_1$  del amplificador inversor, tomaremos como valor de  $R_2 = 10K\Omega$ .

$$\frac{R_2}{R_1} = 3.44$$

$$R_1 = \frac{3.44}{10K\Omega}$$

$$R_1 = \frac{10K\Omega}{3.44}$$

$$R_1 = 2.9K\Omega$$

Con la etapa de amplificación lista, se procede al cálculo de las resistencias  $R_1$  y  $R_2$  de la ecuación ( 35 ). Por motivos prácticos, podemos decir que el valor de  $R_f = R_1$ , esto con el fin de

no amplificar más el valor de voltaje que viene del panel solar. Tomando  $R_f = 1K\Omega$  y la fuente adicional con un valor de 5V tenemos:

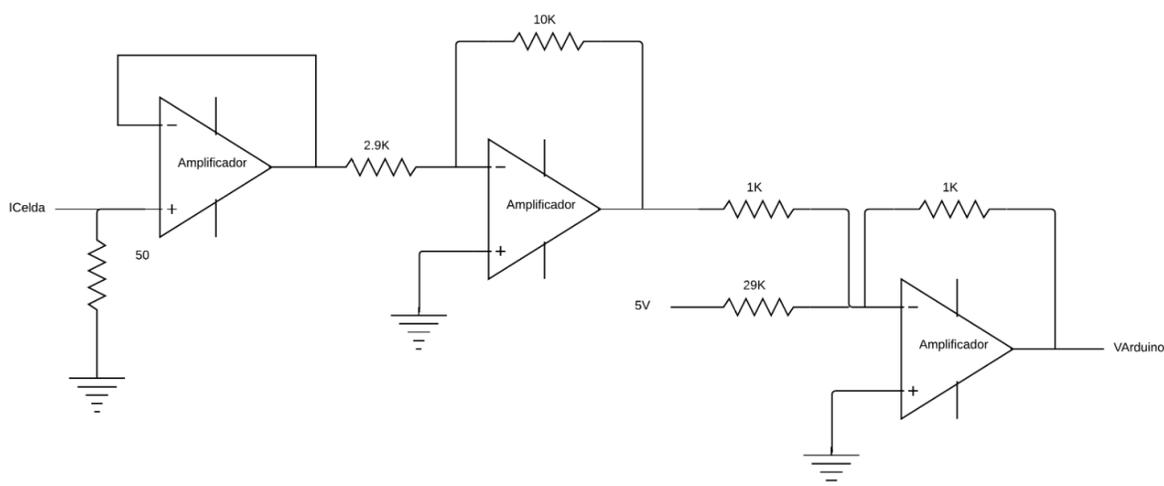
$$0.1724 = 5 * \frac{R_f}{R_2}$$

$$0.1724 = 5 * \frac{1K}{R_2}$$

$$R_2 = \frac{5 * 1K}{0.1724}$$

$$R_2 = 29K$$

El circuito propuesto para la medición de corriente a través de la tarjeta Arduino se presenta en la siguiente figura.



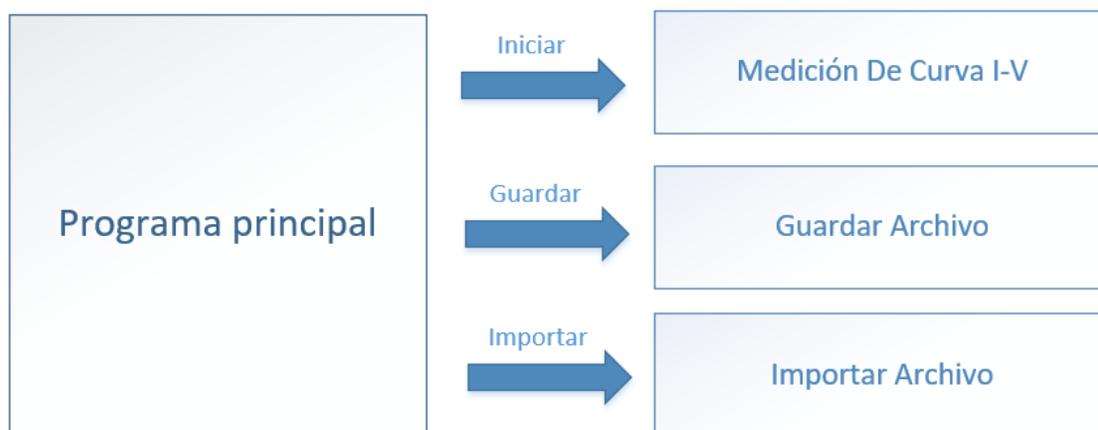
**Figura 26** Circuito propuesto para la linealización de la corriente de la celda y acoplamiento con la tarjeta Arduino

### 3.3. INTERFAZ EN LABVIEW PARA OBTENCIÓN DE CURVA I-V

El desarrollo de la interfaz en LabVIEW está dividido en dos partes. En primer lugar, está el desarrollo de la programación por bloques en el entorno “Block Diagram” en el cual se realiza toda la programación y la segunda parte es el “Front Panel” para el diseño de la interfaz de usuario.

#### 3.3.1. PROGRAMACIÓN

El diagrama de bloques presentado en la Figura 27 representa la programación realizada para la adquisición de datos de la curva I-V. A continuación, se procede a detallar lo realizado en cada uno de los bloques.



*Figura 27* Diagrama de bloques Programa para medición de Curva I-V

##### 3.3.1.1. PROGRAMA PRINCIPAL

El programa principal está compuesto por un conjunto de rutinas necesarias tanto para el inicio de la comunicación con el Arduino como para la presentación de gráficas. La programación

principal está compuesta por un ciclo while. El ciclo while permite al programa correr de forma continua hasta que se dé una instrucción de salida o finalización.

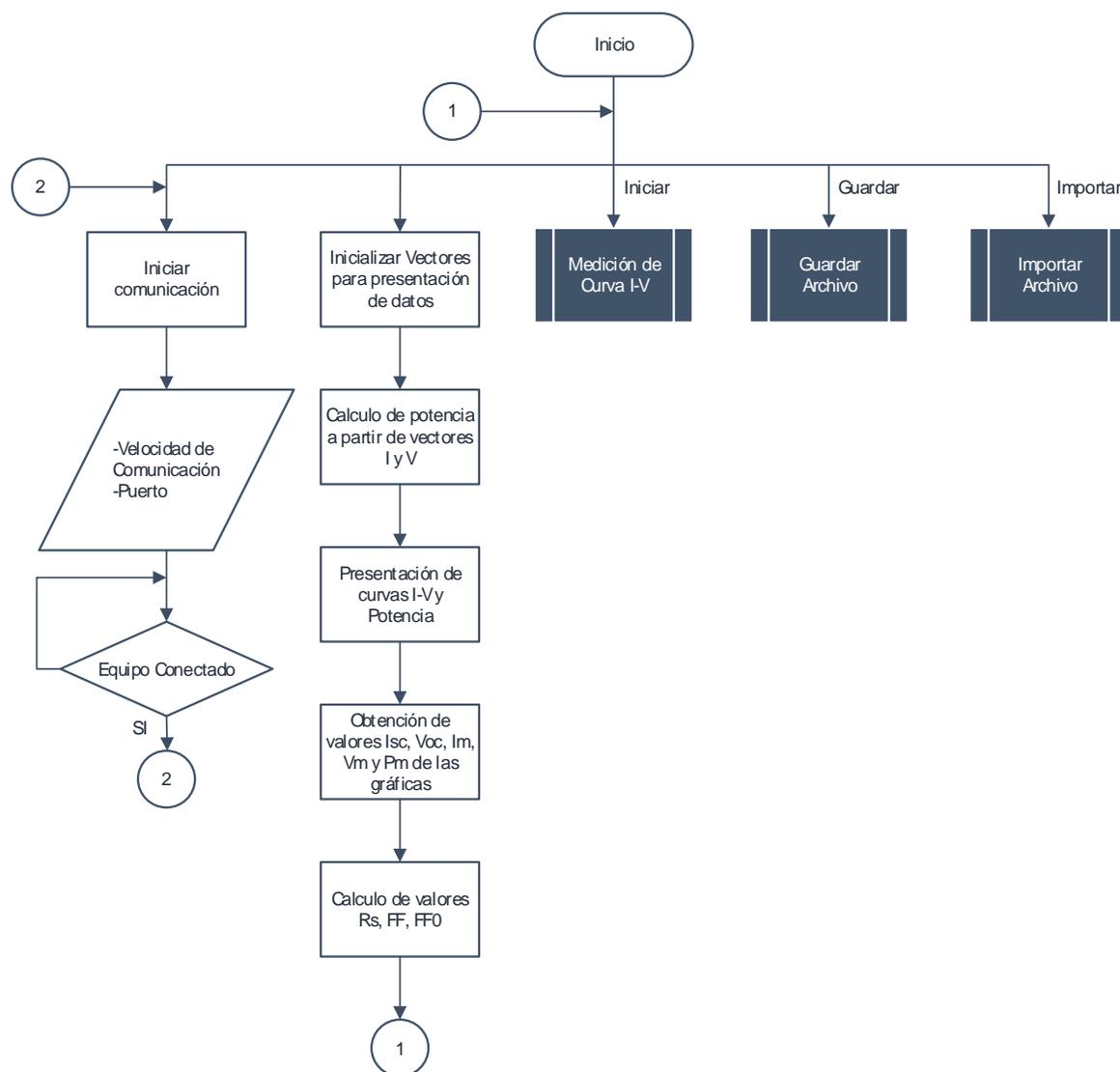
La primera rutina corresponde al establecimiento de la comunicación entre LabVIEW y Arduino. Para esta se definen bloques específicos de LINX los cuales configuran el puerto y velocidad de transmisión.

La segunda rutina está diseñada para procesar datos, crear la gráfica I-V y de potencia y realizar los cálculos de los valores característicos de la celda. La razón de diseñar una rutina para presentación de datos que se ejecuta continuamente es que tanto la rutina “Medición de Curva I-V” e “Importar Datos” utilizan la presentación de datos. Mientras no se llame a las rutinas mencionadas previamente la presentación de datos se mantiene en cero y las gráficas en blanco, una vez se carguen datos estos se presentan de forma automática en los campos creados para este propósito. Las gráficas se presentan a partir de los valores medidos, siendo la gráfica I-V la representación de la corriente en función del voltaje y la gráfica de potencia, potencia en función del voltaje.

Una parte importante del programa es la espera de los botones Iniciar, Guardar e Importar. Los cuales dan paso a subrutinas específicas las cuales se detallará con sus correspondientes diagramas de flujo más adelante. Por ahora, en la Figura 28 se presenta el diagrama de flujo correspondiente a al programa principal. Una vez concluida la subrutina seleccionada el programa vuelve de forma automática a la rutina principal presentado los datos obtenidos de ser el caso o a la espera de una nueva instrucción.

Los valores característicos  $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ,  $P_m$ ,  $I_m$  y  $V_m$  se obtiene tomando datos directamente de los vectores V e I que se generan a partir de las subrutinas medición de datos o importar datos. Para la obtención de valores característicos del panel solar se plantea el uso de un MathScript basado en

el modelo de un diodo presentado anteriormente, el cual, presentan una facilidad para realizar cálculos y permite obtener los valores de  $FF$ ,  $FF_0$  y  $R_S$ .



**Figura 28** Diagrama de flujo programa principal dividido por subrutinas en función de los botones Iniciar, Guardar e Importar.

La rutina para establecer la conexión con el Arduino se ejecuta una única vez iniciado el programa y se vuelve a ejecutar únicamente en caso de desconexión del dispositivo. La rutina para presentación de datos se encuentra en constante ejecución a la espera de datos, la razón para realizar una inicialización constante de vectores es para ajustar la cantidad de datos que serán medidos a los

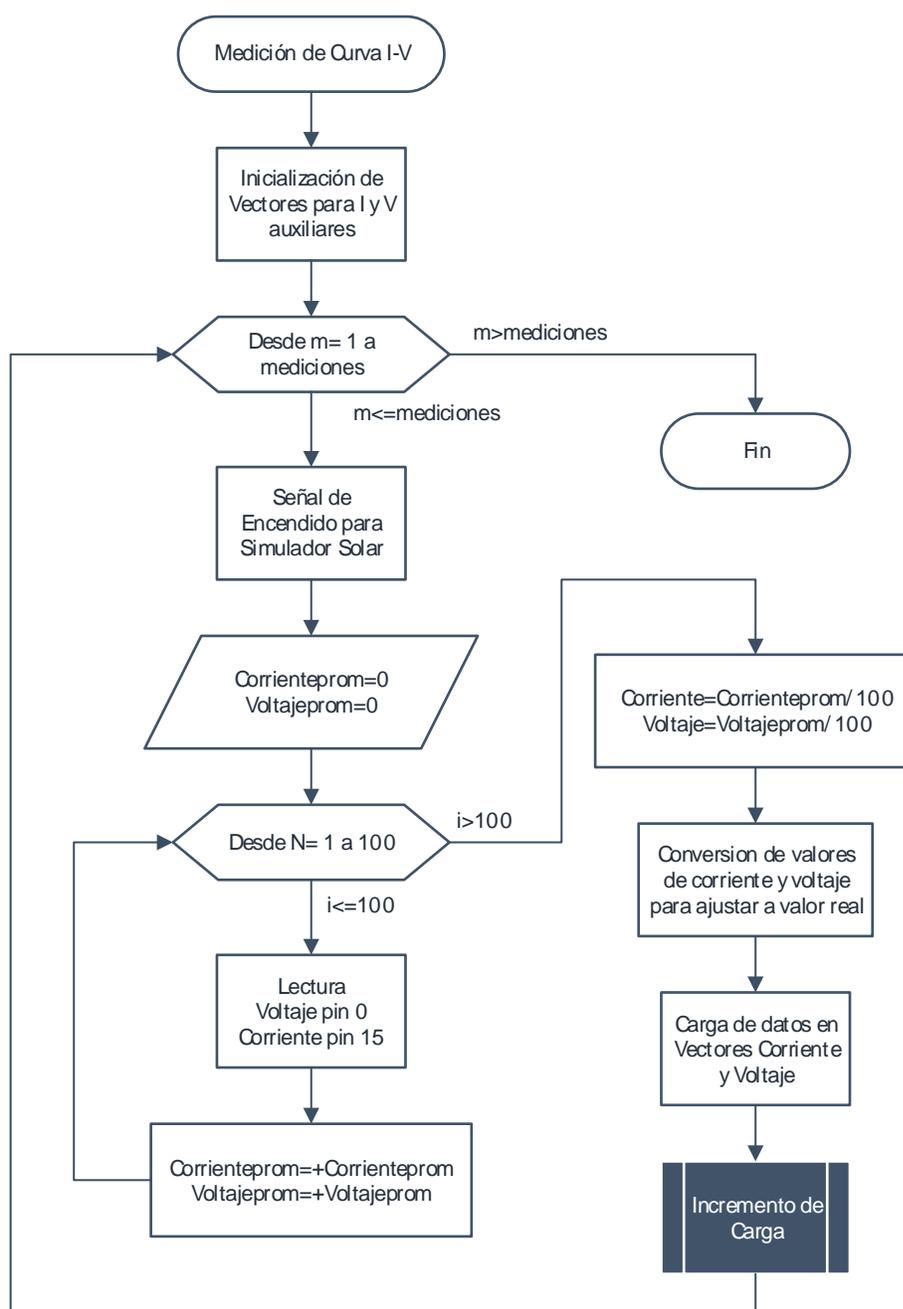
vectores autogenerados a partir del número de mediciones. Esto con el objetivo de evitar que el vector autogenerado sea de mayor tamaño que el número de datos medidos y se presenten valores de cero en los espacios vacíos o para evitar que el vector autogenerado sea de un tamaño inferior y se pierdan datos.

### **3.3.1.2. MEDICIÓN DE CURVA I-V**

El proceso para la toma de datos de la curva I-V se realiza a través de mediciones sucesivas de valores de corriente y voltaje tras un aumento de carga. Para la programación es necesario primero definir el número de mediciones que se va a realizar. Por defecto se establece un valor de 30 mediciones seleccionadas en función al banco de resistencias variable que se propone en este proyecto que permite hasta 30 incrementos.

La medición de la Curva I-V se realiza a través de la tarjeta Arduino utilizando los pines 0 para voltaje y 15 para corriente. Es importante mencionar que las mediciones en el Arduino suelen ser imprecisas. Para dar solución a este problema, se toman 100 muestras del mismo parámetro, se realizan sumas sucesivas de los valores y se promedian. Los valores obtenidos se van acomodando en los vectores V e I, voltaje y corriente respectivamente, que una vez termine este subproceso y regrese el programa principal procederán a graficarse y calcular valores característicos del panel solar.

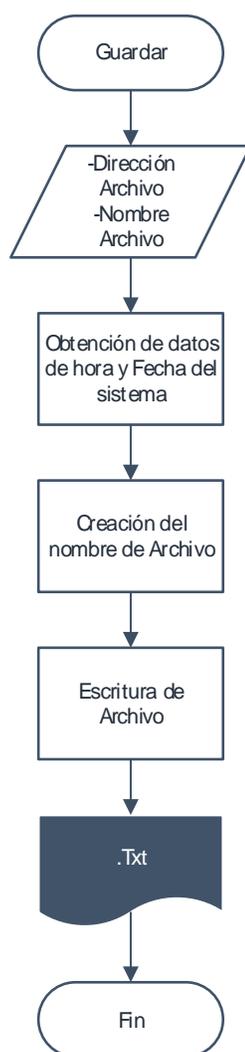
El tiempo de espera que se da para el incremento de carga se aproximó a un valor de dos segundos. De estos dos segundos durante 0.1 segundos se emite un sonido para facilitar que el usuario sepa que debe incrementar la carga y de forma adicional se presenta un mensaje en pantalla con una duración igual a todo el intervalo de espera. En la figura siguiente se muestra el diagrama de flujo bajo el cual se diseñó esta subrutina.



**Figura 29** Diagrama de flujo medición de curva I-V

### 3.3.1.3. GUARDAR

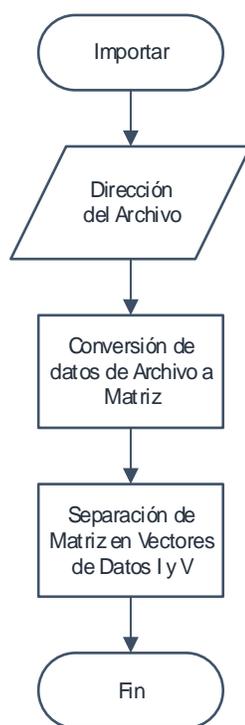
La subrutina guardar se encarga de exportar a un documento de texto plano (.txt) los valores de los vectores V e I. El nombre del archivo puede ser seleccionado por el usuario sin embargo la carpeta en la que se almacenara esta predefinida. De forma adicional, al nombre seleccionado por el usuario de forma automática se aumenta fecha y hora del sistema con el objetivo evitar que se sobrescriban archivos antiguos. El diagrama de flujo correspondiente se presenta en la Figura 30. Por defecto los archivos se guardan en una carpeta en el escritorio de nombre Mediciones.



**Figura 30** Diagrama de flujo Guardar

### 3.3.1.4. IMPORTAR

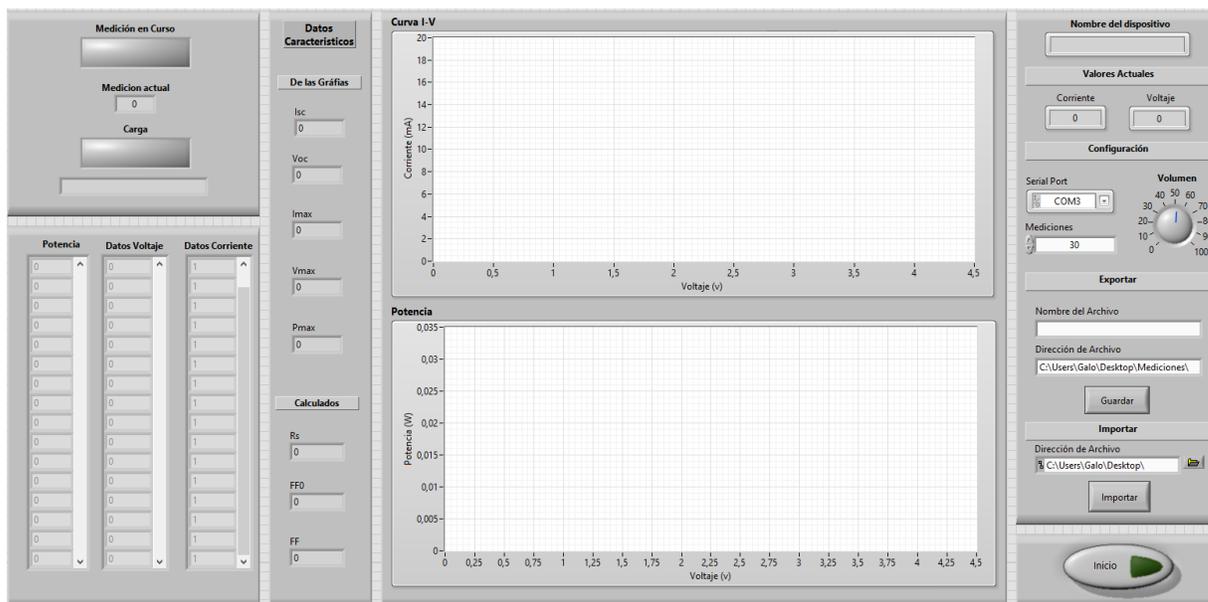
La subrutina importar se muestra en la Figura 31 y permite al usuario abrir archivos previamente guardados.



*Figura 31* Diagrama de flujo Importar

### 3.3.2. INTERFAZ DE USUARIO

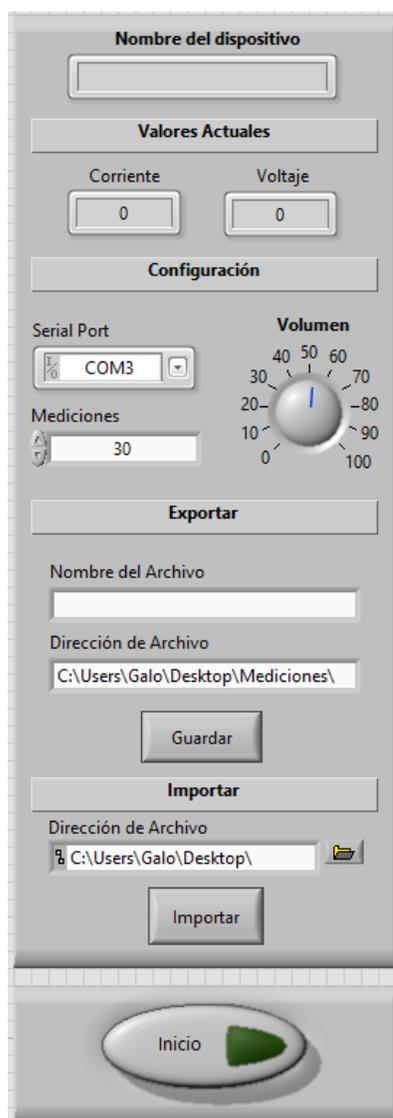
La interfaz presentada al usuario se puede observar en la Figura 32. El diseño de la interfaz estaba basado en lo propuesto por la guía Gedis (Ponsa, Díaz, & Català, 2006). En esta define algunos parámetros como los colores de la ventana y la distribución. En esta sugiere colocar los controles en la parte derecha y toda la presentación de datos en la izquierda, de forma adicional sugiere que alarmas y referencias visuales para el usuario se coloquen en la parte superior. Los colores se seleccionan de tal forma que no causen estrés visual al usuario.



**Figura 32** Interfaz de usuario para medición de Curva I-V

### 3.3.2.1. CONTROLES

La sección de controles que se presenta son los más básicos de interés para el usuario, esto se realizó con el fin de facilitar el control lo más posible. La selección del puerto serial está ligada al puerto en el que se conecta la tarjeta Arduino, esta podría llegar a variar al momento de cambiar de puerto por lo que es necesario que el usuario se capaz de seleccionarlo. El número de mediciones representa el número de muestras que se obtendrá del panel solar para la generación de la curva I-V. El valor por defecto es de 30, el cual se puede modificar en función de las necesidades de las pruebas.



