



**BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE
PUEBLA**

**Fabricación y caracterización de un prototipo de módulo
solar fotovoltaico**

por

Liliana Torres Sandoval

Tesis presentada para obtener el grado de Licenciado en Electrónica

en la

Facultad de Ciencias de la Electrónica

Junio 2017

Asesores: Dr. Jesús Carrillo López

Dr. José Alberto Luna López

Puebla, Puebla, 2017.

DEDICATORIAS

A Dios por las vivencias que me ha permitido tener en este camino y por todas las enseñanzas que me han motivado a ser un mejor ser humano.

Dedicado a mis padres Piedad y Joel por apoyarme incondicionalmente en todo momento, por sus sabios consejos y por ser el principal pilar de mi familia.

A mis Hermanos Clemente, Julio y Miriam por su gran apoyo y por su ejemplo de superación tanto personal como profesional, a mis sobrinos Ale, Riki, Rodri y Yaritza porque cada vez que los veo me hacen pasar momentos inolvidables llenos de alegría. A mi novio Daniel por todas las cosas que me ha enseñado y las vivencias que hemos pasado juntos.

Al Doctor Jesús Carrillo López por compartir sus conocimientos y por su apoyo para poder concluir este trabajo.

A toda mi familia, Abuelos, Tíos, Primos, Primas por ser una familia tan unida y porque cada vez que estamos juntos disfrutamos mucho.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad por darme la oportunidad de formarme como profesional y por todo el gran apoyo y las herramientas que nos ofrece durante el transcurso de la carrera.

A mis Asesores de Tesis:

El Doctor Jesús Carrillo López por todo el apoyo que me brindo y por sus consejos en la manera de trabajar con este proyecto.

Al Doctor Alberto Luna López por su apoyo como Asesor, y por todas sus aportaciones para mejorar este trabajo.

Al Doctor J. Guillermo Pérez Luna por su gran apoyo en la colaboración del trazador de curvas, a los Ingenieros Héctor, Ignacio y Jorge por su valioso apoyo en cuanto se tenían que realizar algunas actividades de medición.

A los miembros del Jurado Revisor: Dra. Liliana Cortez Georgievna, Dr. Germán Ardul Muñoz Hernández y Dr. José Gerardo Mino Aguilar por sus observaciones y recomendaciones para mejorar este trabajo.

Al Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores por el apoyo económico que me brindo y por permitirme desarrollar este proyecto en sus instalaciones.

A mis Amigos de la carrera Mateo, Israel, Edy, Mariana, Ignacio, Isabel, Jesús David y Juan Pablo por su valiosa amistad y por el compañerismo que mantuvimos mientras cursábamos la carrera.

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo de un prototipo de módulo fotovoltaico (PMFV) para la generación de energía eléctrica. Su desarrollo se basa en la selección de materiales específicos para mejorar su tiempo de utilidad y eficiencia. Además en la elaboración se evita utilizar laboratorios con maquinaria y equipos muy complejos para no incrementar costos.

Para el diseño del prototipo se basa en algunos módulos fotovoltaicos (MFV) comerciales y para la selección de materiales se realizaron algunas pruebas de encapsulado, de interconexión, de sellado para conocer mejor las características, y las reacciones de cada material al ser inmerso ya en el prototipo, y también para conocer la reacción ante las inclemencias del tiempo. En base a las características y comportamiento de los diferentes materiales y la disponibilidad en el mercado se determinó cuáles de ellos se utilizaron para la construcción de prototipo. Se diseñó y construyó con los componentes específicos y seleccionados que requiere el prototipo de acuerdo a los objetivos planteados. Finalmente se realizaron las pruebas de caracterización eléctrica y funcionamiento del prototipo con lo que se obtuvo un panorama de su rendimiento bajo algunas condiciones climáticas y se demostró que resulta adecuado como generador de energía eléctrica en diferentes aplicaciones de alimentación en donde se requieren potencias de energía.

Índice General

1	<i>Introducción</i>	1
1.1	Justificación	2
1.2	Objetivo general	4
1.3	Objetivos particulares	4
1.4	Organización de la tesis	4
2	<i>Marco teórico</i>	6
2.1	Energía solar y el efecto fotovoltaico	6
2.2	Los semiconductores y la unión p-n	7
2.3	Celda solar.....	11
2.4	Características eléctricas	14
2.5	Módulo fotovoltaico.....	17
2.6	Sistema fotovoltaico.....	19
2.7	Baterías.....	20
2.8	Reguladores.....	21
2.9	Inversor	21
2.10	Factores que afectan el funcionamiento de un módulo fotovoltaico.....	22
2.10.1	Ubicación y orientación.....	22
2.10.2	Temperatura.....	24
2.10.3	Irradiancia.....	24
2.11	Condiciones estándar adecuadas para la caracterización de una celda solar.	25
2.12	Factores de diseño para la fabricación del panel fotovoltaico.....	26
2.12.1	Celdas y cintas de interconexión	26
2.12.2	Encapsulado de las celdas solares	26
2.12.3	Vidrio para cubierta frontal y material para cubierta posterior	27
2.12.4	Marco de soporte	28

3	<i>Proceso de fabricación del panel fotovoltaico</i>	29
3.1	Clasificación de celdas solares.....	29
3.2	Curvas corriente-voltaje.....	30
3.3	Cintas e interconexión.....	31
3.4	Montaje de matrices o cadenas de celdas solares.	33
3.5	Construcción del marco	36
3.6	Cubiertas frontal y posterior	36
3.7	Encapsulado	38
3.8	Ensamble.....	39
3.9	Caja de conexiones, varillas de soporte y colocación de tornillos	42
4	<i>Mediciones y resultados</i>	45
4.1	Curvas corriente –voltaje del panel solar.....	45
4.2	Panel comercial W750-75 Wp.....	47
4.3	Caracterización eléctrica del prototipo de modulo fotovoltaico.....	48
4.4	Principales parámetros de la característica I-V de un panel solar.	49
4.5	Resultados y pruebas de los parámetros eléctricos de un módulo fotovoltaico comercial y del prototipo.	50
4.6	Estudio técnico-económico del prototipo de módulo fotovoltaico.....	53
4.7	Proceso de fabricación de un módulo fotovoltaico.....	55
5.	<i>Conclusiones</i>	56
	<i>Bibliografía</i>	58
	<i>Apéndices</i>	61
	A - Descripción del circuito trazador de curvas.....	61
	B - Realización de pruebas.....	62
	C- Caracterización eléctrica de celdas solares.....	64

Índice de Tablas

<i>Tabla 2- 1</i> Valores óptimos para caracterización de celdas solares.....	25
<i>Tabla 4- 1</i> Parámetros eléctricos de las curvas I-V del panel comercial W750-75 Wp y el prototipo de Modulo Fotovoltaico.	53
<i>Tabla 4- 2</i> Se muestra la distribución de costos de material para el PMFV.....	54