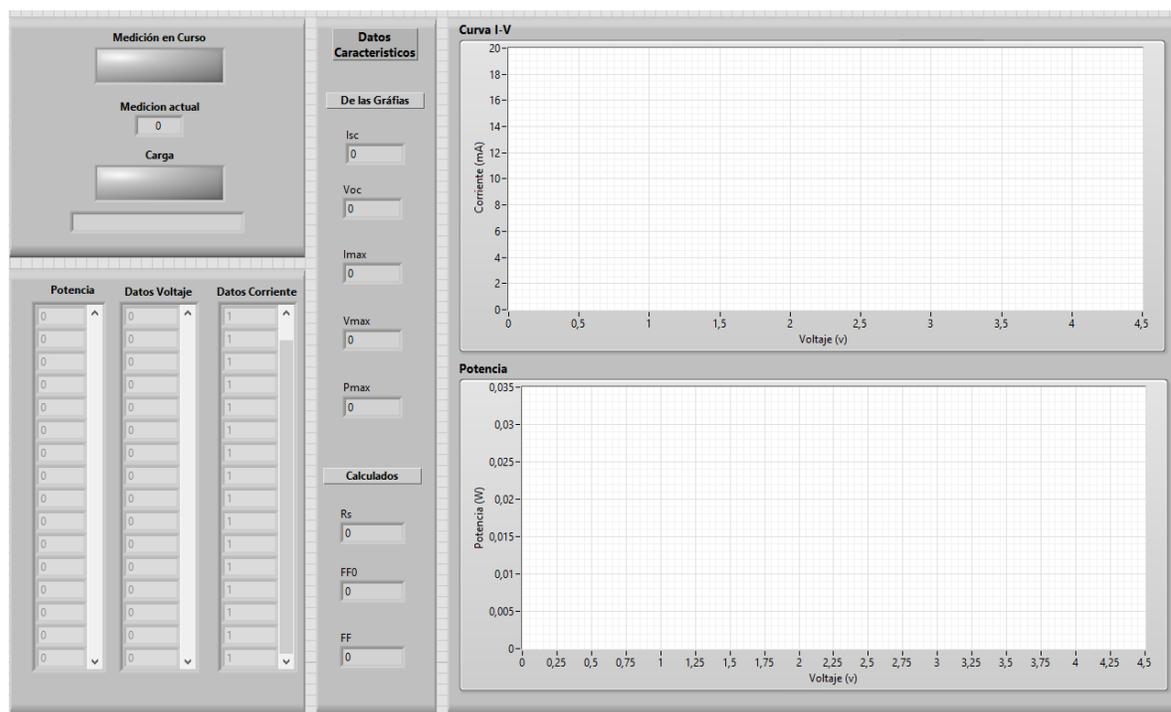
**Figura 33** Controles de la interfaz de usuario

En los controles podemos encontrar también los botones Inicio, Guardar e Importar que nos permiten acceder a las distintas subrutinas presentes en el programa como se explicó en los diagramas de bloques. Cuadros de entrada de texto permiten definir el nombre del documento en caso de que se requiera guardar y un apartado para importar datos. Por último, un controlador de

volumen permite regular el nivel de sonido de la señal auditiva empleada para indicar al usuario que es necesario el incremento de carga.

### 3.3.2.2. PRESENTACIÓN DE DATOS

La sección de presentación de datos mostrada en la Figura 34 permite al usuario observar de forma tanto numérica como gráfica los valores de voltaje, corriente y potencia medidos en el panel. De forma adicional se muestra también los valores característicos del panel solar en la sección datos característicos.

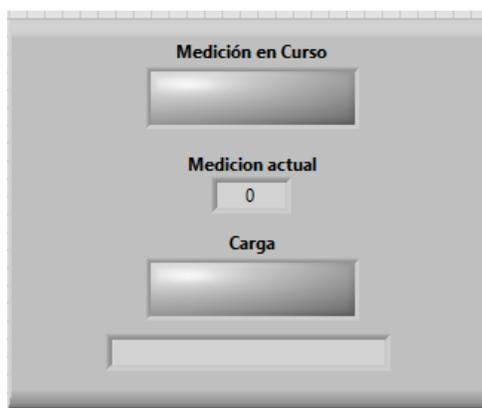


*Figura 34* Presentación de datos en la interfaz de usuario

### 3.3.2.3. ALERTAS

La sección de alertas está diseñada para indicar al usuario que existe una medición en curso y alertar acerca del incremento de carga. Para la medición en curso se seleccionó un indicador

verde acorde a lo expuesto por la guía Gedis para equipos en funcionamiento mientras que para el incremento de carga se optó por un indicador amarillo por tratarse de una alerta al usuario.



*Figura 35* Alertas en la interfaz de Usuarios

### 3.4. INTERFAZ EN LABVIEW PARA LA MEDICIÓN DE MOVILIDAD DE PORTADORES DE CARGA

La medición de movilidad de portadores de carga se realiza a través del método CELIV. El diagrama de bloques de la *Figura 36* muestra los componentes necesarios para el diseño de sistema de medición.



*Figura 36* Diagrama de bloques CELIV

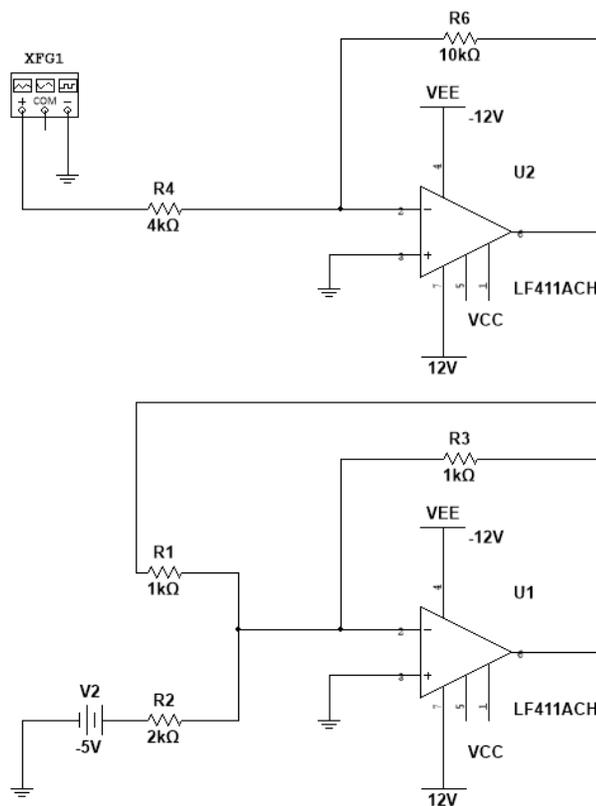
#### 3.4.1. GENERADOR DE ONDA

Las características principales para el generador son:

- Señal: Diente de Sierra

- Frecuencia: 50-100 KHz
- Voltaje: 1-8V

La idea original era usar el generador incorporado en el módulo PXI, sin embargo, el PXIe-5450 inicio a presentar inconvenientes al generar dientes de sierra a la frecuencia 60KHz, ya que la señal se veía distorsionada. Otro problema presente es la salida de voltaje de  $1V_{PP}$  ya que esto requeriría el uso de amplificadores para lograr la señal requerida, el uso de amplificadores operacionales se ve limitado para el trabajo en frecuencias alrededor de 80 kHz. Sin embargo, un diseño de amplificadores se realizó para la utilización de este generador, el cual se muestra en la siguiente figura. Aunque este no se llegó a ocupar.



**Figura 37** Circuito para la amplificación del generador PXIe-5450

De igual forma se realizó la programación correspondiente para el uso del PXIe-5450 en LabVIEW. En la Figura 38 se muestra la ventana de configuración creada para el uso del generador. Se programó de tal forma que el usuario pueda modificar únicamente la frecuencia de muestreo ya que, para poder modificar el voltaje de salida era necesario el manejo de potenciómetros digitales en el amplificador.



**Figura 38** Ventana generador de Onda

Luego de intentar solventar estos inconvenientes y no lograr un buen resultado se decidió por el uso de un generador externo al PXI. Para esta tarea se utilizó el generador de funciones arbitrarias TEKTRONIX AFG2020.

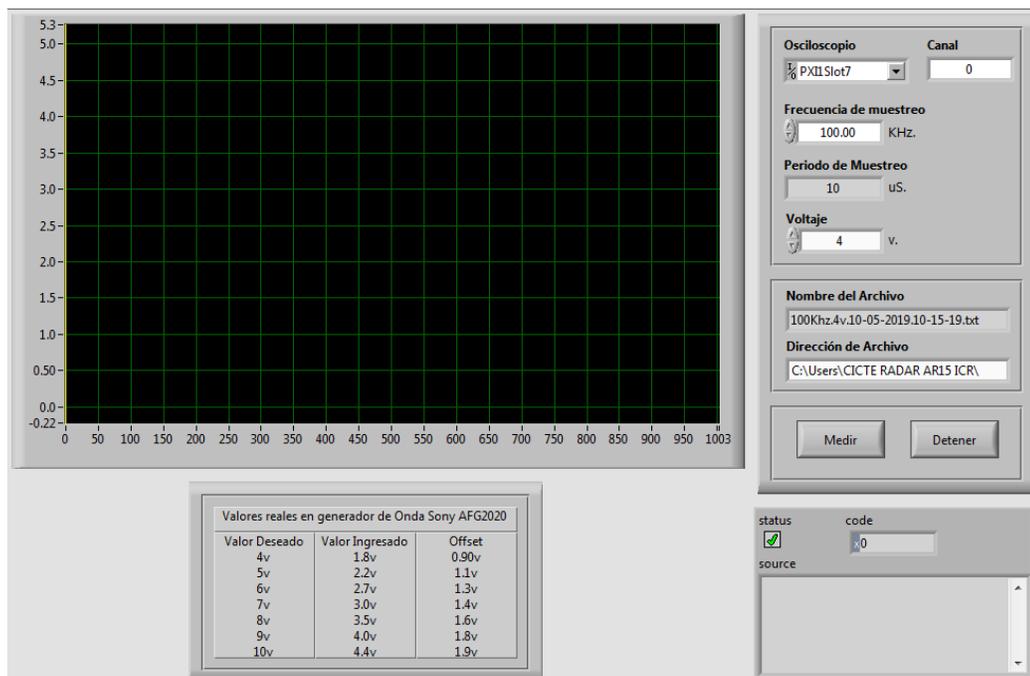
### **3.4.2. OSCILOSCOPIO**

Las únicas condiciones para el osciloscopio es que sea capaz de tomar las mediciones de los valores de respuesta de la celda para los periodos de muestreo previamente establecidos que son 50 – 100KHz.

### **3.4.3. ADQUISICIÓN DE DATOS CELIV**

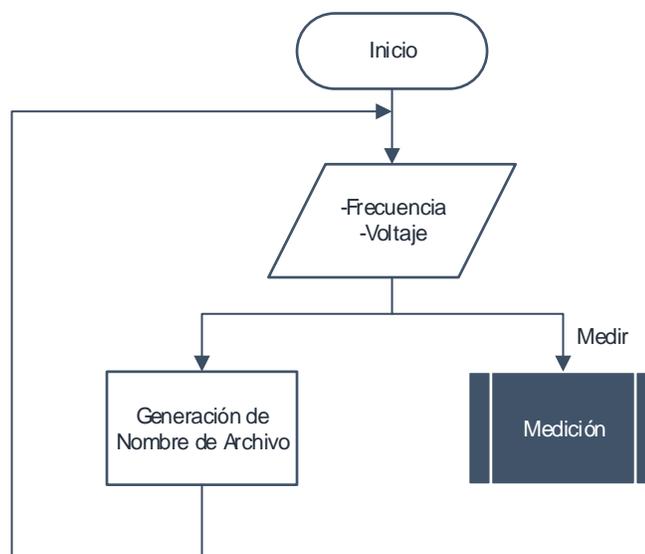
La ventana diseñada para la adquisición de datos en CELIV se presenta en la Figura 39. Al igual que en el programa para la caracterización de celdas la distribución de la ventana se basa en la guía GEDIS por lo que se presentan controles en la derecha y presentación en la parte izquierda de la ventana.

El usuario puede seleccionar el canal y el puerto en el que se encuentra el Módulo osciloscopio PXIe-5160, además, deberá seleccionar los valores de frecuencia y voltaje que seleccione en el generador de onda, estos valores permiten que el archivo guarde el nombre de forma automática en función de los parámetros seleccionados. En base a esto, el nombre del archivo txt será: frecuencia de muestreo, valor de voltaje, fecha y hora. El cuadro presentado en la esquina inferior derecha está colocado para la presentación de errores en la medición y en la parte izquierda se muestra una gráfica con los datos medidos.

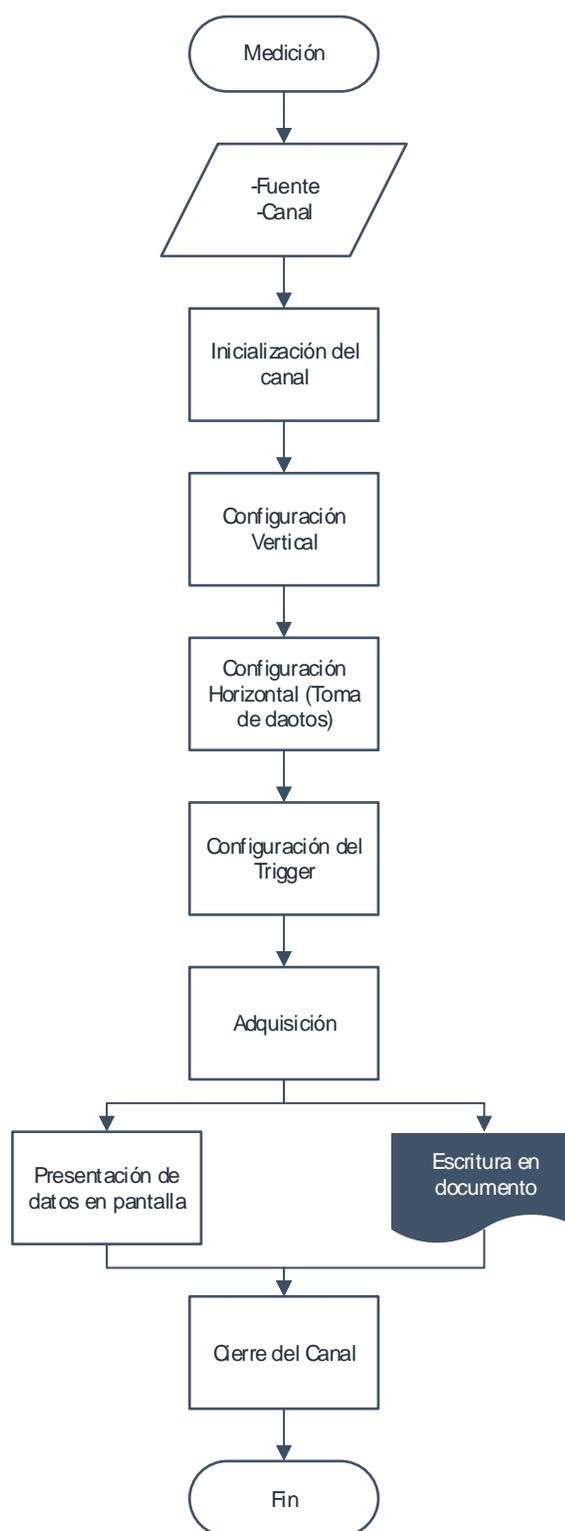


**Figura 39** Adquisición de Datos CELIV

La programación realizada para la adquisición de datos se presenta en la Figura 40. Se puede observar que casi toda la configuración se centra en apertura y uso del canal al que se encuentra conectado el módulo PXIe-5160.



**CONTINÚA**



**Figura 40** Diagrama de Flujo toma de datos CELIV.

### 3.4.4. CÁLCULOS CELIV

Para los cálculos correspondientes al movimiento de portadores de carga el programa es necesario en primer lugar obtener los valores de  $t_{max}$ ,  $j(0)$  y  $\Delta j$  de la gráfica, esto se realiza a través del manejo de cursores. Con estos valores se procede a realizar los cálculos respectivos a partir de la ecuación ( 29 ) y sus derivaciones.

La ventana diseñada para la realización de cálculos se presenta en la Figura 41. En la parte superior se presenta la ventana para el manejo de cursores mientras que en la parte inferior se realizan los cálculos correspondientes.

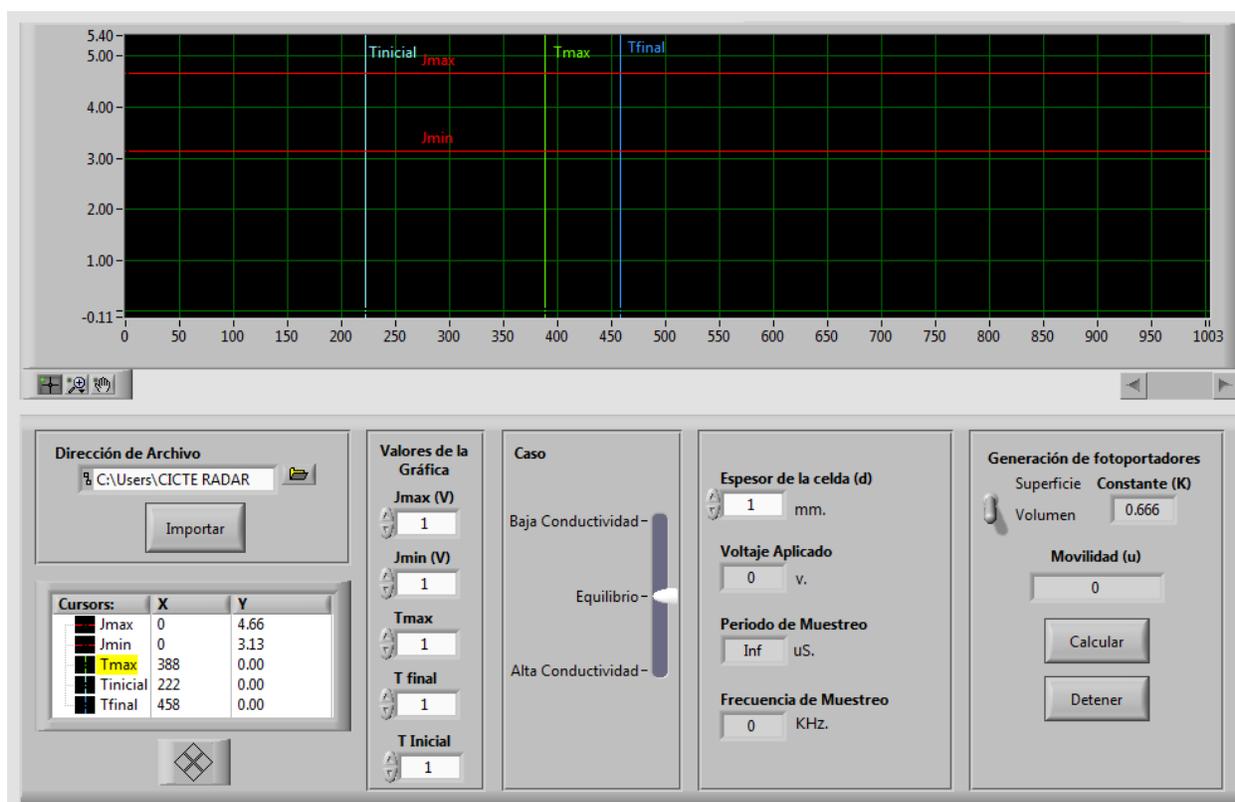
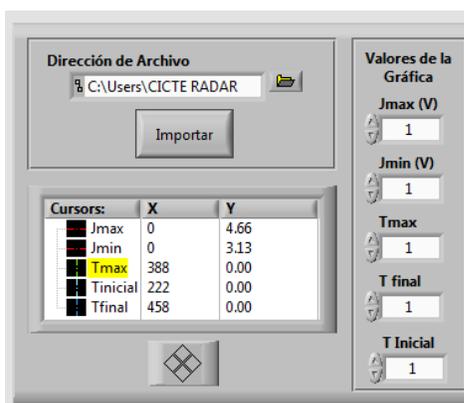


Figura 41 Cálculo de Movilidad CELIV



Los cursores se deben manejar por el usuario, ya que no existe una opción directa para autoseleccionar la posición, una vez considere que están los cursores en los valores adecuados puede observar los valores numéricos en el cuadro ubicado en la parte inferior izquierda y que se muestra en la siguiente figura. Los valores correspondientes al tiempo se presentan en el eje X mientras que los valores correspondientes a la densidad corriente se presentan en el eje Y. Finalmente el usuario deberá ingresar estos valores en la sección “Valores de la Gráfica” para proceder con los cálculos.



**Figura 43** Valores de los cursores

La última parte para la ejecución de cálculos consiste en ingresar el espesor de la celda y seleccionar el tipo de generación de fotoportadores ya que el voltaje y frecuencia de muestreo, como ya se mencionó, se obtienen automáticamente del nombre del archivo. El caso de conductividad se selecciona de forma automática a partir de los valores de  $j(0)$  y  $\Delta j$  y finalmente, al hacer click en el botón “Calcular” el programa calcula la movilidad de portadores de carga.

The image shows a software interface for calculating mobility. It is divided into three main sections:

- Caso:** A vertical slider on the left side, ranging from "Baja Conductividad" (Low Conductivity) at the top to "Alta Conductividad" (High Conductivity) at the bottom. The slider is currently positioned at "Equilibrio" (Equilibrium).
- Parameters:** A central panel with four input fields:
  - Esesor de la celda (d):** A numeric input field containing "1" followed by "mm.".
  - Voltaje Aplicado:** A numeric input field containing "0" followed by "v.".
  - Periodo de Muestreo:** A numeric input field containing "Inf" followed by "uS.".
  - Frecuencia de Muestreo:** A numeric input field containing "0" followed by "KHz.".
- Generación de fotoportadores:** A right-hand panel with a slider and two buttons:
  - A slider for "Superficie Constante (K)" with a value of "0.666".
  - A numeric input field for "Volumen" containing "0".
  - A "Movilidad (u)" input field containing "0".
  - Two buttons: "Calcular" (Calculate) and "Detener" (Stop).

**Figura 44** Valores y Constantes para cálculos de movilidad

## CAPÍTULO IV

### EQUIPOS

#### 4.1. EQUIPOS

En el siguiente apartado se detalla los equipos tanto en Hardware y Software para el desarrollo del proyecto.

##### 4.1.1. HARDWARE

###### 4.1.1.1. LAPTOP DELL INSPIRO 17R-N7110

La laptop utilizada para el desarrollo del proyecto presenta las características descritas en la siguiente tabla

**Tabla 13**

*Características Laptop Dell Inspiro 17R-N7110*

Procesador	<b>Intel Core i7 2<sup>nd</sup> Gen 2670 QM (CPU 2.20 GHz)</b>
Memoria RAM	6.00 GB
Tipo de Sistema	64 bits, procesador x64
Sistema operativo	Windows 10 Home

###### 4.1.1.2. PXI

El sistema PXI es un conjunto de módulos de National Instrument que tienen como objetivo formar un Sistema para la adquisición y procesamiento de datos que facilita la integración de módulos a necesidad del usuario.



**Figura 45** Módulo PXI

Fuente: (National Instrument, 2018)

El sistema PXI disponible en los laboratorios del CICTE está compuesto por los módulos:

#### **4.1.1.2.1. NI PXIE-1082**

El PXIe-1082 es el chasis para la integración de módulos, Este cuenta con 8 ranuras y fuente de alimentación optimizada para operación silenciosa y alto rendimiento incluso para aplicaciones que requieren enfriamiento. (Instruments, 2017b) Acepta módulos PXI Express en cada ranura.

#### **4.1.1.2.2. PXIE-8115**

Se trata de un controlador PXI, este cuenta con un Procesador Dual-Core Embedded 2.5 GHz. El PXI-8115 es un controlador embebido para sistemas PXI. Es utilizado para aplicaciones de instrumentación, procesamiento intenso y adquisición de datos. (Instruments, 2017<sup>a</sup>)

El PXI-8115 incluye:

- Dos puertos Ethernet (Gigabit) 10/100/1000BASE-TX,
- Dos puertos USB 3.0

- Cuatro puertos USB 2.0
- disco duro integrado 250 GB
- Memoria RAM 8GB
- Otros periféricos (ranura ExpressCard / 34, dos conectores de video de puerto de pantalla, IEEE 1284, Puerto paralelo ECP / EPP, controlador GPIB (IEEE 488) y puerto serie RS232)
- Software: el sistema operativo y los controladores ya están instalados.

Dentro del controlador se encuentran instaladas todas las aplicaciones relacionadas a LabVIEW, además, de todos los controladores necesarios para el funcionamiento del resto de módulos.

#### **4.1.1.2.3. PXIE-5160**

El PXIe-5160 es un osciloscopio de alta velocidad que posee dos canales que muestrean hasta 2.5 GS/s con configuración flexible para el acoplamiento, el rango de voltaje y el filtrado.