Índice de Figuras

<i>Figura 2. 1</i> Radiación solar que recibe México en KWh/m2 por día.....	7
<i>Figura 2. 2</i> Condición de equilibrio de la unión p - n.....	9
<i>Figura 2. 3</i> Polarización inversa.....	10
<i>Figura 2. 4</i> Polarización directa.....	11
<i>Figura 2. 5</i> Bandas que conforman un material semiconductor.....	12
<i>Figura 2. 6</i> Curva característica I-V de una celda solar en oscuridad I_0 y bajo iluminación I_L	14
<i>Figura 2. 7</i> Celdas de silicio Monocristalino, policristalino y Amorfo.....	17
<i>Figura 2. 8</i> Ejemplo de un típico arreglo de celdas o módulo fotovoltaico.....	18
<i>Figura 2. 9</i> Ejemplo de un sistema fotovoltaico.....	19
<i>Figura 2. 10</i> Radiación solar a lo largo del año.....	23
<i>Figura 2. 11</i> a) Variación de la corriente con respecto a la Irradiancia. b) Disminución de voltaje al aumentar la temperatura.....	25
<i>Figura 3. 1</i> En la imagen se muestran algunas de las celdas empleadas en la construcción del panel.....	30
<i>Figura 3. 2</i> Clasificación de celdas solares.....	31
<i>Figura 3. 3</i> Cintas de interconexión.....	32
<i>Figura 3. 4</i> En esta imagen se aprecia la forma en que se sueldan las celdas por la parte frontal.....	33
<i>Figura 3. 5</i> En esta figura se aprecia la forma en que se fueron soldando las celdas por la parte posterior hasta formar una tira de 9 celdas.....	34
<i>Figura 3. 6</i> En esta imagen se aprecian las 4 cadenas ya terminadas.....	35

Figura 3. 7 Medición de corriente y voltaje en cada una de las cadenas para asegurar que en el proceso de soldado fue exitoso.....	35
Figura 3. 8 Estructura que conforma el soporte del arreglo de celdas solares.....	38
Figura 3. 9 Arreglo de celdas solares unidas al vidrio de la cubierta frontal mediante el material encapsulante.....	40
Figura 3. 10 Arreglo de celdas solares completamente inmersas en el material encapsulante.....	41
Figura 3. 11 Tiras de contacto del arreglo fotovoltaico para conectarse a la caja de conexiones.....	41
Figura 3. 12 Caja de conexiones unida a la cubierta posterior del panel fotovoltaico.....	42
Figura 3. 13 Vista del panel fotovoltaico con la caja de conexiones ya sellada.....	43
Figura 3. 14 Vista del Panel fotovoltaico terminado.....	44
Figura 4. 1 Prototipo de Módulo fotovoltaico finalizado.....	46
Figura 4. 2 Panel comercial W750-75 Wp, parte frontal y posterior.....	47
Figura 4. 3 Tabla de especificaciones del panel W750-75 Wp.....	48
Figura 4. 4 Curva característica I-V de un Panel solar.....	49
Figura 4. 5 Curvas I-V del panel comercial W750-75 Wp con diferentes irradiancias de 500, 840 y 930 W/m ² a 25 °C.....	51
Figura 4. 6 Se observa el comportamiento de la curva I-V en oscuridad del PMFV.....	52
Figura 4. 7 Graficas I-V del prototipo de PMFV, se observa el comportamiento a diferentes Irradiancias de 500, 840 y 930 W/m ² y una temperatura de 25 °C.....	52
Figura 4. 8 Diagrama de proceso de fabricación del Prototipo de módulo fotovoltaico.....	55

1 Introducción

El potencial económico de un país depende de sus recursos energéticos y, como sabemos, en la actualidad los materiales con los que se cuenta para producir energía son del tipo no renovables, muy escasos y pocos países los tienen; además, presentan el inconveniente de que sus desechos son contaminantes. Tomando en cuenta lo anterior se ha puesto especial atención en la manera de utilizar nuevas fuentes alternativas de energía, para satisfacer las demandas presentes y futuras. Especialmente el sol es una fuente de energía gratuita, limpia y prácticamente inagotable, y puede liberarnos de la dependencia del petróleo o de otras alternativas poco seguras o contaminantes, [1].

La generación de energía solar a energía eléctrica ocurre de manera directa y sin ningún mecanismo por medio de un fenómeno llamado efecto fotovoltaico que descubrió el físico francés Becquerel a mediados del siglo XIX. El efecto fotovoltaico ocurre al iluminar dispositivos semiconductores denominados celdas solares, en consecuencia se produce un voltaje y una fotocorriente, es decir a una potencia eléctrica entre sus extremos, produce la energía eléctrica, aunque esta depende de la radiación incidente y de la eficiencia de las celdas solares de acuerdo a sus propiedades, [2].

Las aplicaciones prácticas (1954) aparecieron cuando los primeros satélites fueron lanzados al espacio. La necesidad de una fuente de energía eléctrica de larga vida y bajo peso sólo pudo ser resuelta con el uso de paneles fotovoltaicos conformados de celdas solares. Sin paneles fotovoltaicos sería imposible tener satélites de comunicaciones, la estación espacial o los robots que exploran hoy el planeta Marte. Hacia 1972 comienzan las primeras aplicaciones terrestres con instalaciones que proporcionan energía eléctrica a transmisores ubicados en lugares poco accesibles, [3]. Hoy día la producción, calidad, variedad y costo de los sistemas fotovoltaicos permite un uso más extendido de los mismos en los países desarrollados, pero aún el proceso de la fabricación de las celdas es muy costoso energéticamente.

Sin embargo, la presente situación técnica y económica en el desarrollo de los sistemas fotovoltaicos permite asegurar que son los mejores generadores de electricidad para aplicaciones de cualquier necesidad de potencia, en ciudades como en localidades aisladas; así mismo, se puede prever que estos sistemas tendrían un gran impacto en los programas futuros de generación masiva de electricidad, para apoyar el desarrollo social y económico en zonas aisladas donde no llegan las redes eléctricas.

En este proyecto de tesis se trabajó en la fabricación de un prototipo de módulo fotovoltaico (PMFV) y un sistema de caracterización eléctrica, con el objetivo de desarrollar la tecnología fotovoltaica en nuestro país que pueda satisfacer ciertas necesidades de energía eléctrica. La fabricación del PMFV contempló la disponibilidad de las celdas solares de silicio monocristalino, las cuales fueron adquiridas a unos costos relativamente bajos en una compañía extranjera de Estados Unidos. La necesidad de disponer de las celdas solares, está en que la fabricación de éstos dispositivos requiere instalaciones e infraestructura en equipo, como cuartos limpios, reactores de alta temperatura, campanas de limpieza, campanas de vacío para depósito de metales, etc., que comprende una inversión de al menos 10 millones de pesos.

El proyecto, de este modo, estuvo dirigido a diseñar el arreglo, interconectar y encapsular las celdas solares en resinas térmicas especiales, dentro de un marco metálico con cubiertas de vidrio resistentes a lluvias y vientos intensos. Así mismo, la caracterización eléctrica del módulo fue otra de las actividades contempladas en el proyecto. La fabricación del módulo con el enfoque que se propuso, tuvo una particular ventaja económica, ya que es el diseño de los arreglos y propiamente el encapsulado de las celdas así como la caracterización eléctrica, lo que incrementa de manera importante el costo de este tipo de sistemas.