**Figura 46** Módulo PXIe-5160  
*Fuente: (National Instruments, 2016)*

El dispositivo es ideal para aplicaciones con señales rápidas que requieren hasta 500 MHz de ancho de banda analógico y configuraciones de medidas flexibles. Otras características importantes de mencionar son que cuenta con un circuito de disparo de alta precisión, así como capacidades de sincronización PXI y de registros de datos.(Instrument, 2017b)

- Ancho de banda máximo: 500 MHz
- Frecuencia máxima de muestreo: 2.5 GS / s
- Canales de entrada de voltaje: 2 o 4
- Resolución de entrada analógica: 10 bits
- Memoria integrada de 2 GB o 64 MB

#### **4.1.1.2.4. PXIE-5450**

El PXIe-5450 es un generador de Forma de Onda arbitraria de doble canal de 145 MHz que está optimizado para señales I/Q. Es un instrumento ideal para dispositivos de pruebas con entradas I/Q o como el componente de banda base de un generador vectorial de señales de RF. El PXIe-5450 también tiene funciones de procesamiento de señales en tarjeta (OSP) que incluyen filtros de forma de pulso y de interpolación, control de ganancia y desfase y un oscilador controlado numéricamente (NCO) para cambio de frecuencia. (Instruments, 2017c)

- Procesamiento de señal a bordo (OSP)
- 145 MHz de ancho de banda de banda base I / Q
- Resolución de 16 bits de salida (2) Canales, Salida Diferencial
- Salida 1 Vpp

#### **4.1.1.3. GENERADOR DE FUNCIONES ARBITRARIAS TEKTRONIX AFG2020.**

El generador de funciones Arbitrarias es un equipo para pruebas capaz de generar formas de onda eléctricas repetitivas o de simple disparo. El equipo está pensado para análisis durante pruebas, pruebas de fallos y confirmación de funcionamiento adecuado de dispositivos.

El generador presenta las siguientes características:

- Monitor estándar de alta resolución con GUI
- Resolución vertical: 12 bits (1/4096)
- Reloj de resolución: 250 MHz, precisión de 1 ppm, 0.5 Hz (10 dígitos)
- 16 formas de onda arbitrarias con longitudes de registro de 1K
- Formas de onda estándar: onda sinusoidal; Cuadrado; Triángulo; Rampa; Pulso
- Modulación interna de AM, FM, PSK y FSK
- Modulación AM externa
- Barrido lineal / log estándar
- Retardo de disparo (700 ns a 100 s)
- Transferencias directas de forma de onda DSO sin controlador
- 2 canal con ejecución totalmente independiente.

El inconveniente principal del con el uso de este generador, es el no poderlo controlar directamente desde el ordenador, sin embargo, presenta de señales arbitrarias con características adecuadas para las mediciones de movilidad de portadores de carga.

#### **4.1.1.4. ARDUINO MEGA**

Se planea utilizar un Arduino Mega como tarjeta de adquisición de datos para las mediciones de los valores de la Curva I-V de las celdas solares. Es importante mencionar que no se realizara ninguna programación directo en la tarjeta Arduino, sino que la utilización de esta se realizara a través de LabVIEW.

Las características que presenta la tarjeta Arduino Mega son:

- Microcontrolador: Atmega2560
- Voltaje Operativo: 5V
- Voltaje de Entrada: 7-12V
- Voltaje de Entrada(límites): 6-20V
- Pines digitales de Entrada/Salida: 54 (de los cuales 15 proveen salida PWM)
- Pines análogos de entrada: 16
- Corriente DC por cada Pin Entrada/Salida: 40 mA
- Corriente DC entregada en el Pin 3.3V: 50 mA
- Memoria Flash: 256 KB (8KB usados por el bootloader)
- SRAM: 8KB
- EEPROM: 4KB
- Clock Speed: 16 MHz

#### **4.1.1.5. REFLECTOR LED JETA 30W**

El reflector LED Jeta es una luminaria de uso general utilizada también para construcción e iluminación de fachada. Posee una protección IP65 con un chasis de aluminio pensado también para la disipación de calor.



**Figura 47** Led reflector Jeta

*Fuente: (Sylvania, 2017)*

Las características que presenta la luminaria son:

**Tabla 14**

*Características reflector LED Jeta 30W*

<b>Potencia (W)</b>	30
<b>Flujo luminoso (Lm)</b>	2700
<b>CCT (K)</b>	6500
<b>Tensión de línea (V)</b>	100-240

Se planea utilizar el reflector como simulador solar tomando en consideración algunos puntos que se definirán en el siguiente capítulo.

#### **4.1.1.6. BANCO DE RESISTENCIAS VARIABLES**

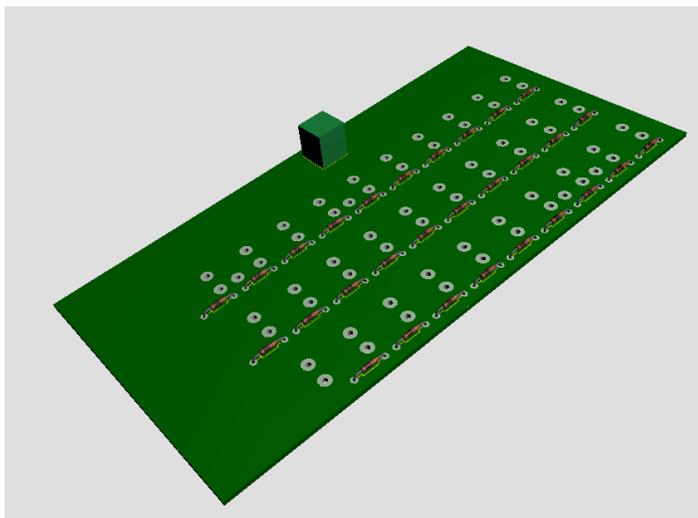
Como se mencionó en el capítulo anterior, para obtener las curvas I-V de una celda solar es necesario realizar variaciones de carga en sus terminales. Con el objetivo de facilitar las mediciones con luz solar o con el simulador solar, se propone el diseño de un banco de resistencias variable para prueba. Cabe mencionar que el banco de resistencias está pensado para ser utilizado en los

dos paneles solares con los que se realizara el proyecto por lo que, si bien el diseño se puede re utilizar para proyectos similares, los valores de resistencia se deben cambiar para adecuarse de mejor manera a los paneles a utilizar.

En base a pruebas realizadas en los paneles bajo luz solar directa con la ayuda de multímetros se pudo observar que existían variaciones de voltaje que permitían obtener una buena curva I-V al aumentar la carga de progresivamente en  $50\Omega$ . Esto resulta útil considerando que, por ejemplo: El panel 1 presenta incrementos de alrededor de  $0.5V$  por cada aumento de carga hasta llegar a  $3V$ . Al alcanzar este valor, un incremento de  $50\Omega$  va dando como resultado variaciones cada vez más pequeñas de voltaje que al llegar a cierto punto requieren demasiados incrementos de carga para lograr un incremento considerable de voltaje.

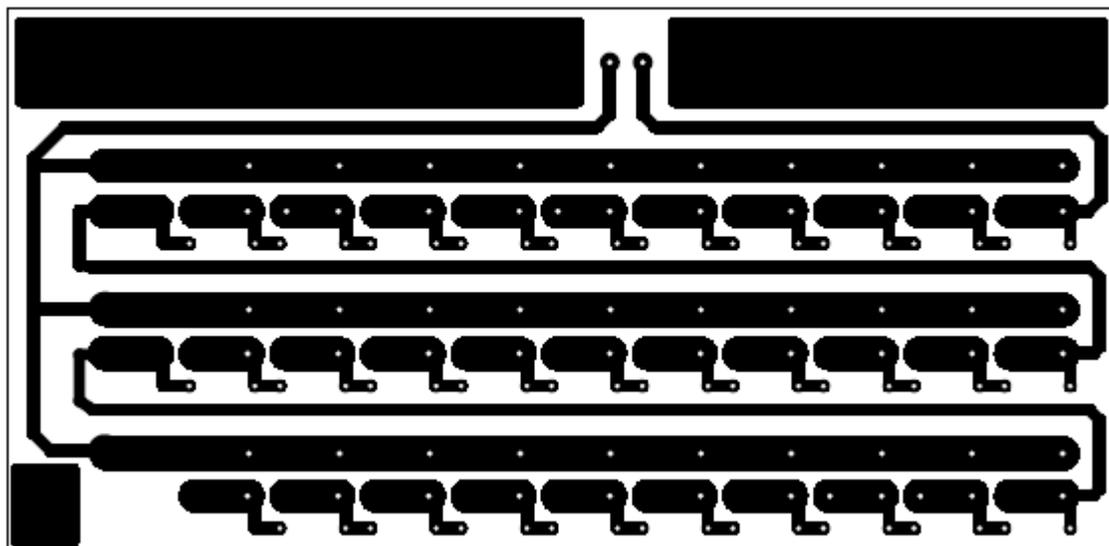
Por esta razón se propone utilizar incrementos de resistencia que no sean necesariamente lineales a lo largo de todo el rango de cargas. Esto tiene como objetivo el disminuir el número de mediciones necesarias para obtener toda la curva característica I-V.

La Figura 48 muestra un modelo 3D diseñado en Ares de la distribución de las resistencias para un circuito impreso. Se puede observar que cuenta con un total de las 29 resistencias en serie que se activaran por medio de interruptores en secuencia para el aumento de carga. Al contar con 29 resistencias significa que una medición completa de la curva I-V requerirá realizar 31 mediciones incluyendo la medición de  $I_{SC}$  y  $V_{OC}$ . La medición de  $I_{SC}$  se realiza con todos los interruptores apagados mientras que al activar el interruptor 30, por el diseño de la placa, el circuito pasara a estar en circuito abierto lo cual nos permite realizar la medición del voltaje  $V_{OC}$ .



**Figura 48** Vista lateral de la simulación del 3D del banco de carga diseñado en ARES

EL diseño para la placa PCB se presenta se presenta en la Figura 49 y los valores de resistencia a utilizar se presentan en la Tabla 15. Estos valores fueron elegidos en base a pruebas realizadas con los paneles y se ajusta para la utilización tanto para el panel 1 como el panel 2.



**Figura 49** Diseño PCB banco de resistencias variable realizado en ARES

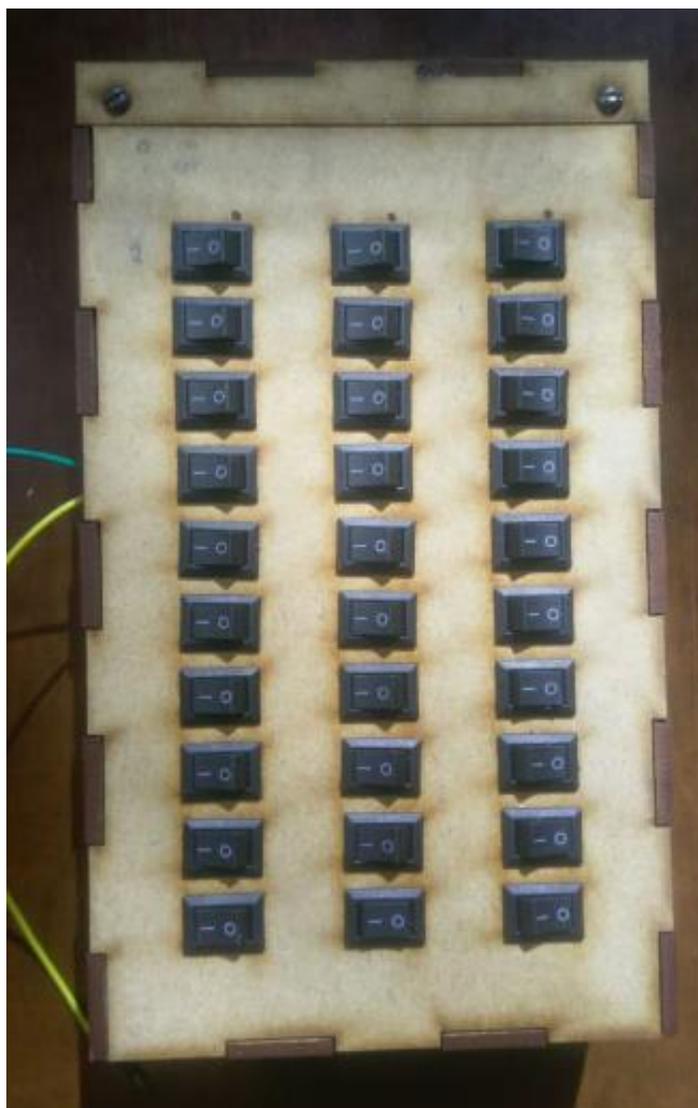
Se puede observar que el diseño requiere únicamente interruptores, resistencias de 0.4 pulgadas de valores comerciales y una bornera para los cables de salida. Es recomendable que los cables de conexión al panel solar sean lo más cortos posibles, esto con el objetivo de disminuir la resistencia en los conductores ya que esta podría afectar la medición.

**Tabla 15**

*Resistencias utilizadas en el banco de resistencias*

<b>Valor</b>	<b>Número de resistencias</b>	<b>Resistencia Total</b>
<b>47 <math>\Omega</math></b>	20	1020 $\Omega$
<b>150 <math>\Omega</math></b>	5	750 $\Omega$
<b>1 K <math>\Omega</math></b>	3	3000 $\Omega$
<b>1.2 K <math>\Omega</math></b>	1	1200 $\Omega$
	<b>Total</b>	5970 $\Omega$

Para dar un mejor acabado al banco de carga en AutoCAD se realizó un diseño de caja para corte laser en MDF de 3mm. Finalmente, en la Figura 50 se muestra el banco de resistencias variable completo. Se puede notar que la operación bastante sencilla y fácil de transportar por si se requiere cambiar de sitio. Lo único que el usuario debe hacer para aumentar la carga activando cada una de los interruptores de forma secuencial.



*Figura 50* Banco de resistencias variable terminado.

## **4.1.2. SOFTWARE**

### **4.1.2.1. LABVIEW**

Es el programa base sobre el cual está desarrollado todo el presente Proyecto. LabVIEW es un entorno de desarrollo para el diseño de sistemas basado en un lenguaje de programación gráfico. Se diseñó para el desarrollo de sistemas de prueba y diseño de sistemas simulados o reales.

Este programa fue creado por National Instruments y se encuentra en constante actualización. Es importante mencionar que la plataforma permite también instalar adds para facilitar integración con módulos que no pertenecen a National Instruments como es el caso de Arduino.

Los entornos de programación en LabVIEW se llaman instrumentos virtuales y como ya se mencionó, es una herramienta gráfica de programación. Esto quiere decir que no se escribe código en los trabajos, sino que se dibujan diagramas lo cual facilita la comprensión del programa. Además, la gran cantidad de bloques pre diseñados facilita aún más la creación de proyectos.

Cabe mencionar que LabVIEW es una herramienta de pago lo que la vuelve menos accesible, sin embargo, El módulo PXIe incluye una licencia para el uso de LabVIEW 2012. Para el trabajo en el computador personal se optará por usar LabVIEW 2017, esto se debe principalmente a la facilidad para conseguir la versión de prueba. La compatibilidad entre las dos versiones de LabVIEW no presenta inconvenientes exceptuando por los bloques integrados en LabVIEW 2012 instalados específicamente para el control de los módulos PXI Express.

Las adds adicionales necesarias para el desarrollo del proyecto son LINX para el control del Arduino y MathScript para la integración de MATLAB.

En el presente trabajo LabVIEW se emplea como plataforma de desarrollo para las ventanas de usuario utilizadas para manejo de equipos y presentación de resultados. Los equipos que

componen el Módulo PXIe y la tarjeta de adquisición Arduino están programadas y se manejan en base a este entorno de desarrollo.

#### **4.1.2.1.1. LINX**

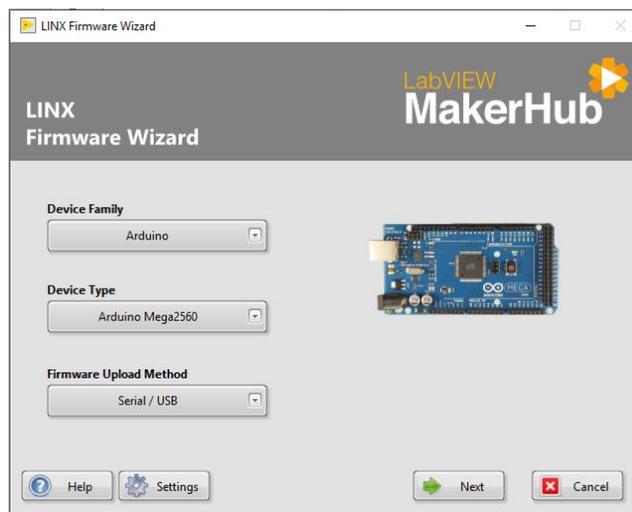
LINX es un proyecto de fuente abierta de Digilent y está diseñado para facilitar el desarrollo de aplicaciones embebidas usando LabVIEW. (LabVIEW, 2013) LINX incluye APIs de hardware para algunas de las tarjetas de adquisición más populares, lo cual permite tener acceso a periféricos como E/S digitales, E/S analógicas, PWM, I2C, SPI y UART.

Entre las tarjetas que permite configurar tenemos:

- BeagleBone Black
- Raspberry Pi 2 y 3
- Arduino
- chipKIT
- PJRC
- RedBoard.

A demás, LINX posee Vis para el manejo de algunos de los sensores más comunes para proyectos.

Para empezar a trabajar con alguna de las tarjetas previamente mencionadas, es necesario conectar la tarjeta al ordenador y cargar un Firmware propio de LINX, como se muestra en la Figura 51 y quedan listas para su utilización en LabVIEW.



**Figura 51** Firmware Wizard de LINX

#### **4.1.2.1.2. MATHSCRIPT**

El Módulo LabVIEW MathScript permite implementar matemática textual al entorno de desarrollo LabVIEW con un compilador para archivos .m desarrollados en el software MATLAB.

La principal intención de instalar MathScript es permitir combinar el enfoque textual y la parte gráfica para el desarrollo de los algoritmos correspondientes. Varios cálculos necesarios para obtener parámetros de la Curva I-V de la celda solar se facilitan mediante la implementación de código por matemática textual.

#### **4.1.2.2. ARDUINO IDE 1.8.9**

Arduino IDE es un software de código abierto que permite la escritura de códigos y cargarlos en el módulo Arduino. Este programa es compatible con Windows, Mac y Linux. El entorno está hecho en Java y proporciona al usuario un gran número de bibliotecas para el diseño de proyectos.

Como se mencionó previamente, el control del módulo Arduino se realizará a partir del entorno LabVIEW, sin embargo, es necesario el instalar este software para poder hacer uso del módulo a través de programas externos.

#### **4.1.2.3. MATLAB**

Es un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux. Es un software de pago.

Entre las funciones que presenta se tiene:

- Manipulación de matrices
- Representación de datos y funciones
- Implementación de algoritmos
- Creación de interfaces de usuario (GUI)
- Comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

En el desarrollo del presente proyecto, se emplea MATLAB para la comparación de los datos obtenidos de las celdas solares, contrastando el sistema implementado con los datos obtenidos tras exposición a la luz solar directa y los distintos modelos matemáticos propuestos. Las herramientas de implementación de algoritmos de MATLAB permiten que este entorno de desarrollo sea adecuado para la ejecución de los métodos iterativos y los cálculos necesarios para obtener los modelos matemáticos de las celdas. Finalmente, MATLAB facilita la presentación de gráficas utilizadas para la visualización y presentación de los datos y resultados.

#### **4.1.2.4. PROTEUS – ARES 8.1**

Proteus es un software creado para el diseño electrónico automático, simulación y prueba de circuitos. Fue desarrollado por Labcenter Electronics Ltd., y consta de los dos programas principales: Ares e Isis (Instruments, 2015).

ARES, o Advanced Routing and Editing Software es una herramienta para enrutado, ubicación y edición de componentes que se utiliza para el diseño y la fabricación de placas de circuito impreso

#### **4.1.2.5. MULTISIM 14.1**

NI Multisim es un programa de simulación de esquemas electrónicos que forma parte de un conjunto de programas de diseño de circuitos, junto con NI Ultiboard. Multisim fue creado originalmente por una compañía llamada Electronics Workbench, que ahora es una división de National Instruments.

## CAPÍTULO V

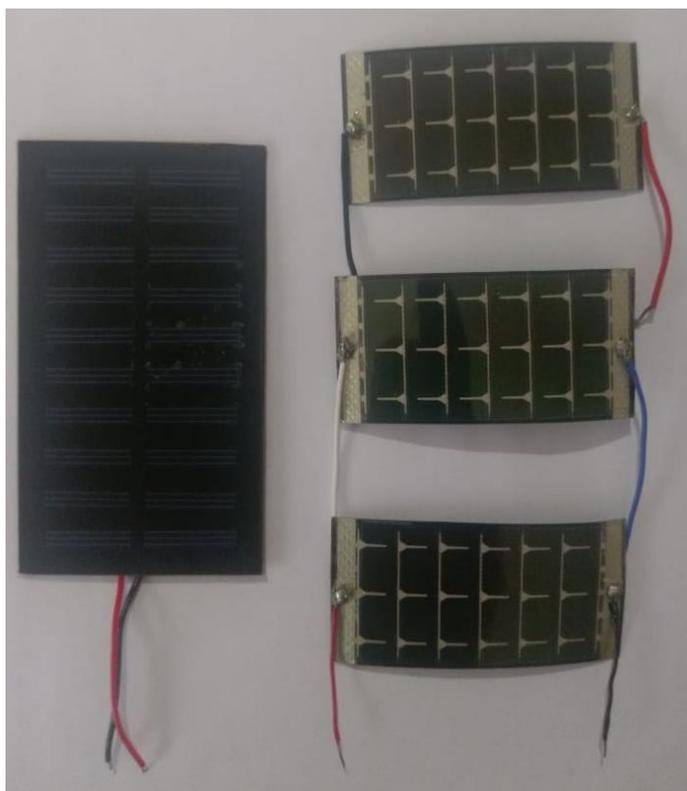
### PUEBAS Y RESULTADOS

#### 5.1. PROTOTIPO DE CARACTERIZACIÓN DE CELDAS SOLARES

Para iniciar con las pruebas del prototipo de caracterización de celdas solares es necesario iniciar con mediciones del funcionamiento de las celdas bajo luz solar. Las pruebas bajo radiación solar se realizaron en durante 3 días no consecutivos para 4 paneles solares de silicio amorfo, de los cuales 3 son paneles del mismo tipo. Los 3 paneles del mismo tipo son paneles usados, expuestos en diferente medida a radiación solar a lo largo de los años por lo que algunos presentan mejor funcionamiento que otros. El cuarto y último panel se reciclo de un cargador solar de celular nuevo.

Es importante mencionar que no se posee la tabla de características de fábrica de los paneles utilizados en el proyecto, razón por la cual, para determinar las características de funcionamiento es necesario realizar mediciones bajo radiación solar y el simulador solar a fin de poder contrastar la respuesta de los paneles frente a las dos fuentes de radiación.

Los 4 paneles solares a utilizar en el proyecto se presentan en la Figura 52. Las características de trabajo se obtuvieron a partir de las mediciones bajo radiación solar y se presentan en la siguiente tabla. Los valores mostrados se obtuvieron como promedio de las mediciones.