1.1 Justificación

En la actualidad, los módulos fotovoltaicos que se comercializan en México provienen en su mayoría de otros países, lo cual implica que el capital invertido en

éstos se aproveche en beneficio de esos países. Por otra parte, para la fabricación de MFV comerciales se requiere del uso de laboratorios e infraestructura con equipos muy costosos. Por tal motivo resultó de gran interés investigar diversos tipos de materiales con los que se pudiera desarrollar la tecnología fotovoltaica para la construcción de un PMFV, con el fin de evitar en la medida de lo posible, el uso de equipos muy sofisticados y costosos, pero con las características similares a las de un módulo comercial, y así evitar costos elevados en el proceso de fabricación.

Hace algunos años se consideraba que los sistemas fotovoltaicos estaban dirigidos para las localidades aisladas, sin embargo, actualmente, por diversas razones de carácter ecológico (que incluyen el calentamiento global) y económico (ahorro energético), la energía fotovoltaica está siendo ya empleada en zonas urbanas, particularmente en universidades, con diversas aplicaciones como iluminación externa e interna, en sistemas de cómputo, telefonía inalámbrica, entre otras. Se puede prever que estos sistemas tendrán un gran impacto en los programas futuros de generación masiva de electricidad, para apoyar el desarrollo social y económico. En el caso de su aplicación en zonas rurales, por ejemplo, sabemos que en el estado de Puebla existen comunidades aisladas en las que no llega la red eléctrica. En estas zonas las necesidades de energía son en el hogar, alumbrado público, refrigeración de medicamentos, bombeo de agua, etc. Estas pueden ser algunas de las aplicaciones en las que se podrían emplear los módulos fotovoltaicos.

El módulo fotovoltaico que se fabricó, satisface ciertas necesidades de energía y las principales ventajas de este sistema de generación de energía eléctrica son que la electricidad se realiza de manera limpia, directa, no produce ruidos, no tiene partes móviles y su mantenimiento es muy bajo. Además es compatible con el entorno ecológico.

1.2 Objetivo general

Fabricación de un prototipo de módulo fotovoltaico a partir de celdas solares comerciales y con una tecnología propia, el cual pueda satisfacer necesidades específicas de energía, como lo es la iluminación residencial, industrial o pública.

1.3 Objetivos particulares

- Determinar los materiales más adecuados para el encapsulado de las celdas, el marco y soporte del mismo y, en general, los materiales que constituyen el sistema.
- Desarrollar un sistema de caracterización para obtener los parámetros eléctricos de las celdas solares y del PMFV.
- Realizar la caracterización eléctrica de las celdas solares y del PMFV.

1.4 Organización de la tesis

En este trabajo se presenta el diseño y la construcción de un PMFV y su caracterización eléctrica. Además la construcción de un trazador de curvas para obtener la caracterización eléctrica de cada una de las celdas y del módulo mismo. En el capítulo 2 se describen los aspectos teóricos de este trabajo, como las principales características de la radiación solar, la unión pn, el efecto fotovoltaico, las principales características de una celda solar y su funcionamiento. También se describen los módulos y sistemas fotovoltaicos así como los factores ambientales que afectan su funcionamiento.

En el capítulo 3 se presenta el desarrollo y la construcción del prototipo y se detallan las características cada una de las partes del prototipo sus Materiales. En el capítulo 4 se presentan los resultados de la caracterización eléctrica y algunas pruebas de eficiencia ambiental a las que fue sometido el prototipo. Por último en el capítulo 5

se presentan las conclusiones a las que se llegaron y el trabajo a futuro que se propone para dar continuidad a este trabajo de tesis.

2 Marco teórico

2.1 Energía solar y el efecto fotovoltaico

El sol es la fuente principal de energía del planeta. La temperatura y presión en el interior del sol dan origen a reacciones nucleares que liberan enormes cantidades de energía que llegan al planeta de forma directa o difusa reflejada en las partículas de la atmósfera, en las nubes y demás objetos en el ambiente. En la tierra sólo recibimos una parte de la energía que genera el sol. Y, por supuesto, sobre la superficie terrestre la intensidad luminosa varía dependiendo de la zona geográfica, de los factores climatológicos que ocurren durante el día y de la estación del año. La luz que recibimos tiene dos componentes: la radiación directa y la radiación difusa. La radiación directa es la que recibimos en un día sin nubes cuando el sol se encuentra en el zenit (punto más alto) y la radiación difusa es cuando hay nubosidad u otras condiciones atmosféricas.

La energía solar disponible en los altiplanos mexicanos se suma a aproximadamente 2000 KW/h por año para cada metro cuadrado de colector solar, [4]. En la Fig. 2.1 se muestra el mapa que conforma la distribución de la radiación solar en la República Mexicana.

La potencia de la radiación que se recibe del sol sobre la superficie terrestre en condiciones óptimas (día sin nubes e incidencia normal sobre el área de medición) es de aproximadamente 1 KW/m², [5]. A este valor se le conoce como potencia de radiación pico y es importante ya que sirve de referencia para determinar la cantidad promedio recibida. Esta es la unidad usada por los diseñadores de sistemas fotovoltaicos.

La radiación solar puede ser utilizada en su forma energética directa o bien a través del calor que lleva. Estas dos formas de energía del sol, fotónica y calorífica, son las que distinguimos cuando hablamos de manera genérica de la energía solar.