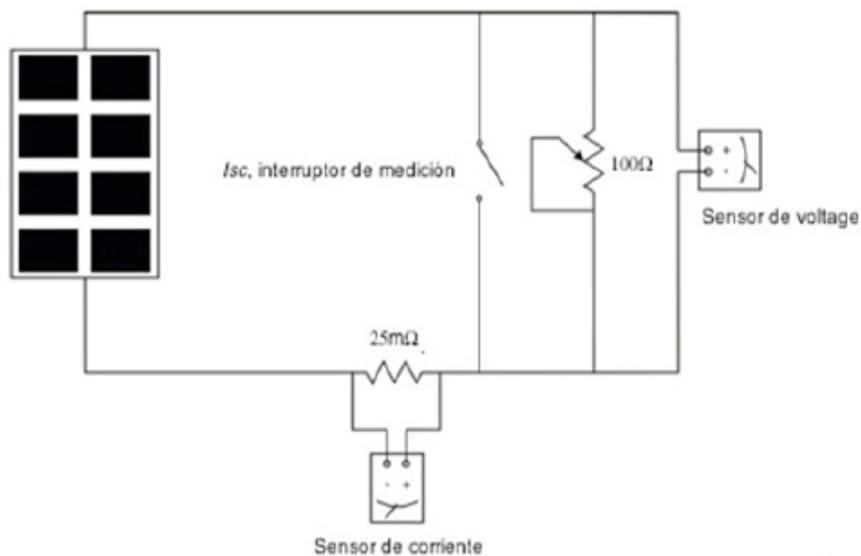
**Figura 52** Paneles solares 1,2,3 y 4

**Tabla 16**

*Valores característicos de los paneles 1,2,3 y 4*

	<b>Panel 1</b>	<b>Panel 2</b>	<b>Panel 3</b>	<b>Panel 4</b>
$V_{oc}$	9.64V	9.159V	9.642V	5.103V
$I_{sc}$	20mA	0.185mA	20mA	5.211mA
$P_{max}$	0,079W	0,0611W	0,101W	0,0168W

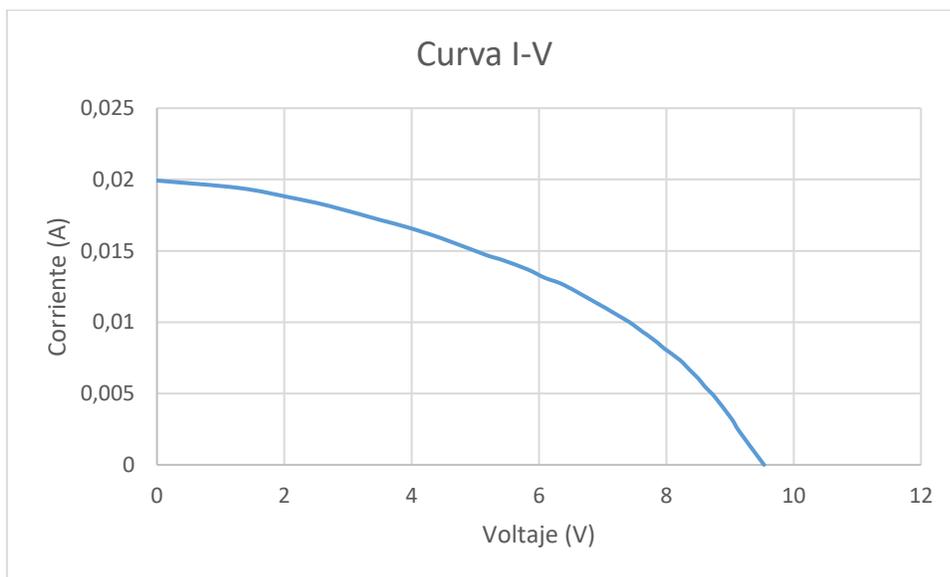
Estos valores fueron censados con la ayuda de dos multímetros conectados a los terminales de los paneles, uno como voltímetro a la carga y el segundo como amperímetro entre la celda y la carga. La conexión utilizada se muestra en la Figura 53. La lista de valores completos se puede observar en los anexos



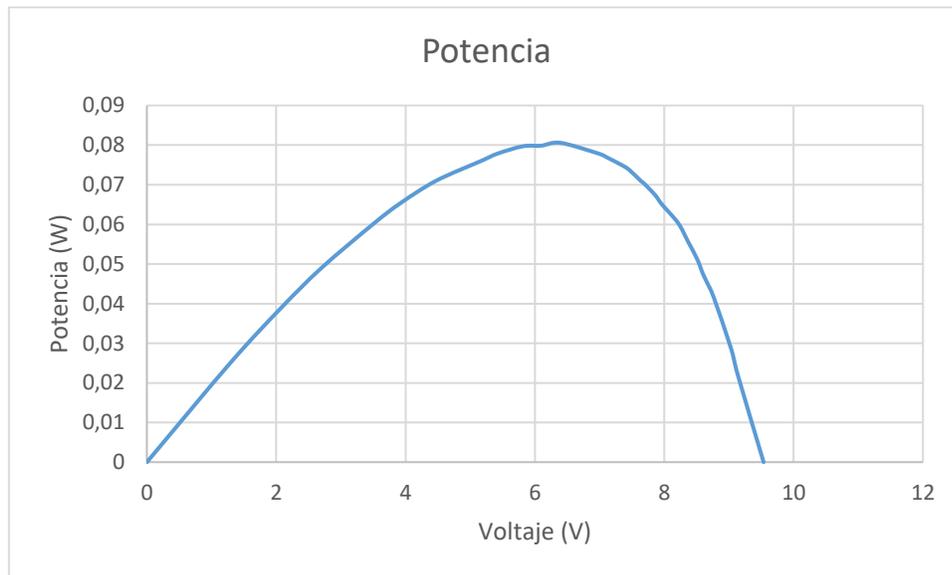
**Figura 53** Circuito empleado para caracterizar celdas solares

La curva I-V característica y la curva de potencia de estos paneles se presenta a continuación:

Panel 1

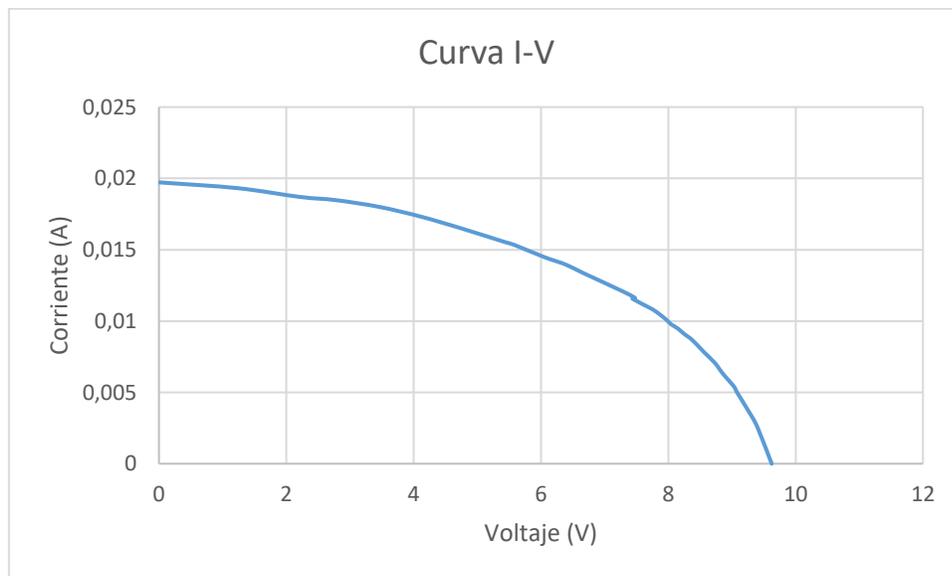


**Figura 54** Curva I-V panel 1

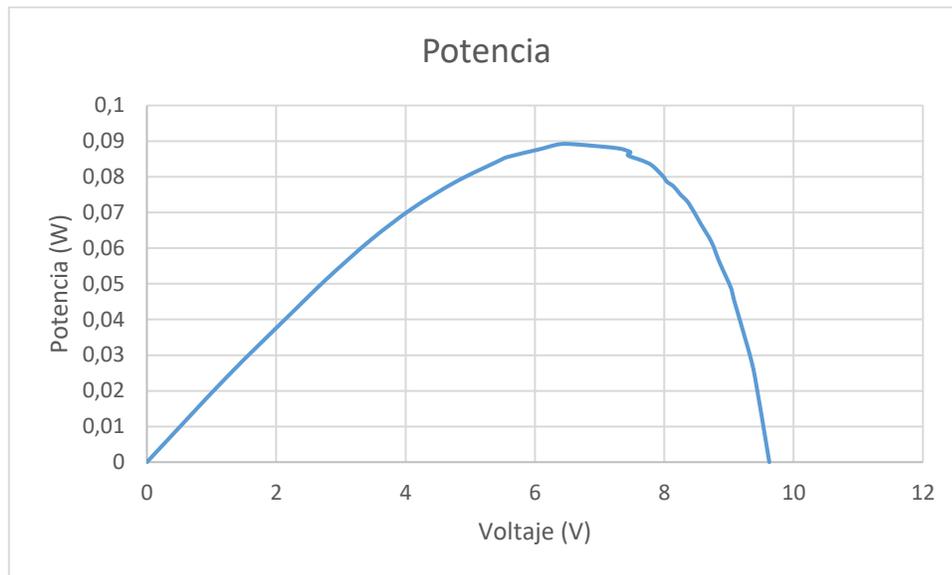


**Figura 55** Curva de Potencia panel 1

Panel 2

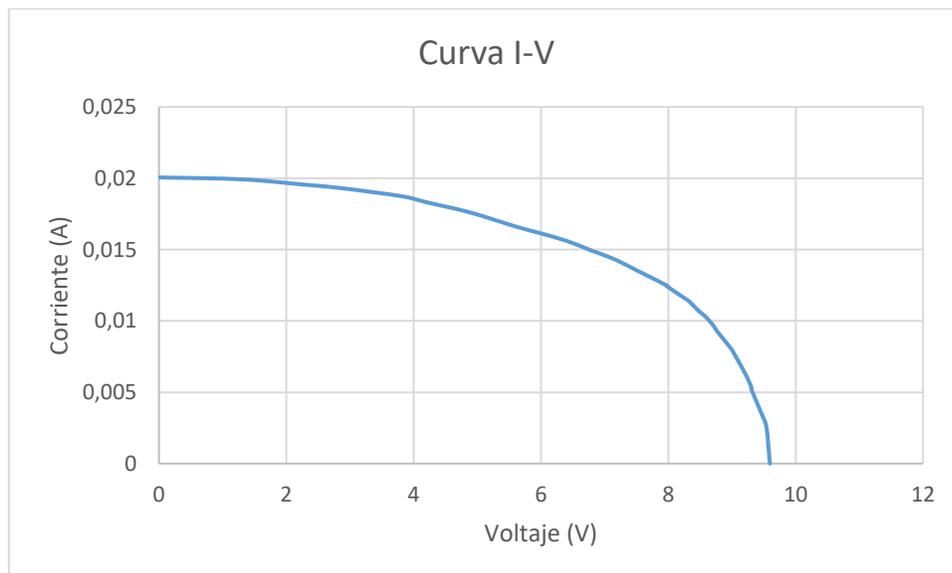


**Figura 56** Curva I-V panel 2

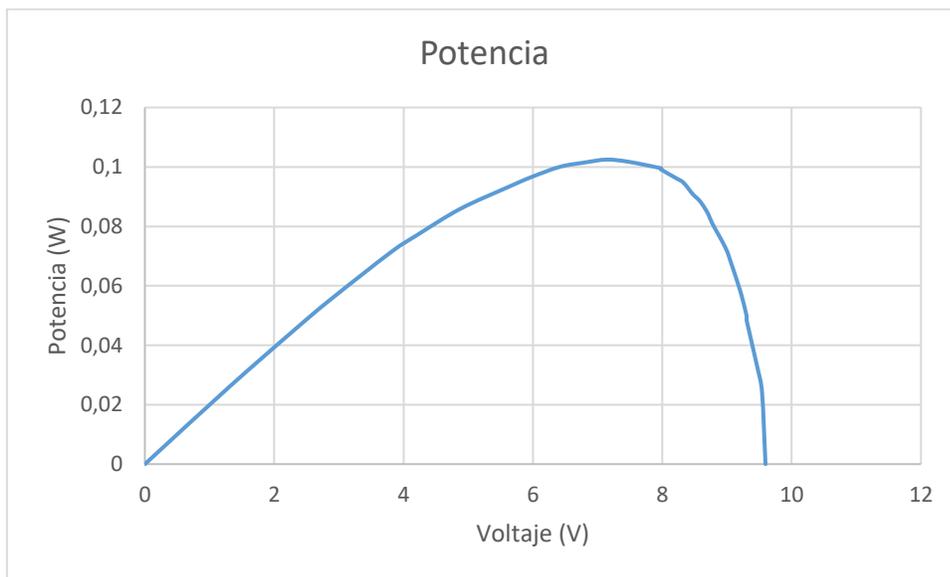


**Figura 57** Curva de Potencia panel 2

Panel 3

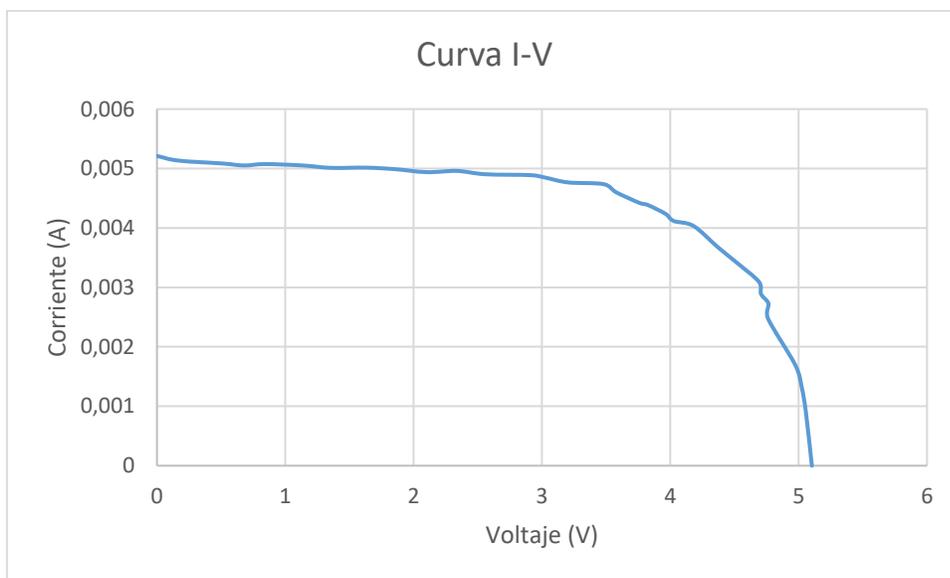


**Figura 58** Curva I-V panel 3

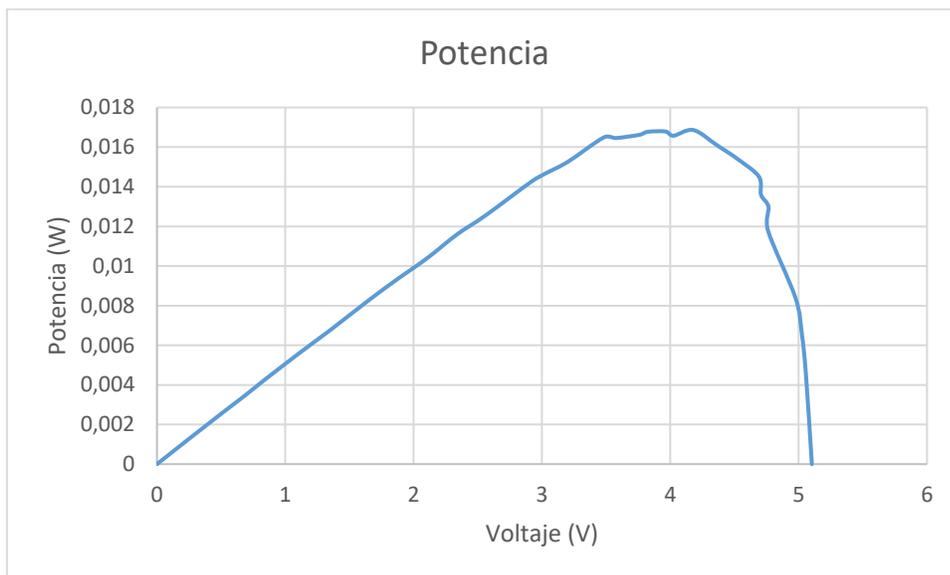


**Figura 59** Curva de Potencia panel 3

Panel 4



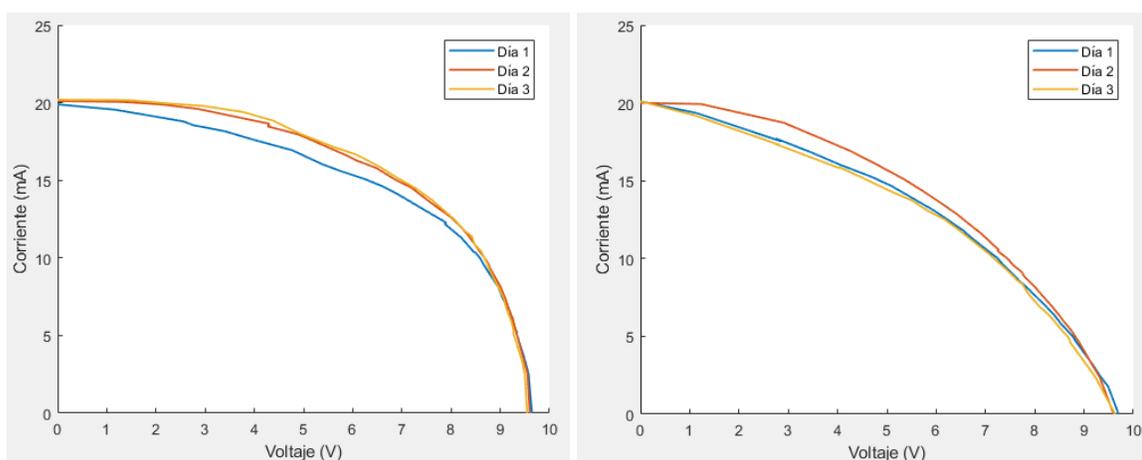
**Figura 60** Curva I-V panel 4



**Figura 61** Curva de Potencia panel 4

De las curvas I-V y de potencia de los paneles 1, 2, 3 y 4 podemos realizar los cálculos correspondientes de  $R_s$ ,  $FF$  y  $FF_0$ . Valores necesarios para utilizar el modelo matemático de un solo diodo de la celda solar.

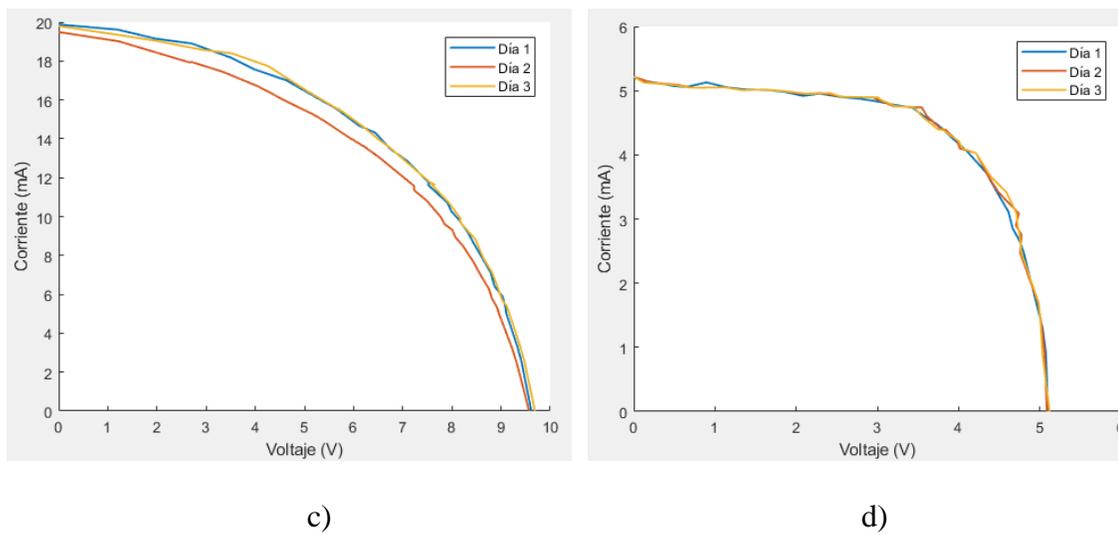
En las gráficas siguientes se mostrará la diferencia en las mediciones bajo radiación solar. Las mediciones se realizaron en días no consecutivos aproximadamente a las 12 del mediodía.



c)

b)

**CONTINÚA**



**Figura 62** Medición de 3 días no consecutivos de los paneles solares 1,2,3 y 4 respectivamente

De la Figura 62 podemos sacar algunas conclusiones de los paneles solares. La primera conclusión importante es que la Curva I-V varía considerablemente entre los distintos días, esto se debe a que, aunque se tome mediciones a la misma hora todos los días las condiciones climáticas no son exactamente iguales. Esta variación en las mediciones es la razón principal de la necesidad de un simulador solar. En cuanto a los paneles solares 1,2 y 3 podemos notar que: el panel solar 1 es el que en mejor estado se encuentra, mientras que el panel 2 es el que en peor estado se encuentra. El panel 4 presenta el comportamiento más acorde a lo esperado de un panel solar.

Teniendo una idea del funcionamiento real, se procede a realizar mediciones de las celdas con el sistema para caracterización propuesto, el objetivo es realizar las mediciones y obtener valores característicos que se usara para la comparación entre las curvas medidas y las curvas a partir del modelo matemático de la celda solar.

**Medición en Curso**

Medición actual: 1

Carga

**Datos Característicos de la Celda Solar**

De las Gráficas

Isc: 0,02 A

Voc: 0,13823 V

I<sub>max</sub>: 0,0135 A

V<sub>max</sub>: 0,0894 V

P<sub>max</sub>: 0,0012068 W

Calculados

FF: 0,4365

FF0: 0,554

R<sub>s</sub>: 1,4653 Ohm

**Curva I-V**

**Potencia**

Nombre del dispositivo: Arduino Mega 2560

Características Del Panel Solar

Numero de Celdas: 70

Configuración

Serial Port: COM3

Volumen: 31

Mediciones: 31

Exportar

Nombre del Archivo:

Dirección de Archivo: C:\Users\Galo\Desktop\Mediciones\

Guardar

Importar

Dirección de Archivo: C:\Users\Galo\Desktop\

Importar

Inicio

Potencia	Datos Voltaje	Datos Corriente
0	0	20
0,023453	1,189	19,725
0,0461703	2,413	19,134
0,0557161	2,96	18,823
0,066529	3,685	18,054
0,073494	4,246	17,309
0,0770405	4,765	16,168
0,0818756	5,546	14,763
0,0816005	5,539	14,732
0,0830144	5,95	13,952
0,0844738	6,255	13,505
0,0837436	6,516	12,852
0,0809564	7,089	11,42
0,0807683	7,054	11,45
0,0801097	7,255	11,042
0,0762203	7,395	10,307

**Medición en Curso**

Medición actual: 1

Carga

**Datos Característicos de la Celda Solar**

De las Gráficas

Isc: 0,02 A

Voc: 0,13814 V

I<sub>max</sub>: 0,0142 A

V<sub>max</sub>: 0,0839 V

P<sub>max</sub>: 0,0011906 W

Calculados

FF: 0,4309

FF0: 0,5577

R<sub>s</sub>: 1,5696 Ohm

**Curva I-V**

**Potencia**

Nombre del dispositivo: Arduino Mega 2560

Características Del Panel Solar

Numero de Celdas: 70

Configuración

Serial Port: COM3

Volumen: 31

Mediciones: 31

Exportar

Nombre del Archivo:

Dirección de Archivo: C:\Users\Galo\Desktop\Mediciones\

Guardar

Importar

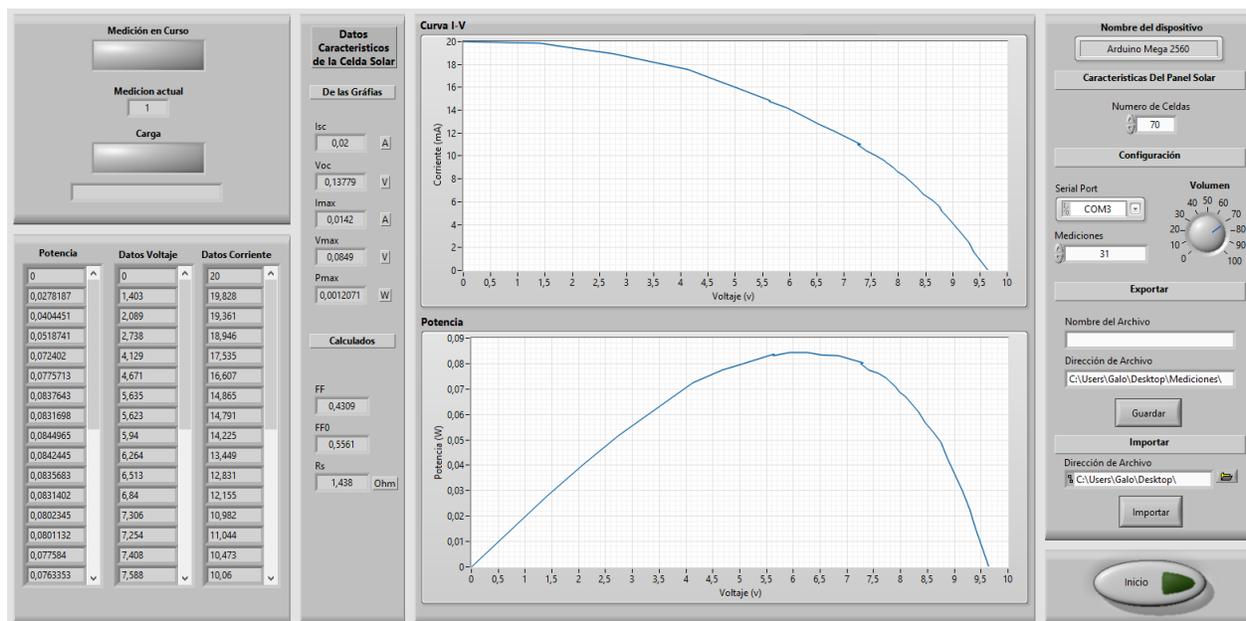
Dirección de Archivo: C:\Users\Galo\Desktop\