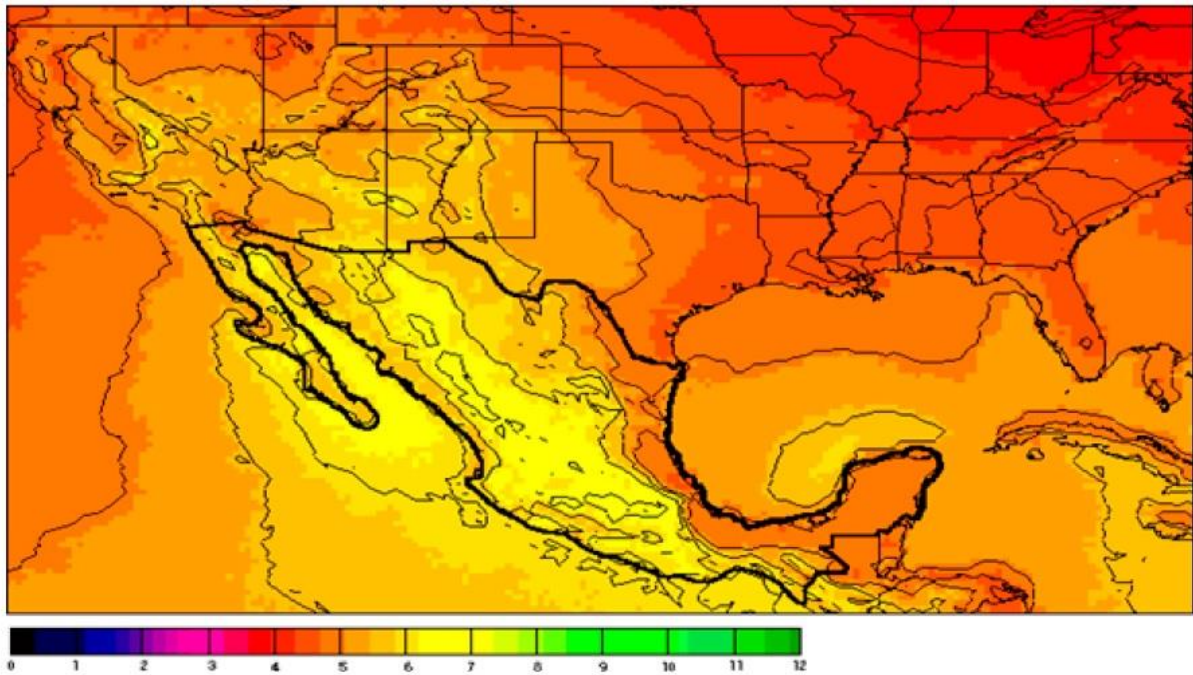


Figura 2. 1 Radiación solar que recibe México en KWh/m2 por día.

La energía solar fotovoltaica es la energía eléctrica producida por ciertos materiales al exponerlos a la luz solar, siendo la cantidad de energía producida proporcional al flujo luminoso que reciben. A la transformación de la energía luminosa directamente en energía eléctrica se le conoce como efecto fotovoltaico. Para entender un poco más acerca de este fenómeno hablaremos de las celdas solares y la unión P- N, [6].

2.2 Los semiconductores y la unión p-n

Como sabemos, la física moderna nos muestra que dependiendo del arreglo y las propiedades de los átomos en estado sólido unos materiales pueden ser buenos conductores, otros buenos aislantes y algunos más pueden ser semiconductores, [7].

Para que la conducción de la electricidad sea posible en un material es necesario que haya electrones que no estén ligados a un enlace determinado (banda de valencia) sino que sean capaces de desplazarse por el cristal (banda de conducción), [8]. La separación entre la banda de valencia y la de conducción se llama banda prohibida, porque en ella no puede haber portadores de carga.

En un conductor las bandas de valencia y de conducción se traslapan de modo que siempre hay muchos electrones de conducción. En un aislante el espacio energético entre las bandas de valencia y la banda de conducción es tan ancho que muy pocos electrones adquieren la suficiente energía para saltar a la banda de conducción, [9]. En cambio en los semiconductores el espacio energético entre las bandas de valencia y de conducción es pequeño, por lo que suministrándole energía puede conducir la electricidad; pero además su conductividad puede regularse. Un semiconductor en su estado puro conduce muy poca corriente, esto se debe al número limitado de electrones libres en la banda de conducción y de huecos en la banda de valencia.

La conductividad en los semiconductores puede incrementarse mediante la adición controlada de impurezas al material semiconductor puro. Al proceso, mediante el cual se incrementa el número de portadores de corriente (electrones o huecos) para incrementar su conductividad se le denomina dopado, [8].

De acuerdo a la impureza introducida en el material semiconductor se obtienen materiales semiconductores tipo n, con un mayor número de electrones libres y materiales tipo p con un mayor número de cargas positivas o huecos. Si se coloca un material tipo n junto a un material tipo p, al formarse la unión, algunos electrones de conducción en la región n cercanos a la región p se difunden a través de esta y se recombinan con los huecos próximos a la unión. Por cada electrón que cruza la unión y se recombina con un hueco, en la región n cercana a la unión queda un átomo con una carga positiva neta, por lo que es un ion positivo. También cuando el electrón se recombina con un hueco en la región p, un átomo con carga negativa neta, se convierte en ion negativo. Como resultado de este proceso de recombinación, cerca de la unión p-n se acumula un gran número de iones positivos y negativos hasta llegar a una condición de equilibrio. Se comienza a formar una capa de iones que se ampliará hasta el punto en el cual ningún electrón adicional pueda cruzar la unión p-n (Fig. 2.2).

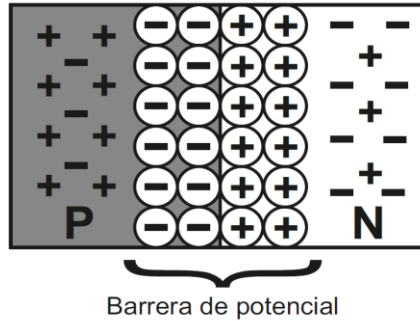


Figura 2. 2 Condición de equilibrio de la unión p - n.

De acuerdo a esto, resulta una carga espacial positiva en la región n y otra negativa en la región p, ambas junto a la unión. Esta distribución de cargas en la unión establece un campo eléctrico que repele a los huecos de la región p y a los electrones de la región n alejándolos de la unión p-n. Este campo eléctrico puede romperse fácilmente mediante la aplicación de un voltaje externo si conectamos una batería. Si conectamos las terminales de una batería la terminal positiva con la región n y la negativa con p, lo que ocurre es que se evita el paso de corriente a través de la unión p-n. En este caso la terminal negativa de la batería atrae huecos en la región p, alejándolos de la unión, y la terminal positiva en el lado n también atrae electrones alejándolos de la unión. A medida que los electrones y los huecos se alejan de la unión, la barrera de potencial se amplía y se crean más iones positivos en la región n y más iones negativos en la región p, Fig. 2.3. Así la barrera de potencial se amplía hasta que bloquea el paso de electrones y huecos; aquí no observaremos corriente alguna, aunque en realidad existe una corriente muy pequeña, producida por los portadores minoritarios, denominada corriente de saturación de oscuridad. En la barrera de potencial existe un número relativamente pequeño de pares electrón-hueco producidos térmicamente.

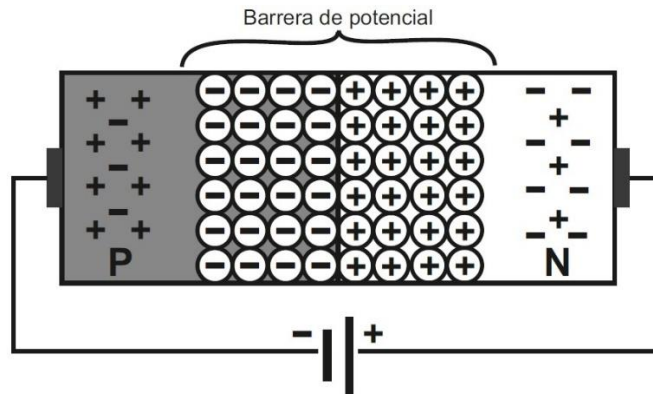


Figura 2.3 Polarización inversa.

Ahora, si se conecta la terminal negativa de la batería con la región n y la terminal positiva con la región p entonces tenemos una polarización en directa, en este caso lo que ocurre es que la terminal negativa de la batería empuja a los electrones en la región n hacia la unión, mientras que la terminal positiva empuja a los huecos en la región p también hacia la unión. Cuando el voltaje externo supera el campo eléctrico los electrones en la región n alcanzan suficiente energía para penetrar a la barrera de potencial y cruzar la unión donde se combinarán con los huecos en la región p. De esta manera, la corriente a través de la región n es el movimiento de electrones de conducción hacia la unión y una vez que los electrones de conducción penetran a la región p se combinan con los huecos y se convierten en electrones de valencia. En seguida estos se desplazan como electrones de valencia, de hueco en hueco hacia la conexión positiva de la batería. El movimiento de electrones a través de los huecos produce un movimiento de huecos en dirección opuesta Fig. 2.4, de esta forma la corriente en la región p es el movimiento de huecos hacia la unión.

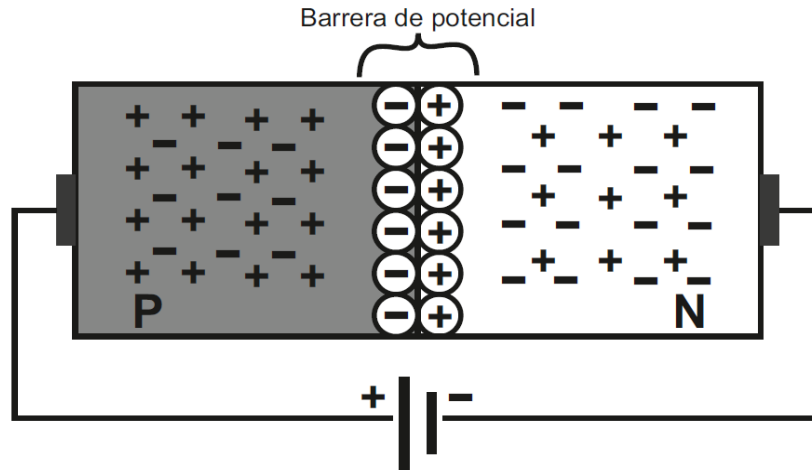


Figura 2. 4 Polarización directa.

Debido a la gran cantidad de electrones y huecos libres, en cada lado de la unión, cualquier variación en la polarización en directa, causará un cambio muy grande en la corriente medida. Se ha podido determinar que la corriente I varía con el voltaje externo V en forma exponencial, dicha expresión se escribe como

$$I = I_0 \left[e^{(V/V_T)} - 1 \right] \quad (2.1)$$

donde I_0 es la corriente minoritaria o de saturación, la cual suele ser muy pequeña, V_T es el voltaje térmico, relacionado con la energía térmica de los electrones y huecos dentro del material.

De esta manera se forman los diodos (unión p-n); así una celda solar es un diodo pero con un área grande, con dos contactos óhmicos y funciona mediante la incidencia de luz que genera el efecto fotovoltaico.

2.3 Celda solar

Las celdas solares son dispositivos que convierten la energía solar directamente en energía eléctrica. Y el fenómeno en el cual se basa su funcionamiento es denominado efecto fotovoltaico. Una celda solar es un diodo de unión p-n pero con un área mayor, [10].

Al incidir luz sobre un diodo, los fotones que causan la generación de pares electrón hueco en las regiones n y p tendrán que poseer una energía mayor que el ancho de banda prohibido del material que lo conforme, Fig. 2.5.

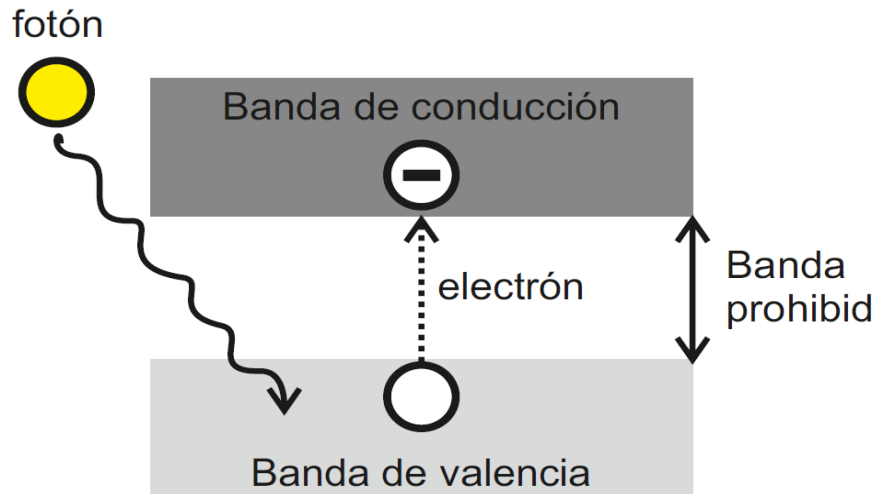


Figura 2. 5 Bandas que conforman un material semiconductor.

También se comenzará a generar un exceso de huecos en la región n respecto de los que hay cuando el diodo está en obscuridad y sin polarización alguna; y en la región tipo p ocurrirá algo similar pero con los electrones. Sin embargo los portadores mayoritarios en ambas regiones casi no se verán afectados, ya que en general la cantidad de los portadores generados por la radiación es mucho menor que la cantidad original de electrones en el lado n, o de huecos en el lado p. Por lo tanto, a partir de ahora, nos referiremos solamente a los portadores minoritarios en cada región del semiconductor, pues son estos los que determinan el fenómeno, al romperse el equilibrio debido a la interacción del material con la radiación luminosa. De esta forma los portadores minoritarios, generados en cada lado, tenderán a moverse en todas direcciones al chocar entre sí con la presencia de los fonones (vibraciones de los átomos del cristal); la presencia del campo eléctrico en la unión los atrae, haciendo circular a los electrones en exceso generados por la luz desde la región p hacia la n y a los huecos en exceso desde la región n hacia la p, y luego empujándolos hacia el circuito externo, [11].

Como los electrones y los huecos tienen cargas opuestas, al moverse en las bandas de conducción y de valencia en sentidos contrarios causan una corriente eléctrica que tiene la misma dirección convencional, y por lo tanto la corriente total es la suma de ambas corrientes. De modo que si se conecta un conductor entre los extremos del diodo iluminado, la corriente eléctrica causada circulará a través de todo el circuito, y diremos entonces que tenemos una fotocorriente en el mismo, [2]. La efectividad del campo eléctrico interno para hacer fluir a los portadores minoritarios, de forma que produzcan la fotocorriente, depende de que los mismos no se pierdan en su trayecto hacia la región en donde existe el campo. Por ello es que son importantes las movilidades de los electrones y de los huecos, así como la rapidez con la que se recombinan.

Por otro lado, la recombinación de huecos y electrones ocurre en dos diferentes regiones del material. La primera corresponde a la superficie, y la segunda al volumen del cristal. En las superficies habrá una gran cantidad de defectos como consecuencia de que hay una ruptura del arreglo atómico que hay en el interior, quedando algunos enlaces sueltos, que causan centros de recombinación en la superficie.

Así mismo, la introducción de impurezas en el volumen del semiconductor también causa esfuerzos y, por lo tanto, una gran cantidad de defectos estructurales. Los defectos causan la aparición de niveles permitidos para electrones y huecos dentro de lo que es la banda prohibida del semiconductor, [12].