Importar

Inicio

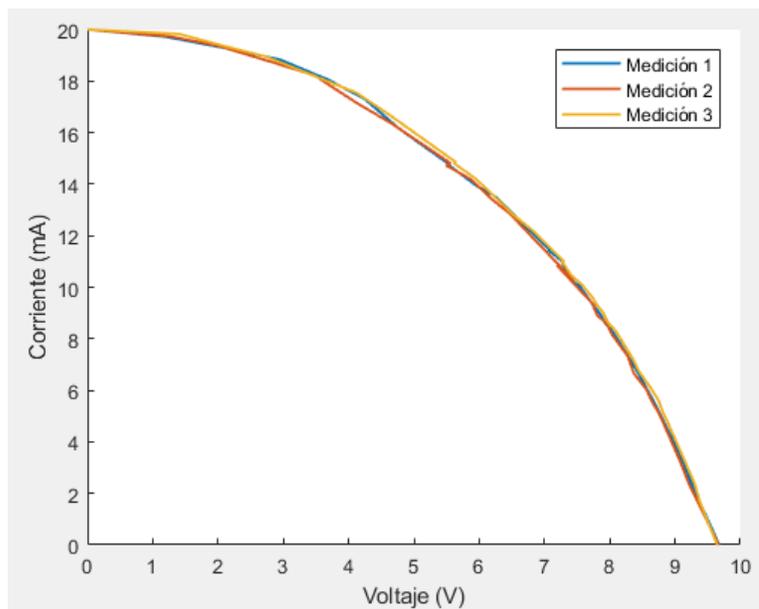
Potencia	Datos Voltaje	Datos Corriente
0	0	20
0,0256163	1,299	19,72
0,0388228	2,005	19,363
0,0533304	2,849	18,719
0,0633692	3,478	18,22
0,0706518	4,117	17,161
0,0762424	4,664	16,347
0,0823528	5,561	14,809
0,0809194	5,495	14,726
0,0833428	5,875	14,186
0,0830912	6,205	13,391
0,083191	6,473	12,852
0,0819083	6,716	12,196
0,0764026	7,451	10,254
0,0780403	7,19	10,854
0,0763371	7,372	10,355

CONTINÚA

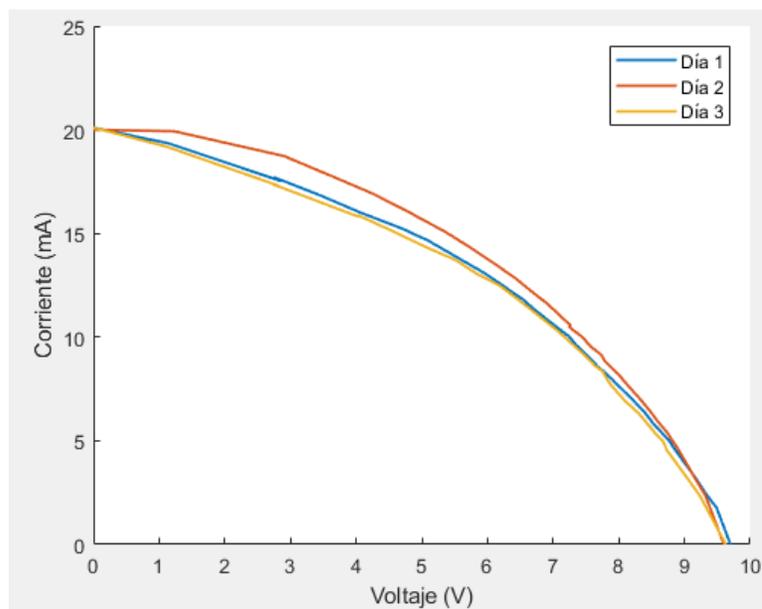


**Figura 63** Mediciones a la Celda 1 en LabVIEW

El primer análisis a realizar será el pasar las gráficas obtenidas mediante el programa propuesto a MATLAB con el fin de obtener una comparación de las tres mediciones realizadas. En la Figura 64. En esta se puede observar que las mediciones tomadas por el programa propuesto presentan valores mucho más cercanos entre sí a los medidos en días consecutivos, esto se debe a que la radiación incidente en la celda solar se vuelve una constante.



a)



b)

**Figura 64** a) Tres mediciones realizadas en el sistema propuesto b) Mediciones de tres días del panel no consecutivas

La siguiente tabla muestra los valores característicos obtenidos en LabVIEW para el panel solar. Para este caso se consideró que el panel está conformado por un total de 70 celdas solares. Parece un valor excesivo, sin embargo, esto se puede justificar considerando que las celdas de silicio amorfo hidrogenado son bastante sencillas de interconectar y tienen dimensiones que suelen estar cercanas al milímetro (Amit, Sethi, & Tiwari, 2013). Se puede verificar la cantidad de celdas que conforman el panel ingresando los valores en el modelo matemático de la celda. Si el número de celda no corresponde, el resultado será una curva I-V calculada muy diferente a la obtenida mediante mediciones.

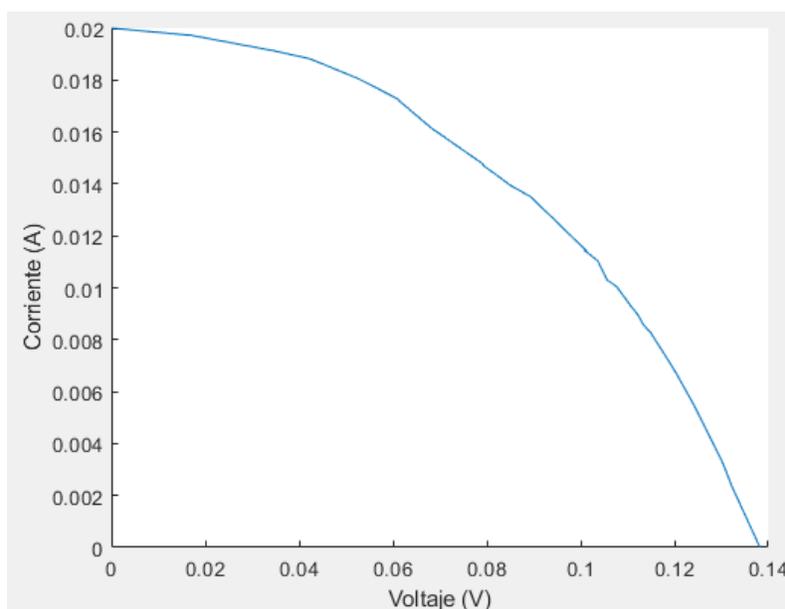
**Tabla 17**

*Valores medidos en LabVIEW del panel solar 1*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
$I_{SC}$	0.020 A
$V_{OC}$	0.13823 V
$P_{Max}$	0.0012068 W
$I_{Max}$	0.0135 A
$V_{Max}$	0.0894 V
$FF$	0.4365
$FF_0$	0.554
$R_S$	1.4653 $\Omega$

Con estos valores se procederá en MATLAB a la creación de un script para el modelado de la curva I-V a partir de los valores característicos mediante el modelo matemático de la celda solar.

Mediante los valores que se obtuvo de la curva I-V graficamos la curva en MATLAB



**Figura 65** Curva I-V Panel 1 en MATLAB

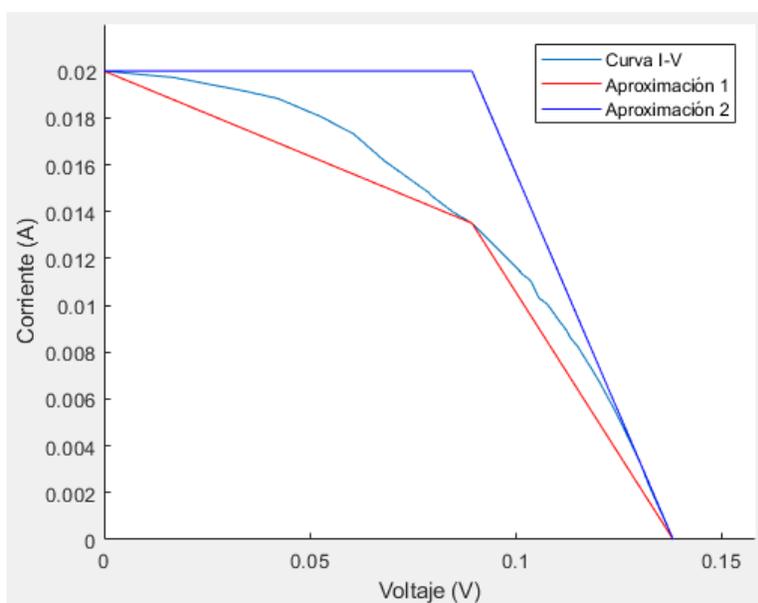
Con los datos ingresados en MATLAB procedemos al cálculo de los valores característicos de la celda solar. Se puede observar que los valores son los mismos obtenidos por el programa propuesto, por lo que usaremos estos valores en el modelo matemático de la celda de un solo diodo.

**Tabla 18**

*Valores calculados en MATLAB del panel solar 1*

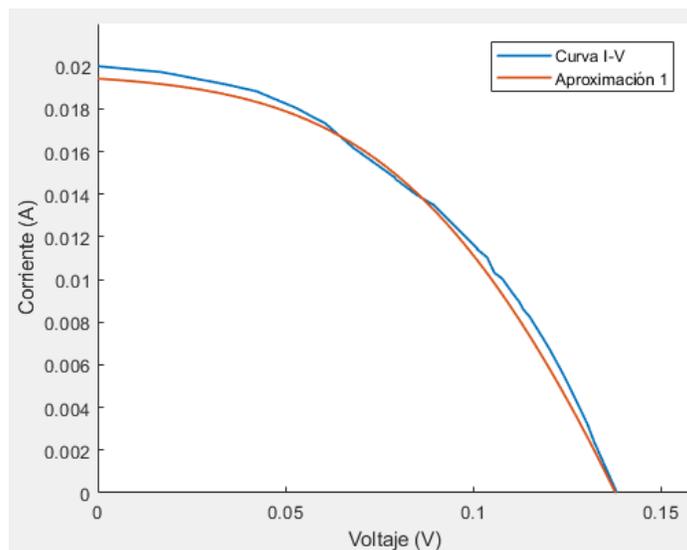
Parámetro	Valor
$I_{SC}$	0.0200 A
$V_{OC}$	0.1382 V
$P_{Max}$	0.0012 W
$I_{Max}$	0.0135 A
$V_{Max}$	0.0894 V
$FF$	0.4365
$FF_0$	0.5540
$R_S$	1.4653 $\Omega$

E. Lorenzo en su libro (Lorenzo, 2006) sugiere realizar una primera aproximación en base a la potencia máxima y valores de corriente de cortocircuito y voltaje de circuito abierto. Las aproximaciones se muestran la figura siguiente junto con la curva I-V. La primera aproximación en rojo está en función de la corriente máxima y voltaje de circuito abierto, podemos notar que nos presenta valores inferiores a los logrados por la celda, pero más apegados a la realidad. La segunda aproximación se presenta de acuerdo al funcionamiento ideal de la celda solar en base a la corriente cortocircuito, gracias a esta aproximación podemos notar que el comportamiento de nuestra celda es bastante lejano al comportamiento ideal.



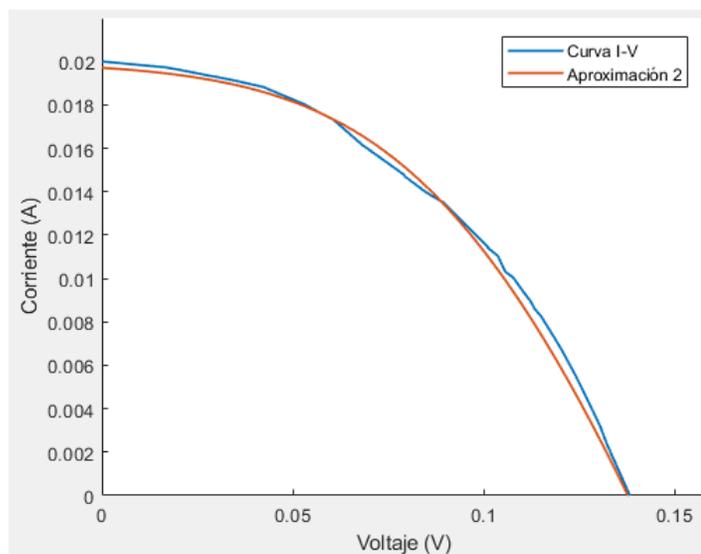
**Figura 66** Aproximaciones del funcionamiento de la celda solar 3 a partir de potencia máxima y corriente de cortocircuito

Con los valores obtenidos de la curva I-V se procede finalmente a obtener la curva I-V aproximada a partir de la ecuación ( 16 ). Como se mencionó esta aproximación permite evitar la utilización de un método iterativo y se presenta en la siguiente figura.



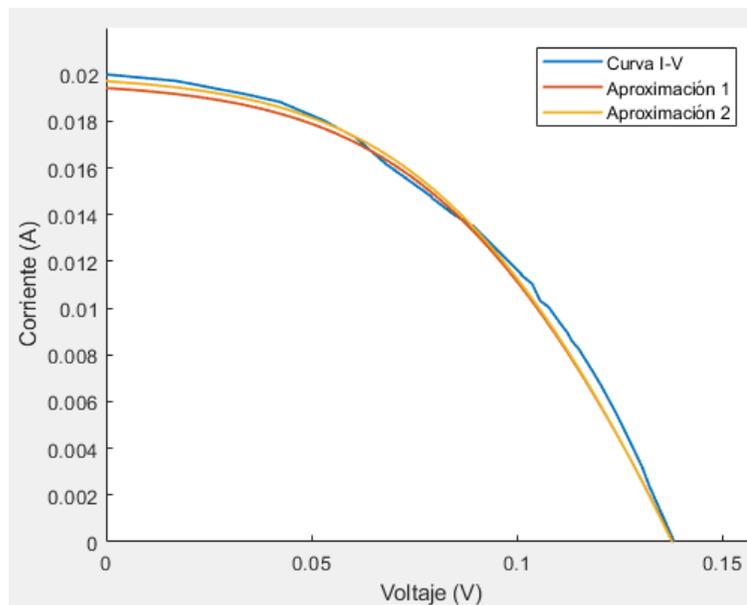
**Figura 67** Aproximación de la Curva I-V por el método de J.M. Ruiz Pérez

Aplicando el método iterativo basado en la ecuación ( 12 ) se puede obtener también un modelo aproximado de la curva I-V. La diferencia principal entre esta aproximación y la anterior es la dificultad de cálculo que presenta la anterior con respecto a esta. El resultado se muestra en la Figura 68.



**Figura 68** Aproximación de la Curva I-V por método iterativo

Al momento de colocar las aproximaciones y la curva I-V medida en una sola gráfica podemos llegar a las siguientes conclusiones. En primer lugar, el valor de corriente de cortocircuito en ninguna de las aproximaciones alcanza el valor de la curva original, esto se debe a que las aproximaciones deben cumplir la condición de que la corriente de salida debe ser igual a la corriente de cortocircuito ( $I = I_{SC}$ ) en  $V = 0$  condición que no se puede cumplir razón por la cual el voltaje inicial en las mediciones tiene un valor inferior, generalmente ( $I = 0.9I_{SC}$ ) aunque esta puede variar entre aproximaciones. Otra diferencia importante se ve en la parte transitoria de la celda, es decir, después del punto de máxima potencia donde ninguna de las aproximaciones se acerca correctamente al valor real. Este efecto se debe al desgaste de la celda solar.



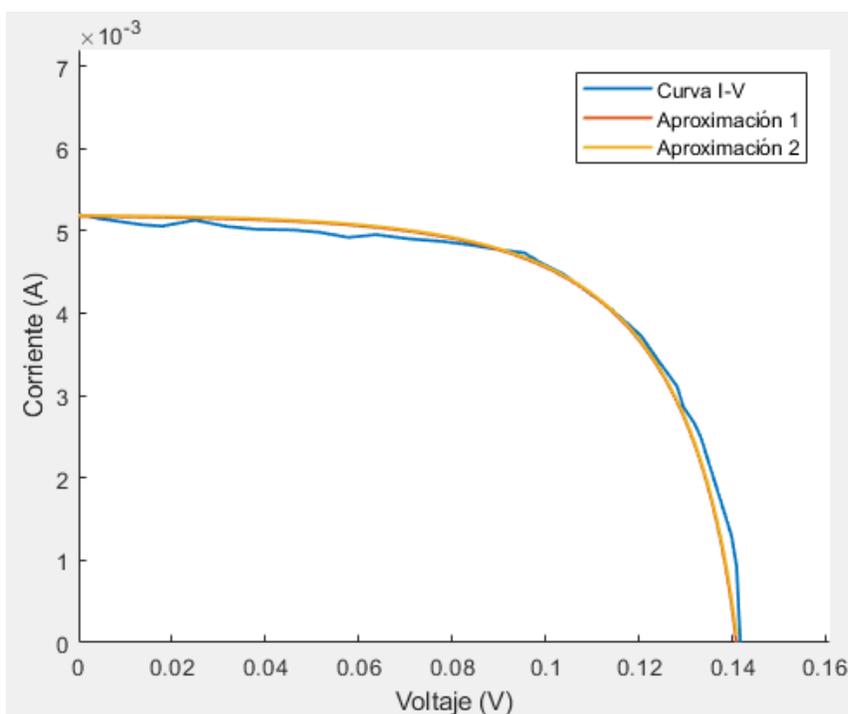
**Figura 69** Aproximación de la Curva I-V por el método de J.M. Ruiz Pérez (Aproximación 1) y por método iterativo (Aproximación 2)

Repitiendo el mismo procedimiento para el panel solar 4, los valores característicos de la celda se muestran en la siguiente tabla

**Tabla 19***Valores calculados en MATLAB del panel solar 4*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
$I_{SC}$	0.0052 A
$V_{OC}$	0.1409 V
$P_{Max}$	0.00046518 W
$I_{Max}$	0.0044 A
$V_{Max}$	0.1061V
$FF$	0.6347
$FF_0$	0.5719
$R_S$	2.9785 $\Omega$

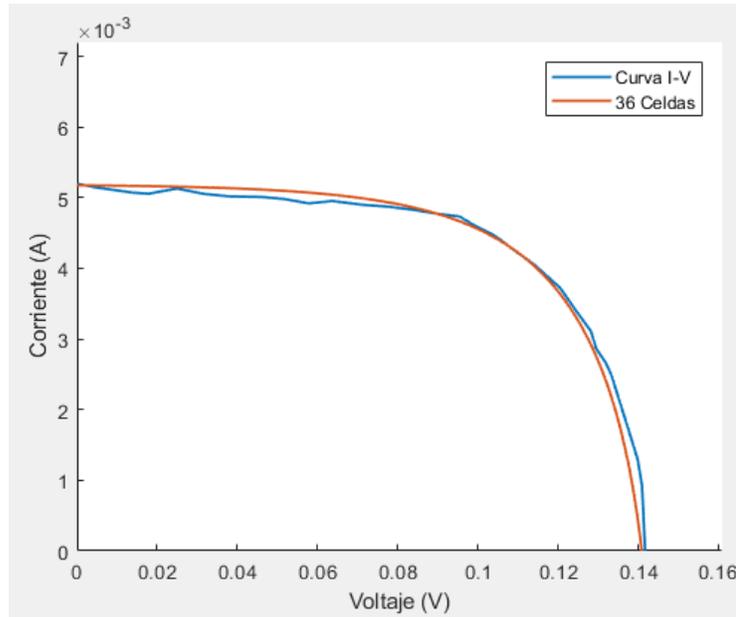
Al igual que en el caso anterior se realizarán ambas aproximaciones de comportamiento. Es interesante notar que ambas aproximaciones para esta celda son iguales, esto se debe a que el panel 4 es un panel nuevo por lo que se ajusta de mejor manera al comportamiento ideal de la celda solar. Es importante mencionar también que las aproximaciones se ajustan de mejor manera al comportamiento ideal de un panel solar que en el caso anterior.



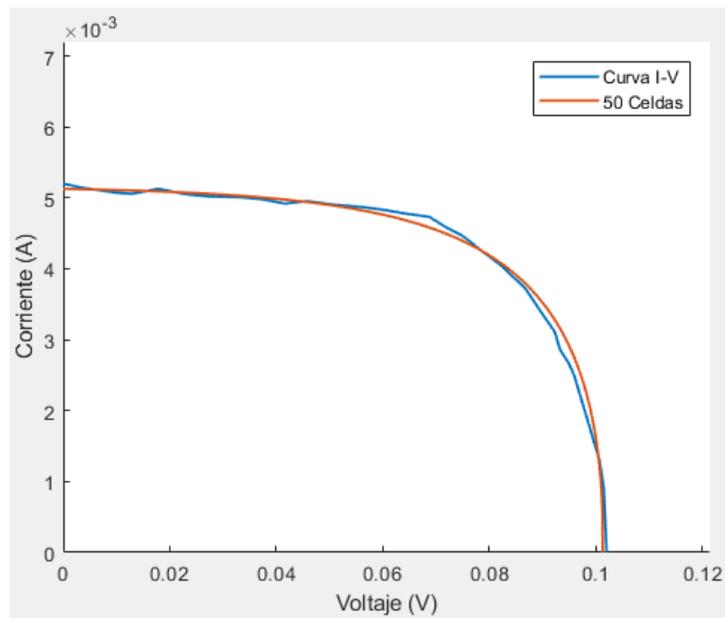
**Figura 70** Aproximación de la Curva I-V por el método de J.M. Ruiz Pérez (Aproximación 1) y por método iterativo (Aproximación 2)

La selección del número de celdas que componen el panel por lo general es sencilla debido a que es un dato que el fabricante entrega junto con los datos del panel solar, sin embargo, al no poseer esta información para las celdas una alternativa válida es variar de forma aleatoria el número de celdas y observar el resultado que se obtiene en la curva I-V aproximada. El resultado mostrado en la curva nos puede dar una idea de que tan acertado se encuentra el número de celdas. En la siguiente figura se puede observar el panel 4 ante distintas variaciones del número de celdas que lo componen. Se puede notar que cuando el número de celdas es mayor al real la etapa lineal de la celda, es decir, antes del punto de máxima potencia se ajusta de la mejor forma posible al funcionamiento ideal de una celda solar, sin embargo, los valores de la etapa transitoria del modelo superan a los valores reales medidos. Por otro lado, cuando el número es celdas es inferior al real

la parte lineal de la celda se comporta como la celda ideal tomando el valor de  $I_{SC}$  y la etapa transitoria decae con valores inferiores a los medidos en la celda.

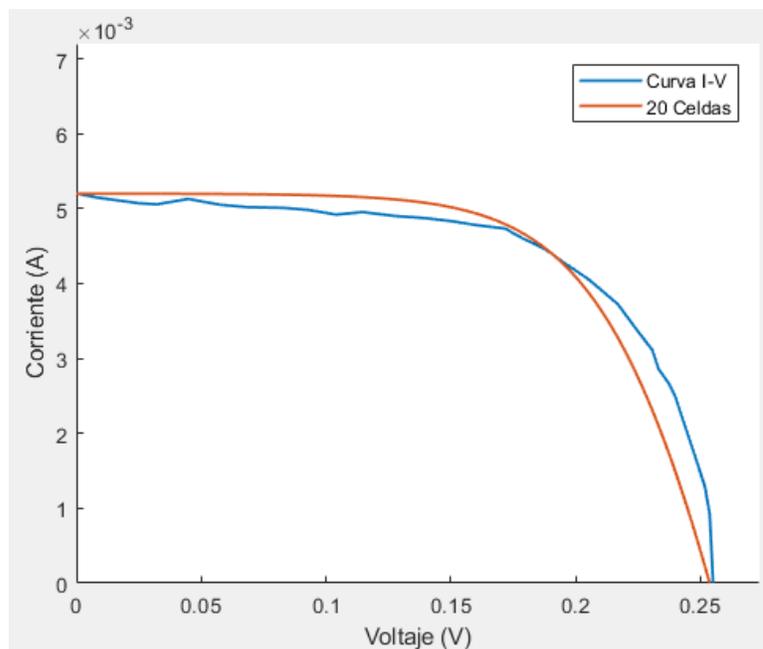


a)



b)

**CONTINÚA**



c)

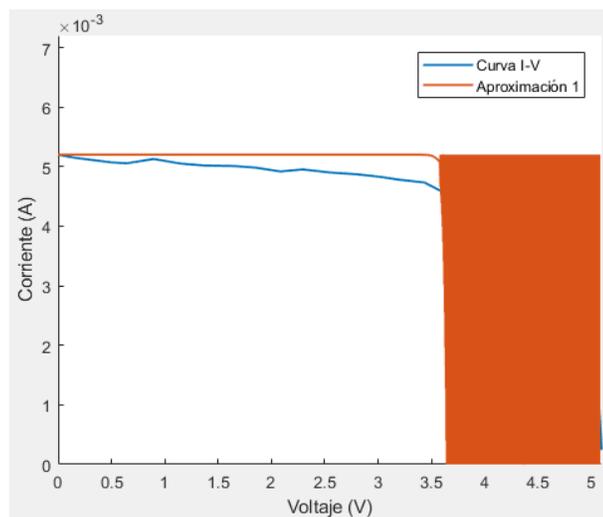
**Figura 71** Curva I-V aproximada de la celda 4 considerando paneles de 36, 50 y 20 celdas

Otro factor que ayuda a encontrar el número de celdas que componen el panel es la resistencia  $R_S$  ya que según la teoría el valor de resistencia no debería superar los  $5 \Omega$  (Amit et al., 2013)(Reynolds, Gordijn, & Smirnov, 2014). Por ejemplo, en la celda 4 si consideramos al panel completo como una única celda obtendremos los valores mostrados en la tabla. Se puede observar que el valor de resistencia indica un total de  $275.24\Omega$  lo cual está muy por encima del valor teórico además los valores mostrados en la tabla no permiten realizar el modelo aproximado adecuado como se presenta en la Figura 72. En esta figura se puede observar que llegado al punto de máxima potencia los valores para la etapa transitoria se vuelven inestables.