Por lo tanto para entender mejor el efecto fotovoltaico debemos entender que para que se genere una fotocorriente, los pares electrón-hueco generados por la luz deberán ser separados antes que se recombinen a través de trampas en el volumen o en la superficie. Por ello se requiere el campo eléctrico interno, el cual produce la separación de los portadores de carga positiva de los de carga negativa, evitando así su pérdida por recombinación.

2.4 Características eléctricas

La calidad de una celda solar se caracteriza por medio de su eficiencia de conversión de energía del sol que incide sobre la superficie de la celda y es transformada a energía eléctrica, [2]. Para evaluar la eficiencia se necesita generar una gráfica de corriente contra voltaje (I-V), que se obtiene al colocar una celda bajo determinadas condiciones de iluminación, Fig. 2.6

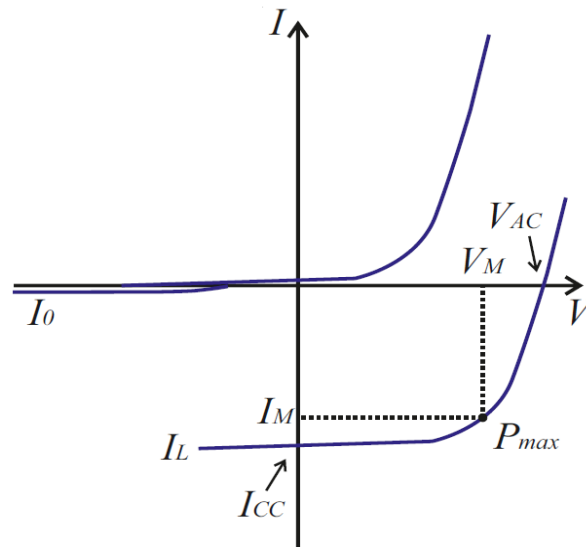


Figura 2. 6 Curva característica I-V de una celda solar en oscuridad I_0 y bajo iluminación I_L .

Obteniendo la curva $I-V$ se pueden obtener los parámetros para determinar la eficiencia de la celda solar. Estos parámetros son: la corriente de corto circuito I_{cc} , el voltaje a circuito abierto V_{ac} , potencia máxima P_{max} , factor de forma FF y eficiencia η .

Corriente de corto circuito I_{cc} . Si conectamos una resistencia en los extremos de la celda bajo iluminación la corriente generada causa una caída de voltaje en la resistencia. En otras palabras, habrá una auto-polarización que traerá como consecuencia la reducción del campo eléctrico en la unión. La auto-polarización actúa de manera similar a lo que ocurre cuando el diodo está en oscuridad, es decir, causa un flujo de corriente. Recordando la ec. (2.1), podemos esperar que la

corriente total I en una celda solar iluminada, con una resistencia de carga que produzca un voltaje de auto-polarización (V), estará dada como

$$I = I_L - I_0 \left[e^{(V/V_T)} - 1 \right] \quad (2.2)$$

donde I_L = corriente fotogenerada e I_0 = es la corriente de saturación del diodo.

Voltaje a circuito abierto V_{AC} . El voltaje de circuito abierto se obtiene cuando los extremos de la celda están abiertos pero con la celda bajo iluminación. En este caso veremos que la corriente será cero, pues no habrá un circuito cerrado y por lo tanto no puede fluir corriente, de donde el voltaje a circuito abierto está dado por la relación

$$V_{AC} = V_T \log \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (2.3)$$

donde V_T es el voltaje térmico. Si observamos la Fig. 2.6, veremos que en la gráfica existe un punto (V_M, I_M), donde el voltaje y la corriente alcanzan su valor máximo, este punto representa la máxima potencia producida (P_{Max}). Teniendo este punto podemos obtener otro parámetro llamado factor de forma o factor de llenado, el cual representa la cuadratura de la curva I - V y está definido mediante la relación, [13]

$$FF = \frac{I_M \times V_M}{I_{CC} \times V_{AC}} \quad (2.4)$$

Ahora definiremos la eficiencia de conversión de una celda solar como la razón de potencia máxima P_{MAX} que entrega la celda, sobre la potencia incidente P_{INC} del sol y se representa en porcentaje mediante

$$\eta = \left(P_{MAX} / P_{INC} \right) \times 100 \quad (2.5)$$

Estos parámetros nos proporcionan información para poder clasificar las celdas solares en cuanto a su calidad o eficiencia de conversión. De esta forma se podrán formar grupos de celdas que tengan características casi iguales y así conformar un panel solar.

Para el desarrollo de este trabajo ha sido necesario diseñar y construir un sistema electrónico que permitiera obtener las curvas $I-V$ características, tanto de las celdas solares, como del panel a fabricarse, que es el objetivo principal de este trabajo de tesis. En el Apéndice A se describe detalladamente el diseño, fabricación y funcionamiento del sistema que se desarrolló para poder llevar a cabo las mediciones y caracterizaciones necesarias que este trabajo ha requerido.

Se fabrican diferentes tipos de paneles solares en función de los materiales semiconductores. Actualmente el material más investigado y desarrollado para la fabricación de celdas solares es el silicio y es el tipo de paneles solares que se pueden encontrar en el mercado. El silicio se usa generalmente en sus tres formas: amorfo, policristalino y monocristalino, [14]. En la Figura 2.7 se muestran celdas fabricadas con estas clases de materiales.

Las celdas de silicio monocristalino se obtienen a partir de barras cilíndricas o lingotes de silicio perfectamente cristalizado en una sola pieza, que son producidos en hornos especiales (crecedores Czochralski), [15].

Las celdas se obtienen por cortado de las barras en forma de obleas cuadradas delgadas (0.2 – 0.4 mm de espesor). Su eficiencia de conversión energética a nivel de laboratorio ha alcanzado rendimientos máximos del 24.7%, para éste tipo de paneles, siendo en los comerciales de un 16 %-18 %. Por su forma de fabricación son por lo tanto, los más caros pero los más efectivos.

En las celdas de silicio policristalino los materiales son semejantes a los del tipo anterior aunque en este caso el proceso de cristalización del silicio es diferente.

El silicio policristalino se basa en secciones de una barra de silicio que se ha estructurado desordenadamente en forma de pequeños cristales. Son visualmente muy reconocibles por presentar su superficie un aspecto granulado. Se obtiene con ellos un rendimiento inferior que con los monocristalinos, siendo correspondientemente, su precio también más bajo.

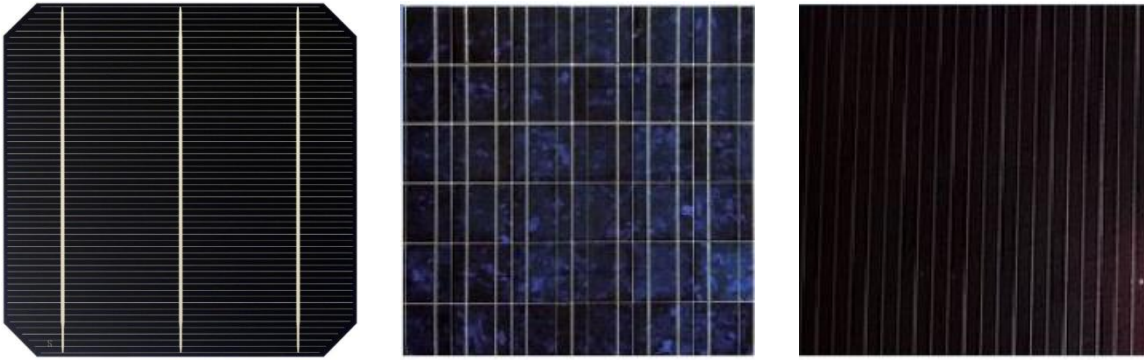


Figura 2. 7 Celdas de silicio Monocristalino, policristalino y Amorfo.