**Tabla 20**

Valores calculados en MATLAB del panel solar 4 como una celda única

Parámetro	Valor
$I_{SC}$	0.0052 A
$V_{OC}$	5.0740 V
$P_{Max}$	0.0167 W
$I_{Max}$	0.0044 A
$V_{Max}$	3.8190 V
$FF$	0.6347
$FF_0$	0.8841
$R_S$	275.27 $\Omega$



**Figura 72** Modelo Aproximado del Panel 4 considerándolo como una única celda.

Con estas mediciones se puede presentar el modelo aproximado de la curva I-V y valor característicos de la celda solar, sin embargo, el cálculo de la eficiencia de la celda solar es un poco más complicado de obtener. Si bien es cierto, gracias a los datos que obtenemos del panel solar tenemos casi todos los parámetros necesarios para el cálculo de la eficiencia de la celda, es

necesario obtener el valor de la potencia de entrada incidente en la celda, valor que está ligado al área de la celda solar.

Por poner un ejemplo. La potencia de entrada por las condiciones estándar es **1 kW/m<sup>2</sup>** o **100 mW/cm<sup>2</sup>**. Ahora, si se considera una celda solar de **100 × 100 mm<sup>2</sup>** la potencia de entrada será 10W (Honsberg & Bowden, 2014). Esta relación se cumple de forma satisfactoria para cualquier celda, pero plantea el problema de que es necesario conocer las dimensiones de la celda solar para poder obtener su eficiencia y dado que no contamos con las dimensiones de la celda solar no se puede tener un valor real de eficiencia. Por motivos prácticos, considerando el área del panel solar se asignará valores de área de celda para el panel solar 1 y 4 con el objetivo de observar cómo influye el área de la celda en la eficiencia y a su vez obtener un valor de área de celda aproximado. La siguiente tabla muestra los valores de área considerados y la eficiencia lograda respectivamente.

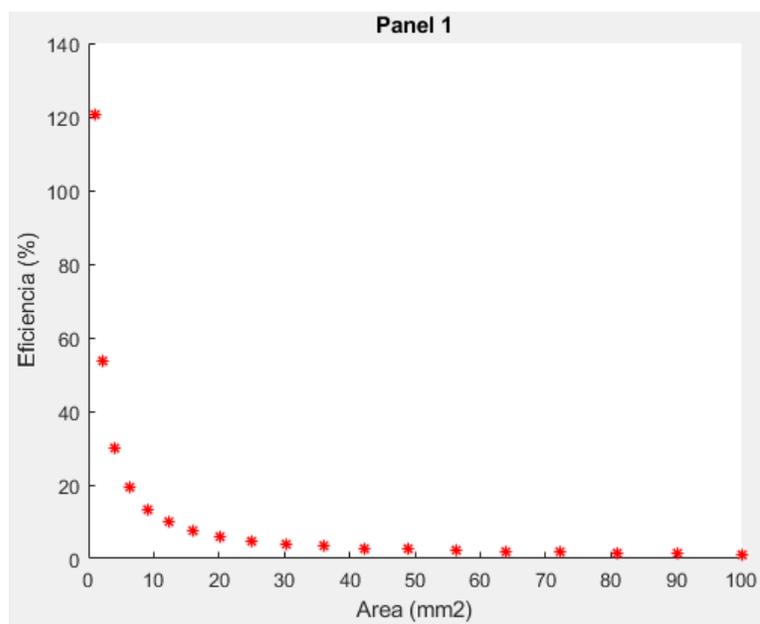
**Tabla 21**

*Valores de eficiencia para panel 1 y 4 respecto a variaciones de Área de la celda solar*

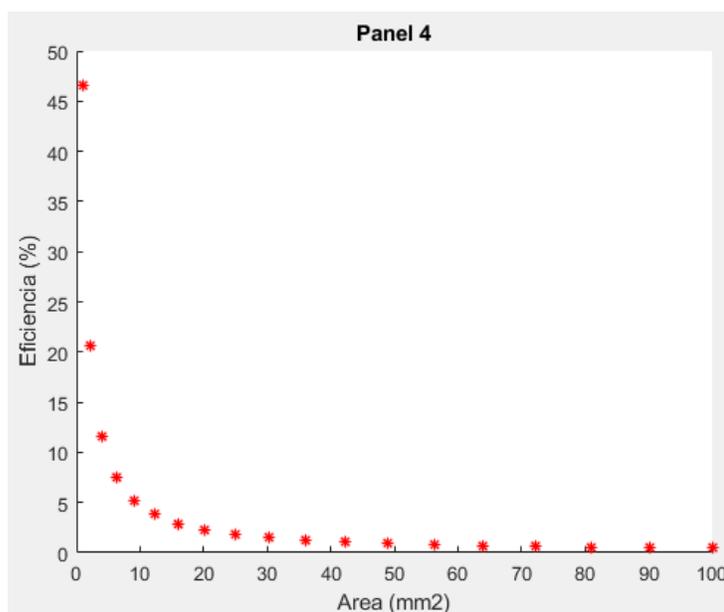
<i>Área (mm<sup>2</sup>)</i>	<i>Eficiencia</i>	
	<b>Panel 1</b>	<b>Panel 4</b>
<b>1</b>	120,6486 %	46,5032 %
<b>2,25</b>	53,6216 %	20,6681 %
<b>4</b>	30,1622 %	11,6258 %
<b>6,25</b>	19,3038 %	7,4405 %
<b>9</b>	13,4054 %	5,1670 %
<b>12,25</b>	9,8489 %	3,7962 %
<b>16</b>	7,5405 %	2,9064 %

CONTINÚA

<b>20,25</b>	5,9580 %	2,2965 %
<b>25</b>	4,8259 %	1,8601 %
<b>30,25</b>	3,9884 %	1,5373 %
<b>36</b>	3,3514 %	1,2918 %
<b>42,25</b>	2,8556 %	1,1007 %
<b>49</b>	2,4622 %	0,9490 %
<b>56,25</b>	2,1449 %	0,8267 %
<b>64</b>	1,8851 %	0,7266 %
<b>72,25</b>	1,6699 %	0,6436 %
<b>81</b>	1,4895 %	0,5741 %
<b>90,25</b>	1,3368 %	0,5153 %
<b>100</b>	1,2065 %	0,4650 %



CONTINÚA



**Figura 73** Eficiencia Panel 1 y Panel 4 con variaciones de área de celda solar

Se puede observar de la tabla y gráficas que mientras más pequeña sea la celda solar mayor será su eficiencia con los valores característicos medidos, sin embargo, valores de eficiencia superiores al 6% no tienen sentido en celdas solares de silicio amorfo (Deb, 1996). El valor de eficiencia comúnmente medido se encuentra en un rango de 4%-6% para este tipo de paneles solares lo cual nos ayuda a darnos una idea del área de las celdas para cada panel. Con esto podemos decir que el área de la celda solar del panel 1 debería ser  $\approx 25\text{mm}^2$  lo cual logra una eficiencia aproximada de 4,8259 % mientras que para el panel 4 el área de la celda debería ser  $\approx 9\text{mm}^2$  logrando una eficiencia aproximada de 5,1670 %.

## 5.2. MOVILIDAD EN CELDAS DE SILICIO AMORFO

Uno de los motivos principales de obtener la medida aproximada de la celda solar y la potencia de entrada es que estos valores son necesarios para la estimación de la movilidad de

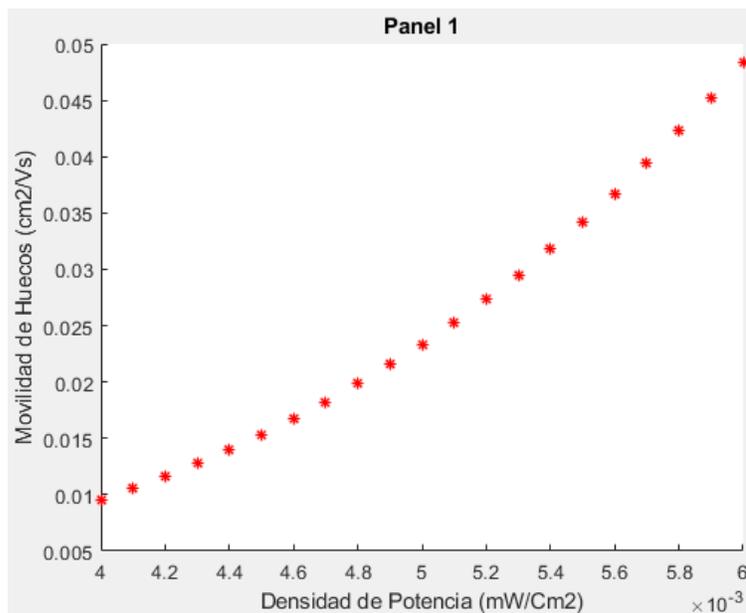
portadores de carga en la celda. Es importante recalcar que el método aplicado en este proyecto es únicamente una estimación, existen métodos empleados para la medición de portadores de carga aplicados directamente al semiconductor del que está compuesto la celda solar o realizando modificaciones la celda solar para permitir la medición como ocurre con el método de medición de movilidad por efecto Hall.

El método de aproximación propuesto permite la obtención de movilidad de huecos y electrones por separado. La ecuación ( 36 ) permite aproximar la movilidad de huecos, esta ecuación se encuentra en función de la densidad de potencia máxima de la celda y el voltaje de circuito abierto. Antes de proceder a los cálculos vale la pena mencionar que la movilidad de huecos para el silicio amorfo hidrogenado está en un rango de  $5 \times 10^{-1}$  a  $10^{-4} \text{ cm}^2 / \text{Vs}$  (Homma, Motohashi, Murayama, & Fukami, 1991). Y es este valor el que determina la baja eficiencia que presentan las celdas de silicio amorfo hidrogenado en comparación a las de silicio cristalino.

Para la celda 1 se estableció un área de  $5 \times 5 \text{ mm}^2$ , la densidad de potencia máxima se puede obtener dividiendo la potencia máxima para el área de la celda, como se muestra a continuación

$$dP_{Max} = \frac{P_{Max}}{\text{Área}} \quad (36)$$

Con estos valores, se creó un script en MATLAB que permite observar la variación de la movilidad de huecos en función de la densidad de potencia, Ya que no se conoce el valor exacto del área de la celda, se tomará valores próximos al elegido y se analizará los resultados.

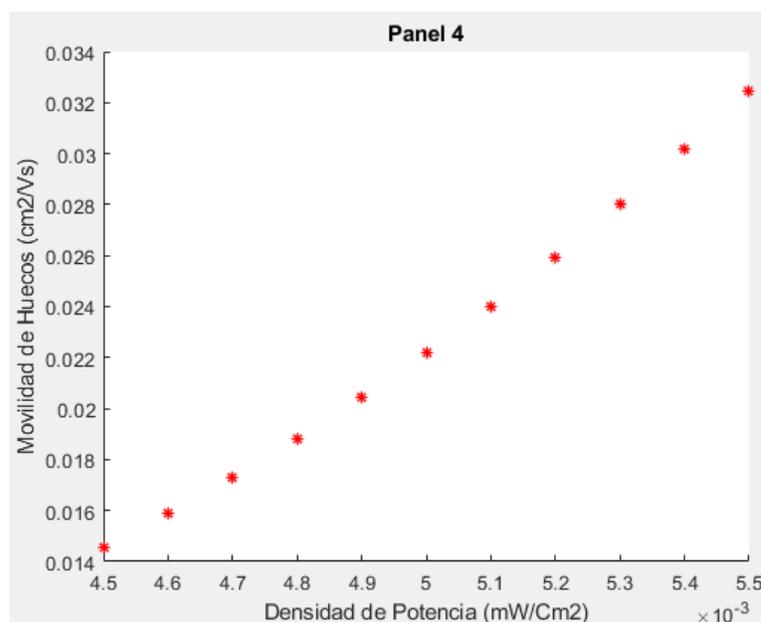


**Figura 74** Movilidad de huecos en función de la densidad de potencia panel 1

La densidad de potencia calculada se encuentra cercana al valor de  $0.0048 \text{ mW/cm}^2$  lo cual da un valor de movilidad de huecos de  $0.0198 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ .

La aproximación de movilidad de electrones contrario al caso de los huecos no depende de ningún valor que podamos obtener de la celda. Los valores del movimiento de electrones dependen únicamente de valores característicos del material que compone la celda solar y suele tener valores al rededor a  $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ . Los cuales a su vez se ven afectados por los cambios de temperatura en el material.

Repitiendo el procedimiento anterior, esta vez para el panel 4, La celda de este panel se estableció en  $3 \times 3 \text{ mm}^2$ . Con este valor, en MATLAB se obtiene un aproximado de la movilidad de huecos a partir de la densidad de potencia.



**Figura 75** Movilidad de huecos en función de la densidad de potencia panel 4

La densidad de potencia calculada se encuentra cercana al valor de  $0.00516 \text{ mW/cm}^2$  lo cual da un valor de movilidad de huecos de  $0.0251 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ . Al igual que en el caso anterior, como no se conoce el área real de la celda solar este valor es aproximado.

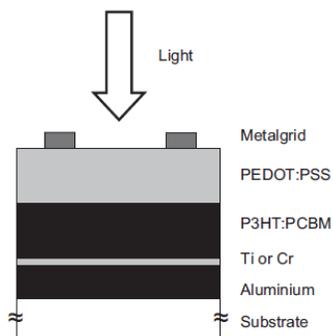
### 5.3. MOVILIDAD EN CELDAS DE POLIMERO SEMICONDUCTOR

A diferencia de las celdas basadas en silicio amorfo hidrogenado donde es importante conocer el movimiento de huecos para estudios de eficiencia, el estudio de movilidad de portadores de carga en polímeros es un tanto diferente. Para empezar, es importante el estudio de tiempo de vida ( $\tau$ ) y movilidad de portadores de carga ( $\mu$ ). La razón del estudio de estos parámetros se debe a que para aumentar la eficiencia en las celdas solares Orgánicas es necesario incrementar la proporción de portadores fotogenerados que logran alcanzar los contactos de la celda y para lograr esto es necesario maximizar la vida útil y movilidad de los portadores de carga de los materiales.

Para motivos prácticos CELIV se considera un método complementario de estudio ya que se puede aplicar directamente a estructuras de pila como son las celdas solares orgánicas (Hanfland et al., 2013), otros estudios como TOF (Time of Fly) son inaplicables directamente, lo mismo que ocurre en celdas solares de silicio amorfo. CELIV permite a los investigadores obtener un valor de movilidad de portadores de carga generados en equilibrio. Por lo general, los investigadores a menudo utilizan CELIV como método para medición de movilidad dentro de los dispositivos de investigación con el fin de registrar el desarrollo del dispositivo y del material (Juška et al., 2000).

Para el desarrollo de este proyecto, no se pudo obtener una celda solar orgánica para realizar pruebas, razón por la cual se tomara como punto de análisis los resultados propuestos en el trabajo de Hanfland (Hanfland et al., 2013) los cuales presentan resultados para una celda solar de heterojuntura en volumen Bulk y sus características se presentan en el trabajo de Zimmermann (Zimmermann, Würfel, & Niggemann, 2009).

El trabajo de Zimmermann presenta la celda solar orgánica basada en P3HT:PCBM que se presenta en la Figura 76. La razón de basarse en una celda presente en un trabajo es que se requiere algunos parámetros de la celda para poder aplicar las ecuaciones de CELIV como son el diámetro de la celda



**Figura 76** Celda solar con material Activo P3HT:PCBM

*Fuente: (Zimmermann 2009)*

Con el objetivo de obtener una curva que podamos analizar con mayor facilidad en el programa de LabVIEW propuesto ingresaremos los parámetros de la celda en el simulador GPVDM, el cual es un simulador de código abierto creado para para la comprensión de datos experimentales de dispositivos de película delgada como son por ejemplo células solares orgánicas, OFET, OLED, entre otros. Existe múltiples estudios desarrollados de la mano de este simulador (Singh, Chaudhary, Saxena, Saxena, & Rastogi, 2017)(Hima et al., 2018) por lo que los datos obtenidos de este los podemos considerar bastante acertados.

El trabajo de Zimmermann presenta el espesor para los componentes de la celda mostrados en la siguiente tabla

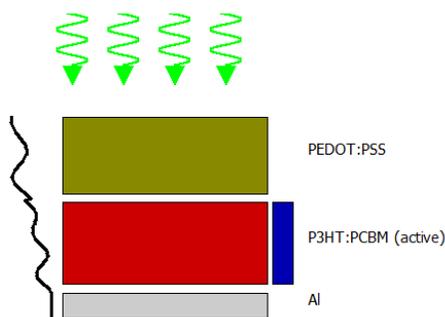
**Tabla 22**

*Espesor de los componentes de la celda solar propuesta por Zimmerman*

<b>Material</b>	<b>Espesor</b>
<b>PEDOT:PSS</b>	180nm
<b>P3HT:PCBM</b>	220nm
<b>Ti o Cr</b>	5–10nm
<b>Aluminio</b>	100nm

*Fuente: (Zimmerman, 2009)*

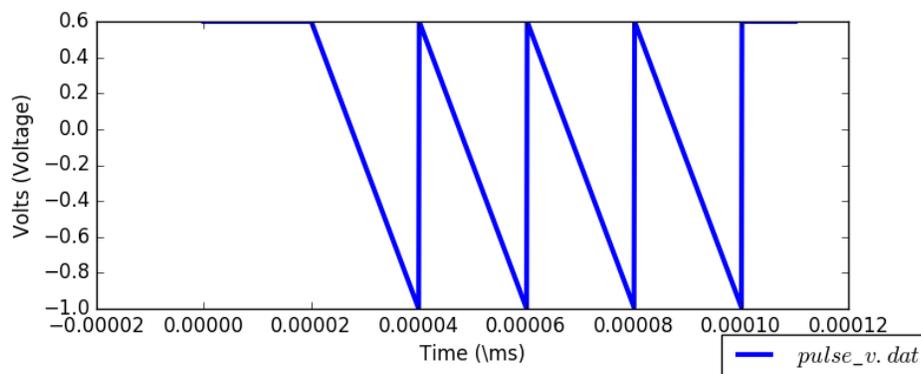
Estos valores se ingresan en el simulador con el fin de obtener la curva generada tras someter la celda al experimento CELIV. La celda con sus respectivos valores se presenta en la siguiente figura.



**Figura 77** Celda solar en GPVDM con material Activo P3HT:PCBM  
Fuente: (GPVDM)

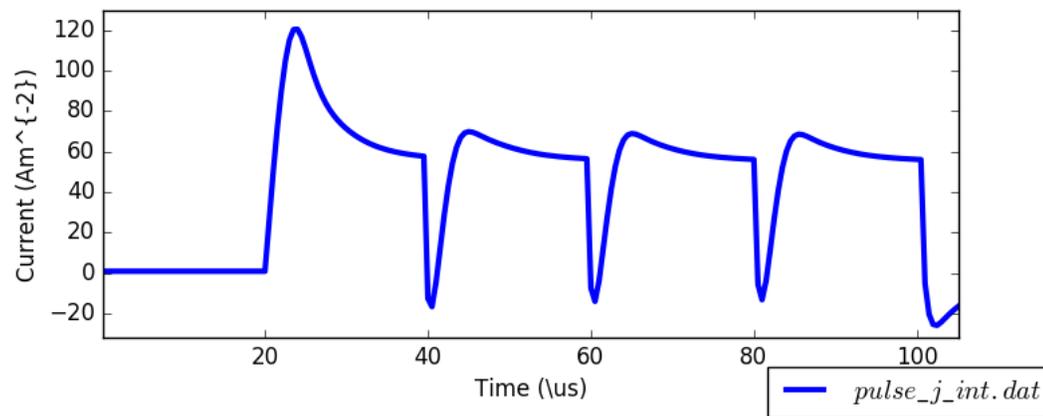
La razón de que no se incluyó el titanio o cromo en la celda solar del simulador es que en la tesis se explica que este elemento se incluyó únicamente para facilitar la unión entre el P3HT:PCBM con el aluminio, este no interfiere en el funcionamiento de la celda como tal.

Con los datos cargados lo único que hace falta es proceder a definir la señal que se ingresara a la celda solar. Zimmermann sugiere ingresar valores de voltaje entre  $-1V$  a  $-5V$  en la muestra. Si pudiéramos realizar el proceso completo estos valores se obtienen fácilmente con el generador presentado en el presente proyecto. Finalmente, la señal que se usara para la simulación corresponde a una rampa de  $0.6V$  a  $-1V$  a una frecuencia de  $50KHz$ , tal y como se usó en el trabajo de referencia, y se presenta en la siguiente figura.



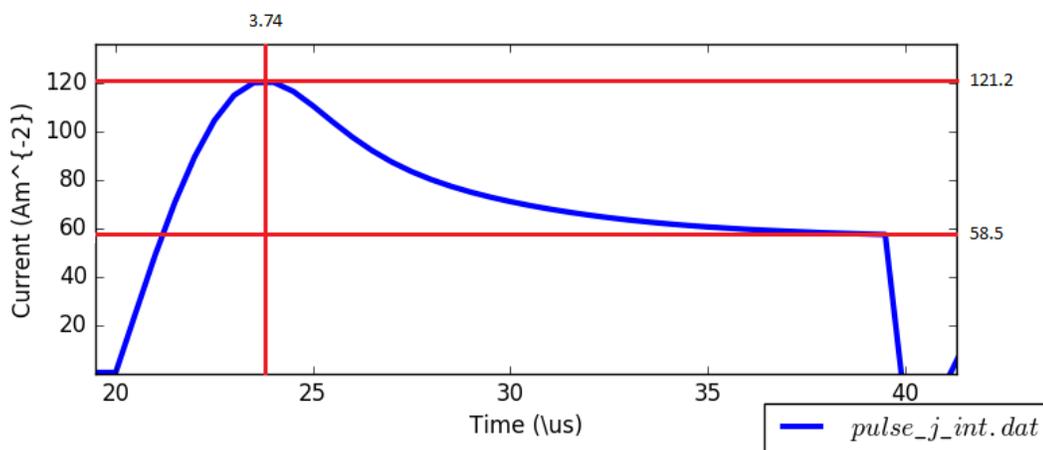
**Figura 78** Rampa de voltaje de 0.6 a -1V a 50KHz como entrada de CELIV

El resultado obtenido en el simulador se presenta en la siguiente figura. En este se muestra la densidad de corriente con respecto al tiempo. Desafortunadamente el simulador no entrega el valor de movilidad de portadores directamente, sin embargo, si permite obtener valores de la gráfica por lo que este valor se puede calcular mediante ecuaciones.