A diferencia de las dos anteriores, las celdas de silicio amorfo no siguen una estructura cristalina, [16]. Los paneles de este tipo son habitualmente empleados para pequeños dispositivos electrónicos (calculadoras, relojes, etc.) y en pequeños paneles portátiles. Su rendimiento máximo alcanzado en laboratorio ha sido del 13% siendo el de los módulos comerciales del 8 %.

En condiciones estándar de insolación, correspondiente a una irradiancia de $1000\text{W}/\text{m}^2$ (AM1.5), [2] una celda solar comercial genera un voltaje de 0.5 a 1.0 voltios, dependiendo del material semiconductor empleado y una densidad de corriente de 10 a $35\text{ mA}/\text{cm}^2$, también dependiendo del material semiconductor que se utilice.

2.5 Módulo fotovoltaico

Un MFV se conforma de un grupo de celdas solares, conectadas eléctricamente unas con otras, encapsuladas en un bloque único y montadas en un elemento de soporte o marco, que a la vez sirve para protegerlas de condiciones climáticas adversas. El módulo más característico está constituido por entre 30 y 36 celdas, todas de igual tamaño y de iguales características (I - V), Fig. 2.8, [17].

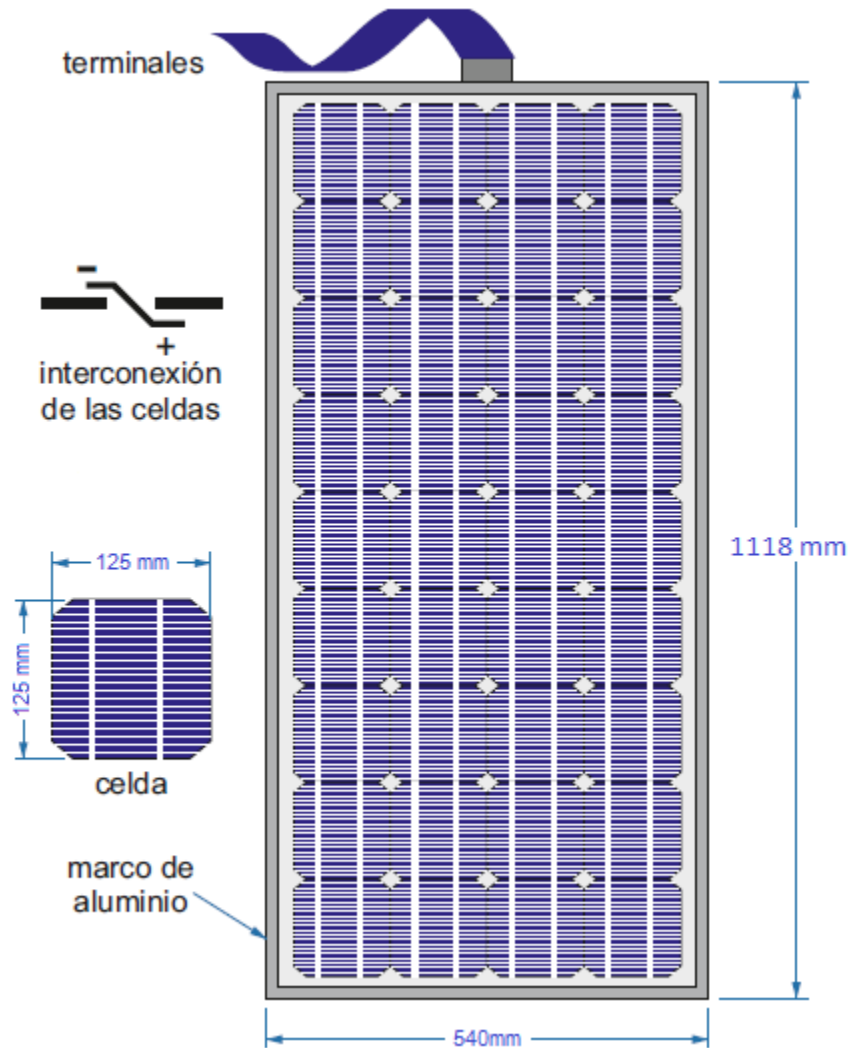


Figura 2. 8 Ejemplo de un típico arreglo de celdas o módulo fotovoltaico.

En un MFV las celdas se interconectan en serie para aumentar el voltaje y en paralelo para aumentar la cantidad de corriente dependiendo la cantidad de energía requerida. Así mismo, puede ser necesario convertir la corriente directa generada a corriente alterna, para alguna aplicación en particular. La estructura de los módulos los hace muy duraderos, fiables y da a las celdas protección; es frecuente la conexión de dos o más módulos con el propósito de formar un generador fotovoltaico, al conjunto de módulos se le denominan sistema fotovoltaico.

2.6 Sistema fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico se conforma de múltiples componentes, incluyendo los módulos fotovoltaicos, conexiones mecánicas y eléctricas, reguladores, baterías, convertidores de corriente, etc., (ver Fig. 2.9), [18].

Como ya se mencionó anteriormente el voltaje de una celda solar individual es bajo, típicamente 0.5V, por eso muchas celdas deben ser combinadas en un módulo fotovoltaico, los cuales a su vez son conectados entre ellos para formar el sistema.

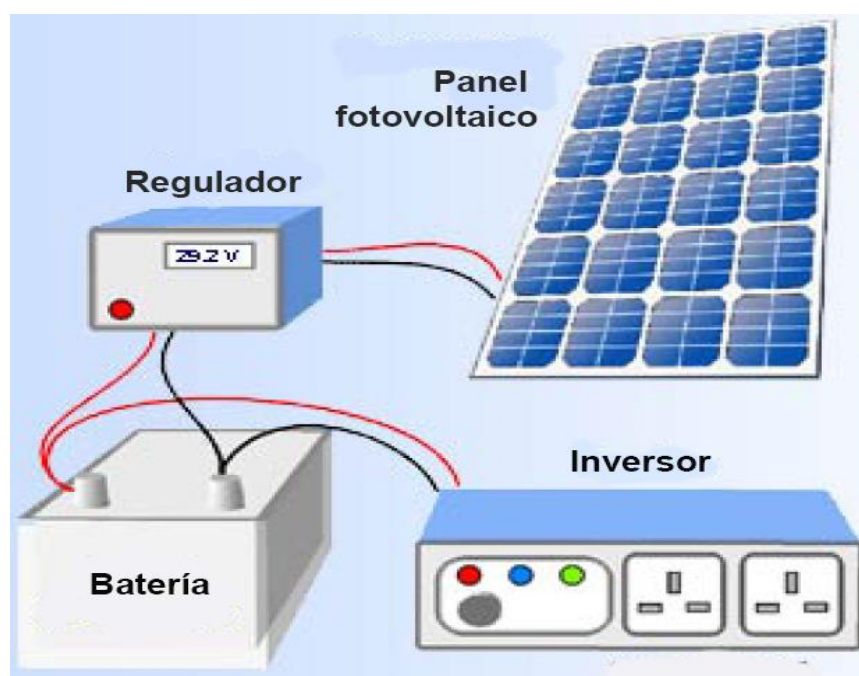


Figura 2.9 Ejemplo de un sistema fotovoltaico.