**Figura 79** Respuesta de la celda solar ante la rampa de voltaje

Partiendo de la ecuación ( 29 ) se calcula la movilidad de portadores basándose en la siguiente gráfica



**Figura 80** Medición CELIV en simulador GPVDM

$$\mu = K \frac{d^2}{A t_{max}^2 \left( 1 + 0.36 \frac{\Delta j}{j(0)} \right)}$$

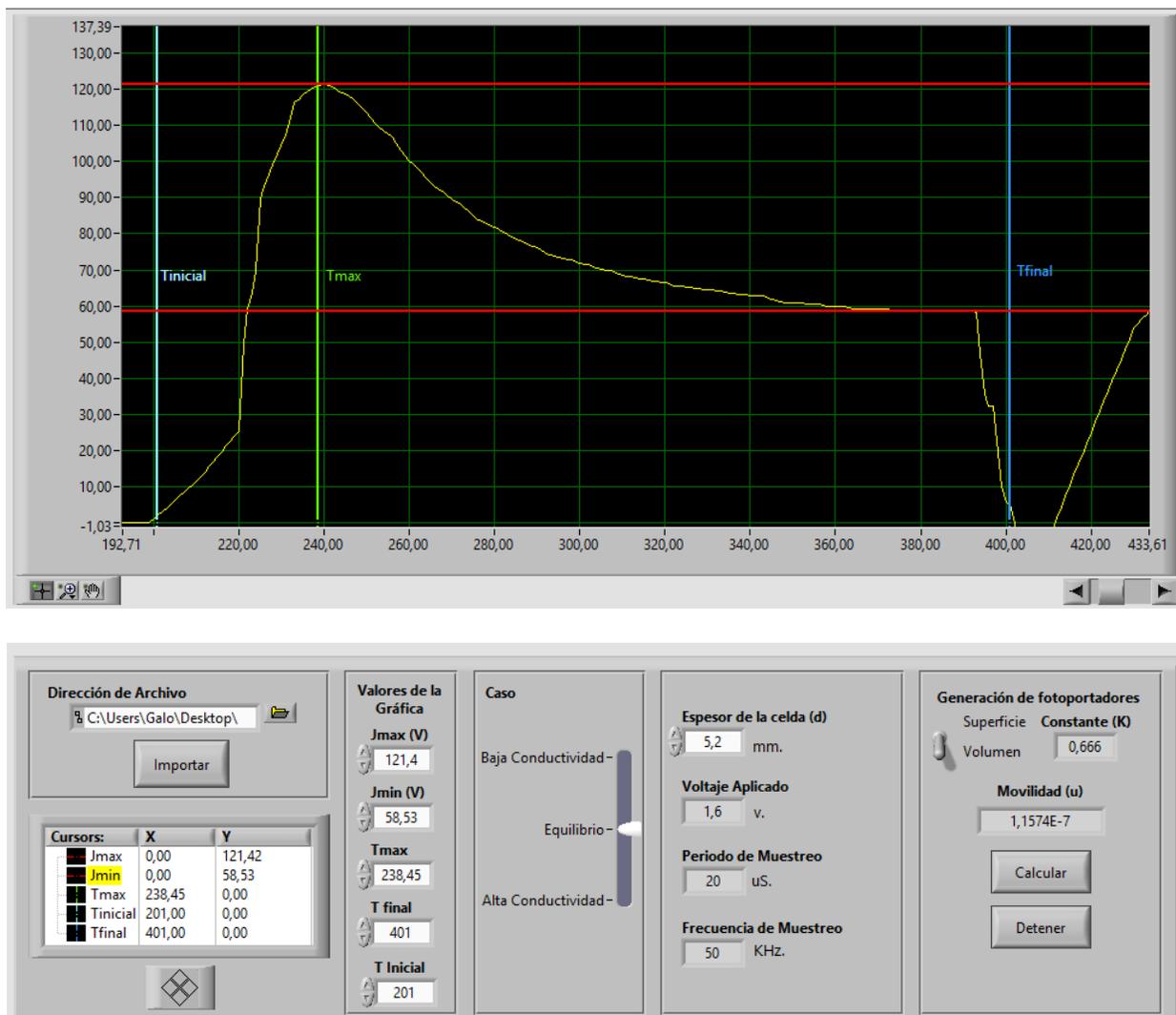
Reemplazando valores

$$\mu = \frac{2}{3} \frac{(5.2 \times 10^{-7})^2}{\frac{1.6}{20 \times 10^{-6}} \cdot 3.74 \times 10^{-6} \left( 1 + 0.36 \frac{121.2 - 58.5}{50.26} \right)}$$

$$\mu = 1.1624 \times 10^{-7} \frac{m^2}{Vs}$$

El valor obtenido en los trabajos de Hanfland (Hanfland et al., 2013) presentan un valor de  $1.1 m^2 V^{-1} s^{-1}$ . El valor obtenido es bastante cercano y la pequeña variación que presenta se debe a las características internas de la celda solar como pueden ser la densidad de trampas.

Realizando la medición de movilidad en el programa propuesto en LabVIEW se obtuvo un valor de  $1.1574 \times 10^{-7} m^2 V^{-1} s^{-1}$ . Como se puede observar en la siguiente figura. Existe un pequeño margen de error producido por el usuario, esto se debe a que tan cercano al valor real sea capaz de colocar el investigador. Sin embargo, el valor de error es mínimo considerando que la señal ingresada al programa es una aproximación de la curva medida en el simulador.



*Figura 81* Medición CELIV en LabVIEW

De estas mediciones podemos concluir que mientras se obtenga una buena medición de la respuesta de la celda al incremento lineal de voltaje la medición de la movilidad se puede realizar satisfactoriamente en el programa propuesto

## 5.4. RESULTADOS

### 5.4.1. CARACTERIZACIÓN DE CELDAS SOLARES

Los resultados obtenidos por el simulador solar y el sistema de medición de curva I-V funciona de acuerdo a lo esperado tomando en consideración las limitaciones mencionadas a lo largo del Proyecto.

Las mediciones de curvas obtenidas del simulador solar fueron contrastadas con las curvas aproximadas a partir de los valores característicos de la celda, el modelo matemático y mediciones tomadas con multímetro a partir de la lámpara Led como simulador solar.

**Tabla 23**

*Error de medición entre prototipo y multímetros para Panel 1*

<b>Voltaje</b>	<b>Corriente</b>	<b>Voltaje</b>	<b>Corriente</b>	<b>Error</b>	<b>Error</b>
<b>Multímetro</b>	<b>Multímetro</b>	<b>Prototipo</b>	<b>Prototipo</b>	<b>Voltaje</b>	<b>Corriente</b>
0	19,95	0	20	0,00%	0,25%
1,14	19,71	1,189	19,725	4,12%	0,08%
2,47	19,11	2,413	19,134	2,36%	0,13%
2,91	18,86	2,96	18,823	1,69%	0,20%
3,6	18,06	3,685	18,054	2,31%	0,03%
4,31	17,39	4,246	17,309	1,51%	0,47%
4,61	16,2	4,765	16,168	3,25%	0,20%
5,39	14,77	5,546	14,763	2,81%	0,05%
5,62	14,74	5,539	14,732	1,46%	0,05%
5,92	13,92	5,95	13,952	0,50%	0,23%
6,27	13,54	6,255	13,505	0,24%	0,26%
6,51	12,87	6,516	12,852	0,09%	0,14%

**CONTINÚA**

7,04	11,54	7,054	11,45	0,20%	0,79%
7,19	11,46	7,089	11,42	1,42%	0,35%
7,27	11,32	7,255	11,042	0,21%	2,52%
7,4	10,34	7,395	10,307	0,07%	0,32%
7,43	10,17	7,539	10,04	1,45%	1,29%
7,72	9,29	7,755	9,287	0,45%	0,03%
7,79	9,12	7,757	9,27	0,43%	1,62%
7,86	8,92	7,859	8,941	0,01%	0,23%
7,95	8,55	7,932	8,595	0,23%	0,52%
8,03	8,29	8,048	8,261	0,22%	0,35%
8,39	7,12	8,318	7,166	0,87%	0,64%
8,43	6,66	8,433	6,678	0,04%	0,27%
8,6	6,01	8,564	6,068	0,42%	0,96%
8,69	5,55	8,671	5,574	0,22%	0,43%
8,71	5,2	8,758	5,136	0,55%	1,25%
8,83	4,79	8,826	4,791	0,05%	0,02%
9,11	3,21	9,127	3,215	0,19%	0,16%
9,28	2,36	9,255	2,366	0,27%	0,25%
9,63	0	9,676	0	0,48%	0,00%

**Tabla 24***Error de medición entre prototipo y aproximación para Panel 1*

<b>Voltaje</b>	<b>Corriente</b>	<b>Voltaje</b>	<b>Corriente</b>	<b>Error</b>
<b>Prototipo</b>	<b>Prototipo</b>	<b>Aproximado</b>	<b>Aproximada</b>	<b>Corriente</b>
0	0,02	0	0,01973549	1,34%

**CONTINÚA**

0,01698571	0,019725	0,01698	0,01944637	1,43%
0,03447143	0,019134	0,03447	0,01894184	1,01%
0,04228571	0,018823	0,04228	0,01859646	1,22%
0,05264286	0,018054	0,05264	0,01797705	0,43%
0,06065714	0,017309	0,06065	0,01734022	0,18%
0,06807143	0,016168	0,06807	0,01660148	2,61%
0,07922857	0,014763	0,07922	0,01517534	2,72%
0,07912857	0,014732	0,07912	0,01518997	3,01%
0,085	0,013952	0,085	0,01426887	2,22%
0,08935714	0,013505	0,08935	0,01350582	0,01%
0,09308571	0,012852	0,09308	0,01279445	0,45%
0,10077143	0,01145	0,10077	0,01115791	2,62%
0,10127143	0,01142	0,10127	0,01104352	3,41%
0,10364286	0,011042	0,10364	0,01048798	5,28%
0,10564286	0,010307	0,10564	0,01000212	3,05%
0,1077	0,01004	0,10769	0,00948796	5,82%
0,11078571	0,009287	0,11078	0,00868227	6,97%
0,11081429	0,00927	0,11081	0,00867427	6,87%
0,11227143	0,008941	0,11227	0,00828068	7,97%
0,11331429	0,008595	0,11331	0,00799537	7,50%
0,11497143	0,008261	0,11497	0,00753149	9,69%
0,11882857	0,007166	0,11882	0,006416	11,69%
0,12047143	0,006678	0,12047	0,00592122	12,78%
0,12234286	0,006068	0,12234	0,00534856	13,45%
0,12387143	0,005574	0,12387	0,00487071	14,44%

**CONTINÚA**

0,12511429	0,005136	0,12511	0,00447736	14,71%
0,12608571	0,004791	0,12608	0,00416591	15,00%
0,13038571	0,003215	0,13038	0,00274634	17,06%
0,13221429	0,002366	0,13221	0,00212335	11,43%
0,13822857	0	0,13822	-0,03106518	100,00%

Lo primero que podemos observar es que los valores medidos entre la celda solar mediante el prototipo propuesto en este proyecto y las mediciones con multímetro no superan el 5% de error en ningún punto ni para la medición de corriente ni de voltaje, esto corrobora la correcta medición por parte del prototipo propuesto y el estado actual de las celdas solares.

En cuanto a la comparación de la primera celda solar con el prototipo y el modelo matemático de la celda se puede observar un error menor al 5% para toda la etapa antes del punto de máxima potencia, sin embargo, el superar este umbral el error se vuelve más grande conforme el valor se acerca más al voltaje de circuito abierto, donde los valores se vuelven más variables conforme la corriente llega a cero, llegando a valores particularmente altos en los puntos más próximos al voltaje máximo.

**Tabla 25**

*Error de medición entre prototipo y multímetros para Panel 4*

<b>Voltaje</b>	<b>Corriente</b>	<b>Voltaje</b>	<b>Corriente</b>	<b>Error</b>	<b>Error</b>
<b>Multímetro</b>	<b>Multímetro</b>	<b>Prototipo</b>	<b>Prototipo</b>	<b>Voltaje</b>	<b>Corriente</b>
0	5,16	0	5,2	0,00%	0,77%
0,16	5,13	0,157	5,148	1,91%	0,35%
0,52	5,07	0,5	5,071	4,00%	0,02%
0,66	5,05	0,644	5,056	2,48%	0,12%

**CONTINÚA**

0,9	5,09	0,895	5,128	0,56%	0,74%
1,14	5,05	1,149	5,051	0,78%	0,02%
1,4	5,01	1,374	5,018	1,89%	0,16%
1,62	5,01	1,661	5,009	2,47%	0,02%
1,81	4,98	1,856	4,982	2,48%	0,04%
2	4,92	2,081	4,919	3,89%	0,02%
2,21	4,95	2,293	4,953	3,62%	0,06%
2,48	4,9	2,544	4,902	2,52%	0,04%
2,87	4,87	2,801	4,871	2,46%	0,02%
3,04	4,84	3,016	4,829	0,80%	0,23%
3,12	4,79	3,191	4,782	2,23%	0,17%
3,46	4,61	3,437	4,732	0,67%	2,58%
3,59	4,51	3,573	4,603	0,48%	2,02%
3,79	4,48	3,737	4,474	1,42%	0,13%
3,83	4,37	3,819	4,385	0,29%	0,34%
3,9	4,26	3,9	4,284	0,00%	0,56%
4,04	4,12	4,013	4,159	0,67%	0,94%
4,19	4,02	4,112	4,044	1,90%	0,59%
4,39	3,73	4,339	3,722	1,18%	0,21%
4,45	3,44	4,479	3,405	0,65%	1,03%
4,64	3,02	4,615	3,11	0,54%	2,89%
4,67	2,9	4,663	2,862	0,15%	1,33%
4,75	2,65	4,747	2,666	0,06%	0,60%
4,8	2,49	4,798	2,492	0,04%	0,08%
4,89	1,67	4,957	1,692	1,35%	1,30%

**CONTINÚA**

5,02	1,21	5,035	1,294	0,30%	6,49%
5,05	0,97	5,074	0,924	0,47%	4,98%
5,11	0	5,102	0	0,16%	0,00%

**Tabla 26***Error de medición entre prototipo y aproximación para Panel 4*

<b>Voltaje</b>	<b>Corriente</b>	<b>Voltaje</b>	<b>Corriente</b>	<b>Error</b>
<b>Prototipo</b>	<b>Prototipo</b>	<b>Aproximado</b>	<b>Aproximada</b>	<b>Corriente</b>
<b>0,00000</b>	0,0052	0	0,00518698	0,25
<b>0,00436</b>	0,005148	0,00436	0,00518546	0,72
<b>0,02486</b>	0,005128	0,02486	0,0051678	0,77
<b>0,01389</b>	0,005071	0,01388	0,00517897	2,08
<b>0,01789</b>	0,005056	0,01788	0,00517544	2,31
<b>0,03192</b>	0,005051	0,03191	0,00515766	2,07
<b>0,03817</b>	0,005018	0,03816	0,00514601	2,49
<b>0,04614</b>	0,005009	0,04613	0,00512635	2,29
<b>0,05156</b>	0,004982	0,05155	0,005109	2,49
<b>0,06369</b>	0,004953	0,06369	0,00505354	1,99
<b>0,05781</b>	0,004919	0,0578	0,00508378	3,24
<b>0,07067</b>	0,004902	0,07066	0,00500721	2,10
<b>0,07781</b>	0,004871	0,0778	0,00494404	1,48
<b>0,08378</b>	0,004829	0,08377	0,004875	0,94
<b>0,08864</b>	0,004782	0,08863	0,00480461	0,47
<b>0,09547</b>	0,004732	0,09547	0,00467727	1,17
<b>0,09925</b>	0,004603	0,09925	0,0045888	0,31
<b>0,10381</b>	0,004474	0,1038	0,00446035	0,31

**CONTINÚA**

<b>0,10608</b>	0,004385	0,10608	0,00438515	0,00
<b>0,10833</b>	0,004284	0,10833	0,00430258	0,43
<b>0,11147</b>	0,004159	0,11147	0,00417129	0,29
<b>0,11422</b>	0,004044	0,11422	0,00403819	0,14
<b>0,12053</b>	0,003722	0,12052	0,00364991	1,98
<b>0,12442</b>	0,003405	0,12441	0,00333087	2,23
<b>0,12819</b>	0,00311	0,12819	0,00293609	5,92
<b>0,12953</b>	0,002862	0,12952	0,00277083	3,29
<b>0,13186</b>	0,002666	0,13186	0,00243641	9,42
<b>0,13328</b>	0,002492	0,13327	0,00220159	13,19
<b>0,13769</b>	0,001692	0,13769	0,00121507	39,25
<b>0,13986</b>	0,001294	0,13986	0,0004886	164,84
<b>0,14094</b>	0,000924	0,14094	9,6256E-06	9499,42
<b>0,14172</b>	0	0,14094	9,6256E-06	100,00

En cuanto a la celda 4 ocurre lo mismo que en el caso de la celda 1 entre los valores medidos por el prototipo y las mediciones con multímetro. De igual forma, los valores antes del punto de máxima entre las mediciones del prototipo y el modelo matemático no superan el 5% de error antes del punto de máxima potencia y una vez se atraviesa el punto el error se torna máximo conforme el valore se aproxima más al voltaje de circuito abierto. Si comparamos la celda 1 y la celda 4 podemos decir que ambas mantienen un error muy bajo en la etapa de trabajo, es decir antes del punto de máxima potencia y el error en la etapa transitoria aumenta conforme se acerca más al punto de voltaje máximo.

Una de las razones de la diferencia entre los porcentajes de error en la etapa transitoria es el uso de la celda solar. Es importante recordar que la celda 1,2 y 3 llevaban tiempo de ser utilizadas

razón por la que presentan cierto nivel de desgaste. Es muy complicado conocer el nivel exacto de desgaste sin conocer los valores de fábrica. Es posible que el valor original de  $V_{OC}$  de los paneles fuese superior a los 9.6V que presentan a la fecha, como podría haber sido 10V, por ejemplo, y debido a la exposición a luz solar y el desgaste este valor disminuyó.

El simulador solar propuesto para el prototipo funciona de forma adecuada para el desarrollo del proyecto, sin embargo, es importante tener en cuenta un par de condiciones que se debe cumplir en el simulador en caso de que se planea usar el prototipo como simuladores solares para pruebas de rendimiento eléctrico de dispositivos fotovoltaicos. Para esto, es necesario que el simulador solar cumpla los parámetros establecidos por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) en el estándar ASTM E927-19 donde se establecen valores, métodos y procedimientos estándar tanto para el generador solar como para el equipo de medición. Al momento de cumplir estos estándares los equipos y simulador se pueden certificar para pruebas de dispositivos fotovoltaicos. Otra norma a tener en cuenta, específicamente para el simulador solar, es la norma IEC 60904-9 Ed. 2.0. en la que se establece el tipo de simulador solar de acuerdo a sus características, como se muestra en la siguiente tabla. Para que un simulador solar este considerado dentro del estándar del ASTM debería estar en el rango A de la norma IEC.(Commission, 2007)(Materials, 2012)

**Tabla 27**

*Clasificación de simulador solar de acuerdo a IEC 60904-9*

Clase	Coincidencia espectral	La falta de homogeneidad de la irradiancia	Inestabilidad temporal	
			A largo plazo	A corto Plazo
A	0.75-1.25%	2%	0.5%	2%

CONTINÚA

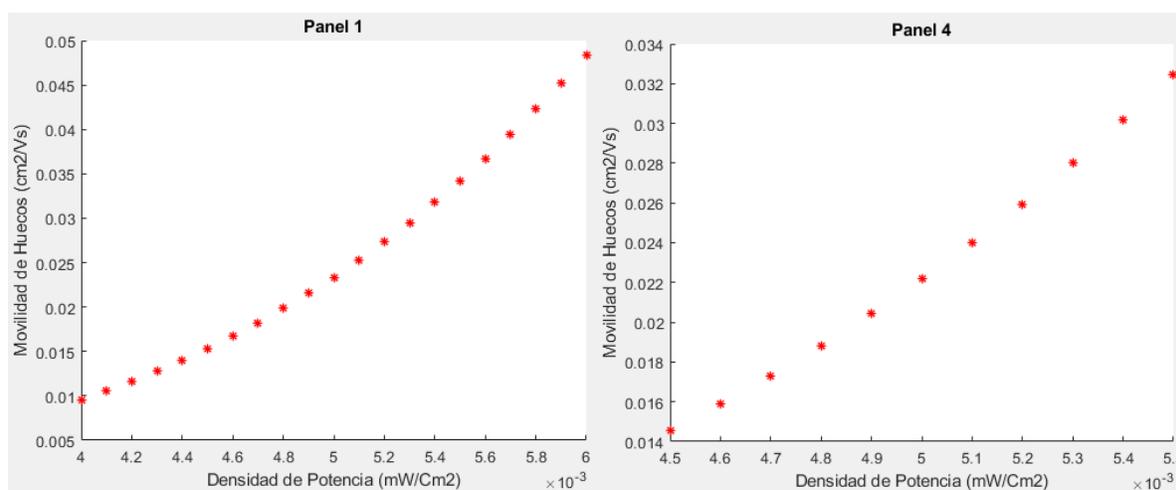
<b>B</b>	0.6-1.4%	5%	2%	5%
<b>C</b>	0.4-2.0%	10%	10%	10%

Fuente: (Honsberg & Bowden, 2014)

Hablando de los estándares para equipos de medición, vale la pena mencionar que implementar un equipo de este tipo no es económico, por ejemplo un simulador solar de arco con lámpara de xenón está rondando entre los 5000-30000 dólares (Yuanyao, 2015), y al trabajar en un proyecto de esta índole es imposible no elevar costos y tener equipos con características estandarizadas, sin embargo, se trató de conseguir las mejores características posibles con los equipos disponibles.

## 5.5. MOVILIDAD EN SILICIO AMORFO

La movilidad de portadores de carga en el silicio amorfo se vio limitada a la movilidad de huecos, esto debido a que el cálculo de movilidad de electrones está limitado estrictamente por características propias del material y no se ve afectada por ningún valor que podamos medir directamente de la celda solar.



**Figura 82** Medición CELIV en LabVIEW

La medición de movilidad de huecos en las celdas solares basadas en silicio ayuda al investigador a conocer las limitaciones en cuanto a eficiencia de las celdas solares. Es importante tener en cuenta que no bastaría únicamente con incrementar la movilidad para mejorar la eficiencia, sino que es un proceso que engloba muchas mejoras a la tecnología.

En base a la figura se puede hacer una idea de la movilidad de huecos en función de la densidad de potencia. Cabe recalcar aquí que no tiene sentido hablar de un incremento de la densidad de potencia superior a la obtenida en condiciones de medición estándar, es decir,  $1000\text{KW}/h$  ya que en teoría las celdas funcionando con luz solar no deberían poder superar este valor. Valores inferiores en cambio se darían a lo largo del día dependiendo de la incidencia de la luz solar sobre el panel, así como de las condiciones climáticas.

En cuanto a valores se refiere, los resultados obtenidos de la estimación de movilidad de huecos corresponden a los valores presentados en el trabajo de E.A. Schiff (Schiff, 2008) y a los valores esperados para este tipo de celdas. Es complicado intentar obtener más características de movilidad para estas celdas sin el uso de un sistema específico para su medición y sin muestras apropiadas, sin embargo, la estimación se encuentra bastante acertada de acuerdo a los trabajos en los que se basó el proyecto.

## **5.6. MOVILIDAD EN CELDA ORGÁNICA**

Si bien este trabajo incluyó un método de estimación para celdas de silicio amorfo hidrogenado la idea principal era centrarse en el análisis de movilidad a partir del método CELIV, al no ser este aplicable para los paneles ni celdas de silicio directamente se buscó alternativas que puedan ayudar a los investigadores a obtener este parámetro de las celdas.

Las pruebas en celdas solares orgánicas debieron ser reemplazadas por una simulación de la respuesta de la celda solar respecto a un incremento lineal de voltaje debido a la carencia de celdas solares orgánicas. A pesar de este inconveniente, es factible decir que con los equipos con que se dispone en los laboratorios del CICTE cuentan con todos los requisitos necesarios para llevar a cabo la medición de movilidad de portadores mediante este método.

Los valores obtenidos mediante cálculo matemático de movilidad y los medidos por el programa propuesto en LabVIEW se encuentran acordes a valores esperados en el trabajo que se utilizó como base de análisis, estamos hablando de un valor de error inferior al 1% entre los valores que encontramos mediante el simulador para celdas solares y el valor obtenido. Y a su vez, estos valores se encuentran acorde a los obtenidos por Hanfland (Hanfland et al., 2013) en su trabajo.

**Tabla 28**

*Valores calculados y medidos en la simulación mediante CELIV*

Valor calculado	Valor medido	Error
$1.1624 \times 10^{-7}$	$1.1574 \times 10^{-7}$	0,43%

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

#### 6.1. CONCLUSIONES

Mediante el desarrollo del presente proyecto se logró caracterizar, mediante curvas I-V y movilidad de portadores de carga, celdas solares de película delgada. El diseño de algoritmos para la caracterización y medición de movilidad de celdas solares en LabVIEW se realizó en base a las mediciones de la curva I-V para la obtención de las características de la celda y a al método CELIV para la obtención de movilidad de portadores de carga.

La medición de la Curva I-V es la forma más común y practica de obtener las características de una celda solar ya sea esta orgánica o inorgánica. Los equipos pensados para esta medición se encuentran debidamente normados y estandarizados, en base a esto, se tomó la mayor parte de consideraciones para el diseño del sistema y se consiguió un diseño de baja potencia para la medición de curva I-V capaz de cumplir con los requisitos de funcionamiento para la toma de datos y obtener valores acordes a lo esperado.

La adquisición y presentación de datos del proyecto se dividió en tres ventanas de usuario. La primera para la medición y presentación de la Curva I-V de las celdas solares, la segunda para la toma de datos de la celda solar orgánica tras someterla a un incremento lineal de voltaje y la tercera para obtener los valores necesarios para el cálculo de la movilidad de portadores de carga. Las ventanas de usuario fueron diseñaron de tal manera que su uso fuera sencillo y simple para el usuario.

Las mediciones realizadas por el sistema para la caracterización de celdas propuesto presentan un bajo nivel de error en comparación a las mediciones tomadas por multímetros

teniendo un error inferior al 2.52% para corriente y 4.12% para voltaje en la celda 1, mientras que para la celda 4 el error en la medición 4% para corriente y 6.49% para voltaje. En cuanto a los errores obtenidos entre las mediciones del prototipo y los valores de la curva de funcionamiento aproximado tenemos que para la celda 1 es 3.01% antes del punto de máxima potencia y llega hasta un 17.06% una vez atravesado este valor, mientras que, para la celda 4 el error es 3.24% antes del punto de máxima potencia y alcanza un 13.19% una vez pasa del punto de máxima potencia.

El trabajar con paneles solares y no con celdas solares directamente dificultó la medición de eficiencia, sin embargo, tomando en consideración valores teóricos y trabajos comparativos fue factible una aproximación de la eficiencia de las celdas de tal forma que los valores obtenidos se encuentren en rangos aceptables y permitan la deducción de otros datos característicos de la celda a partir de este valor. De igual forma ocurrió con la movilidad en celdas inorgánicas, la cual al igual que la eficiencia, se mide directamente en las celdas. Al no contar con un método para poder realizar las mediciones en estas celdas se propuso un método para la aproximación de valores basado en los trabajos de E.A. Schiff.

Para las celdas solares de silicio amorfo los métodos más comúnmente utilizados para medición de movilidad son TOF y movilidad de Hall los cuales requieren realizar modificaciones a la estructura de la celda solar. En cuando a las celdas orgánicas, el método CELIV está pensado para trabajarse directamente sobre celdas solares por lo que no requiere ninguna modificación de la celda.

A lo largo de todo el proyecto se ha venido verificando los resultados obtenidos con trabajos comparativos. Desde la utilización de métodos adicionales de aproximación para las Curvas I-V, métodos para aproximación de movilidad y valores característicos, se buscó obtener todos los

resultados lo más acorde a la realidad con el fin de demostrar la funcionalidad y viabilidad del sistema y programas propuestos.

## **6.2. RECOMENDACIONES**

El método para determinar la potencia incidente del simulador solar en la celda no varía, aunque el investigador utilice celdas redondas y no rectangulares. La razón de esto es que los cálculos están realizados en función de la forma en la que el simulador solar emite la luz y no en función de la forma de la celda solar.

El banco de resistencia propuesto en el proyecto funciona de forma adecuada para las celdas utilizadas, sin embargo, lo más adecuado para pruebas con celdas solares de respuesta desconocida es armar un banco de resistencias variable con incrementos pequeños y lineales como podrían ser incrementos de  $50\Omega$  por ejemplo.

Cuando se trabaja con paneles solares el fabricante proporciona datos de las celdas solares característicos, como suelen ser: potencia máxima, corriente de cortocircuito y voltaje de circuito abierto. Valores que se pueden aplicar para obtener directamente una curva aproximada a partir del modelo matemático para usarse como punto de comparación con las mediciones

Es importante tener cuidado con la altura a la que se coloca el simulador solar con respecto a las celdas o paneles solares con el fin de evitar daños. En el desarrollo del proyecto se especificó el método para encontrar la altura adecuada a la cual se debe colocar el simulador solar y este valor debe ser respetado. De igual forma es importante colocar la lámpara Led paralela a la celda solar con el fin de no distorsionar los datos de medición.

### 6.3. TRABAJO FUTURO

Existe una gran cantidad de trabajo a futuro en base al prototipo y programas presentados para caracterización de celda solar y medición de movilidad de portadores de carga, todos enfocados al estudio, análisis y desarrollo de celdas solares orgánicas e inorgánicas. El prototipo propuesto busca dar la apertura en los laboratorios del CENCINAT en apoyo con el CICTE para el estudio y diseño de nuevas tecnologías basadas en celdas solares orgánicas.

En cuando al simulador solar y medidor de curva I-V, una buena alternativa para continuar con el estudio es la inclusión de luz Led de colores en lugar de luz blanca para el simulador solar, esto con el propósito específico de análisis y pruebas con celdas solares Multiunion. Este tipo de celdas solares están conformadas por la unión de celdas que reaccionan a diferentes longitudes de onda (Fernández, 2012), razón por la que al trabajar con luz de diferente color, como podrían ser por ejemplo lámparas LED-RGB, se podría tener un estudio más detallado y práctico para este tipo de celdas solares. De forma adicional, en caso de conseguir lámparas de Xenón, por ejemplo, se podría intentar que el simulador solar este más acorde al estándar ASTM E927-19 permitiendo realizar mediciones aceptadas para cualquier investigación a nivel mundial.

El equipo para medición de CELIV es una buena base para continuar con el desarrollo de tecnología basada en medición de movilidad de portadores, como es por ejemplo Photo-CELIV. La diferencia principal entre el CELIV clásico y Photo-CELIV es la fuente a la que se somete la muestra. En lugar de someterse a un incremento lineal de voltaje como ocurre con CELIV, la celda solar se somete a una variación de un pulso corto de luz provocado por un láser (Stephen, 2016). Las ventajas principales que presenta esta variación es que se puede aplicar para la medición de

movilidad en cualquier dispositivo de baja movilidad de portadores, esto incluye por ejemplo a las celdas solares de silicio amorfo hidrogenado(Chen et al., 2011).

## ANEXOS

**Tabla 29***Mediciones Panel 1 día 1, 2 y 3*

Día 1		Día 2		Día 3	
Corriente	Voltaje	Corriente	Voltaje	Corriente	Voltaje
0	20,1	0	20	0	20,1
1,142	19,343	1,228	19,927	1,119	19,177
2,857	17,526	2,929	18,711	2,81	17,311
2,747	17,713	2,916	18,711	2,72	17,384
3,476	16,805	3,704	17,661	4,025	15,819
4,066	16,004	4,272	16,891	4,04	15,857
4,689	15,247	4,817	16,001	4,593	15,056
5,099	14,65	5,359	15,073	5,058	14,344
5,948	13,095	5,747	14,301	5,502	13,738
6,205	12,549	6,113	13,527	5,848	13,031
6,548	11,797	6,434	12,816	6,188	12,479
6,704	11,357	6,665	12,219	6,446	11,861
7,205	10,11	6,91	11,611	6,675	11,292
7,226	10,093	7,267	10,557	7,075	10,287
7,34	9,653	7,24	10,501	7,069	10,303
7,665	8,649	7,456	9,968	7,264	9,74
7,672	8,659	7,572	9,541	7,4	9,357
7,654	8,635	7,733	9,145	7,631	8,66
7,762	8,358	7,786	8,852	7,606	8,683
7,901	7,954	7,897	8,5	7,753	8,344
<b>CONTINÚA</b>					

7,944	7,808	8	8,184	7,819	7,982
8,199	7,017	8,076	7,889	7,878	7,696
8,389	6,39	8,335	6,97	8,087	6,944
8,521	5,846	8,472	6,447	8,302	6,323
8,651	5,398	8,605	5,889	8,444	5,787
8,764	5,02	8,733	5,415	8,571	5,302
8,835	4,661	8,826	4,958	8,679	4,947
9,177	3,171	8,894	4,649	8,73	4,555
9,325	2,448	9,178	3,099	9,08	3,035
9,488	1,775	9,317	2,373	9,238	2,335
9,7	0	9,6	0	9,63	0

**Tabla 30***Mediciones Panel 2 día 1, 2 y 3*

Día 1		Día 2		Día 3	
Corriente	Voltaje	Corriente	Voltaje	Corriente	Voltaje
0	19,879	0	19,489	0	19,798
1,208	19,611	1,216	19,017	1,29	19,314
1,966	19,151	2,666	17,923	1,997	19,03
2,709	18,899	2,697	17,954	2,928	18,574
3,51	18,168	3,342	17,443	3,52	18,397
3,981	17,572	4,071	16,68	4,264	17,734
4,632	17,008	4,636	15,919	5,051	16,46
5,345	15,973	5,15	15,289	5,766	15,395
5,642	15,556	5,403	14,92	5,677	15,572
6,108	14,677	5,853	14,152	6,198	14,613

**CONTINÚA**

6,439	14,31	6,226	13,582	6,5	13,981
6,739	13,492	6,516	13,053	6,734	13,553
7,091	12,86	7,224	11,588	7,54	11,79
7,536	11,731	7,23	11,527	7,66	11,632
7,514	11,633	7,231	11,354	7,571	11,7
7,741	11,101	7,494	10,802	7,774	11,142
7,904	10,726	7,616	10,436	7,921	10,763
7,991	10,256	7,773	9,972	8,177	9,903
8,114	9,924	7,851	9,607	8,155	9,816
8,215	9,572	8,008	9,318	8,21	9,588
8,326	9,18	8,072	8,936	8,336	9,224
8,436	8,652	8,22	8,503	8,48	8,822
8,623	7,842	8,432	7,689	8,633	7,892
8,788	7,115	8,588	6,968	8,814	7,132
8,867	6,414	8,749	6,293	8,925	6,396
9,032	5,889	8,815	5,789	9,024	5,707
9,086	5,372	8,923	5,296	9,113	5,395
9,105	5,037	8,964	4,956	9,16	5,076
9,324	3,372	9,212	3,312	9,381	3,38
9,419	2,504	9,317	2,493	9,479	2,521
9,614	0	9,569	0	9,689	0

**Tabla 31***Mediciones Panel 3 día 1, 2 y 3*

Día 1		Día 2		Día 3	
Corriente	Voltaje	Corriente	Voltaje	Corriente	Voltaje
0	19,89	0	20,104	0	20,189
1,157	19,553	1,324	20,054	1,441	20,164
2,555	18,794	2,132	19,879	2,233	19,952
2,759	18,549	2,852	19,597	2,95	19,794
3,392	18,166	4,304	18,64	3,756	19,408
3,975	17,62	4,271	18,475	4,369	18,857
4,77	16,934	4,908	17,943	4,952	17,97
5,375	16,041	5,891	16,576	5,602	17,157
5,773	15,572	6,094	16,254	6,063	16,663
6,236	15,087	6,479	15,789	6,528	15,906
6,619	14,596	6,858	15,053	6,9	15,165
6,964	14,016	7,188	14,534	7,264	14,514
7,287	13,406	7,538	13,673	7,604	13,747
7,905	12,26	8,019	12,559	8,026	12,589
7,867	12,206	8,011	12,578	8,05	12,528
8,164	11,416	8,218	11,936	8,281	11,733
8,208	11,3	8,356	11,414	8,422	11,388
8,453	10,414	8,493	10,825	8,473	10,915
8,499	10,328	8,574	10,442	8,615	10,4
8,587	9,993	8,663	10,074	8,662	10,086
8,659	9,594	8,747	9,681	8,731	9,661
8,739	9,182	8,801	9,283	8,782	9,217

**CONTINÚA**

8,958	8,125	9,008	8,125	8,974	8,03
9,057	7,335	9,104	7,375	9,062	7,445
9,191	6,601	9,189	6,593	9,144	6,556
9,237	6,066	9,257	6,066	9,217	6,005
9,342	5,165	9,301	5,506	9,269	5,405
9,329	5,157	9,328	5,174	9,268	5,14
9,499	3,436	9,48	3,427	9,437	3,409
9,574	2,538	9,554	2,549	9,5	2,51
9,643	0	9,6	0	9,545	0

**Tabla 32***Mediciones Panel 4 día 1, 2 y 3*

Día 1		Día 2		Día 3	
Corriente	Voltaje	Corriente	Voltaje	Corriente	Voltaje
0	5,2	0	5,216	0	5,216
0,157	5,148	0,213	5,126	0,126	5,126
0,5	5,071	0,548	5,09	0,489	5,09
0,644	5,056	0,7	5,048	0,689	5,048
0,895	5,128	0,845	5,047	0,784	5,047
1,149	5,051	1,126	5,051	1,125	5,051
1,374	5,018	1,354	5,007	1,336	5,007
1,661	5,009	1,598	5,017	1,624	5,017
1,856	4,982	1,846	4,993	1,847	4,993
2,081	4,919	2,078	4,948	2,147	4,948
2,293	4,953	2,311	4,962	2,411	4,962

CONTINÚA

2,544	4,902	2,574	4,904	2,554	4,904
2,801	4,871	2,945	4,896	3,005	4,896
3,016	4,829	3,014	4,856	3,045	4,856
3,191	4,782	3,198	4,758	3,221	4,758
3,437	4,732	3,547	4,739	3,458	4,739
3,573	4,603	3,611	4,6	3,548	4,6
3,737	4,474	3,789	4,398	3,745	4,398
3,819	4,385	3,845	4,386	3,81	4,386
3,9	4,284	3,985	4,215	4	4,215
4,013	4,159	4,015	4,098	4,048	4,098
4,112	4,044	4,215	4,028	4,214	4,028
4,339	3,722	4,369	3,657	4,398	3,657
4,479	3,405	4,49	3,418	4,587	3,418
4,615	3,11	4,741	3,087	4,714	3,087
4,663	2,862	4,706	2,9	4,726	2,9
4,747	2,666	4,774	2,754	4,752	2,754
4,798	2,492	4,759	2,468	4,774	2,468
4,957	1,692	4,98	1,687	4,987	1,687
5,035	1,294	5,026	1,312	5,014	1,312
5,074	0,924	5,06	0,911	5,032	0,911
5,102	0	5,087	0	5,12	0

## BIBLIOGRAFÍA

- Academic. (2010). *Portador de carga*. Retrieved from <https://esacademic.com/dic.nsf/eswiki/948293>
- Amit, S., Sethi, V. K., & Tiwari, A. C. (2013). A comparative study of attributes of Thin Film and crystalline Photovoltaic cells. *VSRD International Journal of Mechanical, Civil, Automobile & Production Engineering*, 3(7), 267–270. Retrieved from <http://assets.fiercemarkets.com/public/sites/energy/reports/pvthinfilmreport.pdf>
- B.G. Streetman, S. B. (2000). Solid State Electronic Devices. *Prentice Hall*. Retrieved from <http://electronica.ugr.es/~amroldan/deyte/cap01.htm>
- Baumann, A. (2012). *A New Approach for Probing the Mobility and Lifetime of Photogenerated Charge Carriers in Organic Solar Cells Under Real Operating Conditions*. *Advanced Materials*, 24. <https://doi.org/10.1002/adma.201200874> .
- Berger, A. (2009). *Integral time-of-flight and charge extraction by linearly increasing voltage techniques for determining carrier mobility*. A Thesis in Engineering Science. The Pennsylvania State University.
- Bronson, P. (2014). *Charge transport in organic solar cells*, 169.
- CEPAL. *Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe* (2016).
- Chamorro, W., & Urregos, S. (2013). *Celdas solares orgánicas, una perspectiva hacia el futuro*.
- Chapin, D. M., Fuller, C. S., & Pearson, G. L. (1954). A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. *Journal of Applied Physics*, 25(5), 676–

677. <https://doi.org/10.1063/1.1721711>

Chen, S., Choudhury, K. R., Subbiah, J., Amb, C. M., Reynolds, J. R., & So, F. (2011). Photo-carrier recombination in polymer solar cells based on P3HT and silole-based copolymer. *Advanced Energy Materials*, 1(5), 963–969. <https://doi.org/10.1002/aenm.201100300>

Commission, I. E. (Ed.). (2007). *IEC 60904-9:2007* (2nd ed.).

Dailuxled. (2017). *Eficiencia LM/w*. Retrieved from <https://www.dailuxled.com/blog/iluminacion-comercial-led-eficiencia-lmw/>

Daveshed. (2017). *A solar simulator on a budget*.

Deb, S. K. (1996). Thin-film solar cells: an overview. *Renewable Energy*, 8(1–4 pt 1). [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)88881-1](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)88881-1)

Dimitrijević, S. (2000). *Understanding Semiconductor Devices*. Oxford University Press.

Espejo Marín, C. (2004). La energía solar fotovoltaica en España. *Nimbus, Universidad de Murcia*, 27.

Fagua1, A. L., & William Fernando Bernal S. (2015). *Organic Solar Cells. Grupo de Investigación BINÁ*. Fundación Universitaria Juan de Castellanos.

Fernández, E. (2012). *Modelización y caracterización de células solares III-V Multiunión y de módulos de concentración*. Universidad de Santiago de Compostela.

Fernández muerza, A. (2009). *Paneles solares: así evolucionan*. Retrieved from [http://www.consumer.es/web/es/medio\\_ambiente/energia\\_y\\_ciencia/2009/10/15/188572.php](http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2009/10/15/188572.php)

Goerlitzer, M., Beck, N., Torres, P., Meier, J., Wyrsh, N., & Shah, A. (1996). Ambipolar diffusion length and photoconductivity measurements on “midgap” hydrogenated

- microcrystalline silicon. *Journal of Applied Physics*, 80(9), 5111–5115.  
<https://doi.org/10.1063/1.363491>
- Gómez González, E. (2006). Campos Electromagnéticos – Óptica Guía Básica De Conceptos De Radiometría Y Fotometría, 1–41.
- Günes, S., Neugebauer, H., & Sariciftci, N. S. (2007). Conjugated Polymer-Based Organic Solar Cells. *Chemical Reviews*, 107(4), 1324–1338. <https://doi.org/10.1021/cr050149z>
- Hanfland, R., Fischer, M. A., Brütting, W., Würfel, U., & MacKenzie, R. C. I. (2013). The physical meaning of charge extraction by linearly increasing voltage transients from organic solar cells. *Applied Physics Letters*, 103(6), 063904. <https://doi.org/10.1063/1.4818267>
- Hertel, D., & Bäessler, H. (2008). *Photoconduction in Amorphous Organic Solids*, 666–688.  
<https://doi.org/10.1002/cphc.200700575>
- Hima, A., Khechekhouche, A., Kemerchou, I., Lakhdar, N., Benhaoua, B., Rogti, F., ... Saadoun, A. (2018). GPVDM simulation of layer thickness effect on power conversion efficiency of CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> based planar heterojunction solar cell, 3(2), 37–41.
- Homma, K., Motohashi, M., Murayama, Y., & Fukami, T. (1991). Simultaneous measurement of carrier mobility and lifetime in hydrogenated amorphous silicon films. *Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics)*, 74(6), 85–94.  
<https://doi.org/10.1002/ecjb.4420740609>
- Honsberg, C., & Bowden, and S. (2014). Pveducation.org. Retrieved from <https://www.pveducation.org/>
- Hu, J. J. J. (2016). Amorphous Materials 11 : Amorphous Silicon Macroelectronics Electron ' s travels : from Lilliput to Brobdingnag, 1–21.

- Ifent. (2005). Lecciones de electrónica diodo semiconductor. Retrieved from <http://www.ifent.org/lecciones/diodo/default.asp>
- Instrument, N. (2017a). PXIe-1082.
- Instrument, N. (2017b). PXIe-5160. Retrieved from <http://www.ni.com/es-cr/support/model.pxie-5160.html>
- Instruments, N. (2015). PCB Design Software and Embedded Simulation Tools for modern EDA development. Retrieved from <https://www.labcenter.com/>
- Instruments, N. (2017a). PXI-8840. Retrieved from <http://www.ni.com/es-cr/support/model.pxi-8840.html>
- Instruments, N. (2017b). PXIe-1082. Retrieved from <http://www.ni.com/es-cr/support/model.pxie-1082.html>
- Instruments, N. (2017c). PXIe-5450. Retrieved from <http://www.ni.com/es-cr/support/model.pxie-5450.html>
- J.M., R. (2005). Máxima potencia de generadores fotovoltaicos. Expresiones analíticas a partir de modelos parametricos. *UOM-IES-LS-0508*.
- Julio C. Durán, E. M. G. (2004). Aprovechamiento de la Energía Solar en la Argentina y en el Mundo. *Boletín Energético N 16*.
- Juška, G., Arlauskas, K., Viliūnas, M., & Kočka, J. (2000). *Extraction Current Transients: New Method of Study of Charge Transport in Microcrystalline Silicon. Physical Review Letters* (Vol. 84). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.4946>
- Kazukauskas, V., Pranaitis, M., & Arlauskas, A. (2009). Charge carrier transport and trapping phenomena in organic photovoltaic materials and devices. In *2009 3rd ICTON*

- Mediterranean Winter Conference (ICTON-MW)* (pp. 1–1). IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/ICTONMW.2009.5385576>
- LabVIEW. (2013). LINX de Digilent/LabVIEW MakerHub. Retrieved from  
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/212478>
- Lebo, G. (2001). Ballooning for Cosmic Rays. Retrieved from [https://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2001/comment2\\_ast15jan\\_1](https://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2001/comment2_ast15jan_1)
- López, R. A. Á. (2014). Comparative parameters of solar cells for power generation : test stand implementation using DSP. *Ingeniería Energética*, XXXV, 193–201.
- Lorenzo, E. (2006). *Radiación Solar y Dispositivos Fotovoltaicos*.
- Materials, A. S. for T. and. (2012). *ASTM E927-19*. (A. S. for T. and Materials, Ed.). American Society for Testing and Materials.
- Mercado Miranda, D. A. (2009). Breve Descripción de la Celdas Fotovoltaicas de Mono Unión y de Banda Intermedia.
- Mishurny, V. A., & de Anda, F. (2007). Celdas solares, aspectos técnicos y económicos. *Ciencia y Desarrollo*, 33(212), 36–54.
- Montoya Rasero, C. (2010). Solar Fotovoltaica, 100. Retrieved from [www.eoi.es](http://www.eoi.es)
- Ordóñez, J. (2012). Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico. *Acta*, 1, 17–31.  
Retrieved from [https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias\\_y\\_tecnologia/062017.pdf](https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/062017.pdf)
- Ornelas-Soto, N. (2012). *Celdas solares orgánicas como fuente de energía sustentable*. Universidad de Guanajuato.
- Ornelas-soto, N., Barbosa-garcía, O., Maldonado, J. L., Ramos-ortiz, G., Rodríguez, M., Pérez-, E., ... Alba, L. De. (2014). Celdas solares orgánicas como fuente de energía sustentable,

(August 2012).

Oyola, J.S., Gordillo G, G. (2007). Estado del arte de los materiales fotovoltaicos y de la tecnología solar fotovoltaica. *Prospectiva [En Linea]*.

Pareja, M. (2008). *Energía solar fotovoltaica: Cálculo de una instalación aislada*. (Marcombo, Ed.).

Pereira, M. (2015). Sistemas Solares Fotovoltaico para la producción de Eléctricidad. In *Centro de Desarrollo Energético Antofagasta*.

Ponsa, P., Díaz, M., & Català, A. (2006). Creación de guía ergonómica para el diseño de interfaz de supervisión. *VII Congreso Internacional de ...*, (June 2014). Retrieved from [http://www.researchgate.net/profile/Andreu\\_Catala/publication/238743584\\_Creacin\\_de\\_gua\\_ergonmica\\_para\\_el\\_diseo\\_de\\_interfaz\\_de\\_supervisin/links/0deec52952199734f8000000.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Andreu_Catala/publication/238743584_Creacin_de_gua_ergonmica_para_el_diseo_de_interfaz_de_supervisin/links/0deec52952199734f8000000.pdf)

Research, M. P. I. F. P. (2015). Charge carrier transport.

Reynolds, S., Gordijn, A., & Smirnov, V. (2014). Equivalent-circuit and transport-based mobility models of microcrystalline silicon solar cells. *Energy Procedia*, 44(May 2013), 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.12.027>

Roldán, J. (2008). *Fuentes de Energía*. (2008 Editorial Paraninfo, Ed.) (ilustrada).

Roldán, J. (2013). *Energías renovables. Lo que hay que saber*. (S. A. Ediciones Paraninfo, Ed.).

Schiff, E. A. (2008). Transport, Interfaces, and Modeling in Amorphous Silicon Based Solar Cells: Final Technical Report, 11 February 2002 - 30 September 2006, (February 2002). Retrieved from <https://www.nrel.gov/docs/fy09osti/44101.pdf>

Shieh, J. T., Liu, C. H., Meng, H. F., Tseng, S. R., Chao, Y. C., & Horng, S. F. (2010). The effect

- of carrier mobility in organic solar cells. *Journal of Applied Physics*, 107(8), 1–9.  
<https://doi.org/10.1063/1.3327210>
- Singh, N., Chaudhary, A., Saxena, S., Saxena, M., & Rastogi, N. (2017). Electrical Simulation of Organic Solar Cell at Different Charge Carrier Mobility. *IOSR Journal of Applied Physics*, 09(02), 01–04. <https://doi.org/10.9790/4861-0902020104>
- Stephen, M. (2016). Mini-review: Charge Transport and its Characterisation using Photo-CELIV in Bulk-Heterojunction Solar Cells.
- Tacca, H. E. (2006). Current Transformers for Inverters. *IEEE Latin America Transactions*, 3(3), 274–283. <https://doi.org/10.1109/tla.2005.1642418>
- Tamasi, L. M. J. L. (2003). *Celdas Solares para Uso Espacial: Optimización de Procesos y Caracterización*.
- Tessler, N. (2009). Charge Transport in Disordered Organic Materials and Its Relevance to Thin-Film Devices : A Tutorial Review, 2741–2761. <https://doi.org/10.1002/adma.200803541>
- Torres Camargo, D. (2016). *Celdas solares orgánicas: energía alternativa ecológica*. Retrieved from <http://hipotesis.uniandes.edu.co/hipotesis/images/stories/ed16pdf/Celdas-solares-ORGÁNICAs-16.pdf>
- UPV. (2011). Modelo de banda de energía. Retrieved from <https://glossar.item24.com/es/indice-de-glosario/articulo/item//modelo-de-banda-de-energia-1.html>
- Yuanyao. (2015). Yuanyao-Tech. Retrieved from <https://www.yuanyao-tech.com/products/>
- Zimmermann, B., Würfel, U., & Niggemann, M. (2009). Longterm stability of efficient inverted P3HT:PCBM solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(4), 491–496.  
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.12.022>