La electricidad generada puede ser almacenada, usada directamente, subida al sistema eléctrico o hacer una combinación para usar una parte directamente en el hogar o dependiendo para que se requiera o subir a la red lo que no se utilice, [19].

La capacidad de un sistema fotovoltaico de producir y almacenar energía de manera adecuada, lo convierte en una fuente de energía confiable y constante aun cuando exista nubosidad, lluvia o sea de noche. La confiabilidad del sistema dependerá de

una selección adecuada de los componentes para la producción de energía y su almacenamiento.

2.7 Baterías

La batería se encarga de acumular la energía mientras ésta no sea utilizada y es el único elemento en el sistema fotovoltaico que necesita mantenimiento, [20].

Los tipos más frecuentes de baterías son plomo-ácido y níquel-cadmio (Ni-Cd). En los sistemas fotovoltaicos las más frecuentemente usadas son plomo-ácido. Existen varias clases de acumuladores plomo-ácido (automotriz, motriz industrial, gel, espaciales, Litio).

La diferencia entre las baterías automotrices y las baterías utilizadas en sistemas fotovoltaicos, es que las primeras tienen como objetivo principal el arranque del vehículo, se diseñan para proporcionar valores de corriente altos, aproximadamente 1000 amperes, por periodos cortos de tiempo con una recarga posterior inmediata durante el funcionamiento del vehículo. Las baterías para sistemas solares son diseñadas para entregar una potencia constante por periodos largos de operación sin recarga, determinan su calidad por la cantidad de energía que son capaces de acumular y la profundidad de descarga, o mejor dicho el porcentaje de energía del total que es capaz de entregar de manera cíclica sin ocasionar daños a la batería, cercano al 80 %, por lo que son denominadas baterías de ciclo profundo, [21].

La capacidad de una batería se mide en A h; debe especificarse a qué número de horas se obtiene este valor conocido como régimen de descarga. La diferencia en requerimientos hacia cada batería genera características diferentes en su fabricación. En las baterías automotrices lo importante es tener una baja densidad de corriente ($A=cm^2$) para minimizar la caída de voltaje en el arranque del automóvil, por ello se usan placas de plomo esponjoso en su construcción, en las baterías solares se necesita una mayor cantidad de material activo (plomo) para alargar su vida útil, lo que las vuelve más pesadas y costosas.

2.8 Reguladores

Este es un dispositivo electrónico que controla tanto el flujo de la corriente de carga proveniente de los módulos hacia la batería, como el flujo de la corriente de descarga que va desde la batería hacia las lámparas y demás aparatos que utilizan electricidad. Si la batería ya está cargada, el regulador interrumpe el paso de corriente de los módulos hacia ésta y si ella ha alcanzado su nivel máximo de descarga, el regulador interrumpe el paso de corriente desde la batería hacia las lámparas y demás cargas, [22].

Existen diversas marcas y tipos de reguladores. Es aconsejable adquirir siempre un regulador de carga de buena calidad y apropiado a las características de funcionamiento (actuales y futuras) de la instalación fotovoltaica. También, se recomienda adquirir controladores tipo serie con desconexión automática por bajo voltaje y con indicadores luminosos del estado de carga. Estas opciones permiten la desconexión automática de la batería cuando el nivel de carga ha descendido a valores peligrosos que puedan dañar permanentemente la batería. Generalmente, el regulador de carga es uno de los elementos más confiables de todo sistema fotovoltaico, siempre y cuando se dimensione e instale correctamente.

2.9 Inversor

Los requerimientos de la carga eléctrica conectada al sistema fotovoltaico determinan el uso de un convertidor CC - CA o un inversor a la salida. Un convertidor transforma el voltaje del sistema en otro voltaje de acuerdo a las características de la carga pero la salida sigue siendo de corriente continua (CC); su uso sólo es necesario cuando el voltaje requerido por la carga difiere del voltaje del banco de baterías. Un inversor convierte la salida de corriente continua en corriente alterna (CA) para permitir el uso de aplicaciones de corriente alterna comunes o la conexión del sistema a la red eléctrica, [23].

Cuando un sistema fotovoltaico es conectado a la red eléctrica no es necesario el uso de las baterías. Los inversores son utilizados en una gran variedad de aplicaciones, desde pequeñas fuentes de alimentación para computadoras, lámparas, radios,

teléfonos celulares, usos productivos en sitios aislados hasta aplicaciones industriales para manejar alta potencia.

En ocasiones no se utilizan todos los componentes del sistema fotovoltaico, se debe analizar cuáles son las necesidades de energía, y se puede omitir el inversor o las baterías, si no se requiere de almacenamiento o conversión de energía ya que algunos aparatos operan con corriente continua o algunas aplicaciones se hacen solo de día cuando los paneles están produciendo energía.

2.10 Factores que afectan el funcionamiento de un módulo fotovoltaico

2.10.1 Ubicación y orientación

En México es muy común que las viviendas posean techos horizontales; esto es muy convenientes para la instalación de un arreglo fotovoltaico, ya que el montaje puede realizarse en estructuras con condiciones óptimas de orientación e inclinación, [24]. Como sabemos el territorio mexicano se encuentra en el hemisferio norte. En esta región la trayectoria aparente del sol durante la mayor parte del año, desde el amanecer hasta el atardecer se observa hacia el sur de este a oeste.

La inclinación de los rayos del sol respecto a la superficie horizontal es variable a lo largo del año (máxima en verano y mínima en invierno) y por tanto, en aquellas instalaciones cuyos paneles estén fijos, existirá un ángulo de inclinación que optimizará la colección de energía sobre una base anual, Fig. 2.10. Es decir, conviene buscar el ángulo de inclinación de los paneles respecto al plano horizontal que hace máxima la potencia media anual recibida. En la mayoría de los casos este ángulo coincide con la latitud del lugar de la instalación. Normalmente se suele tomar un ángulo mayor, aproximadamente 15° , en beneficio de una mayor captación durante el invierno, cuando la luminosidad disminuye, a costa de una peor captación en verano, cuando hay una mayor cantidad de luz o puede ocurrir que la instalación no vaya a usarse todo el año sino sólo en ciertas épocas. Así, si la instalación se va a usar preferentemente en verano conviene que la inclinación del panel sea menor que la latitud del lugar, aproximadamente en 15° , [23].

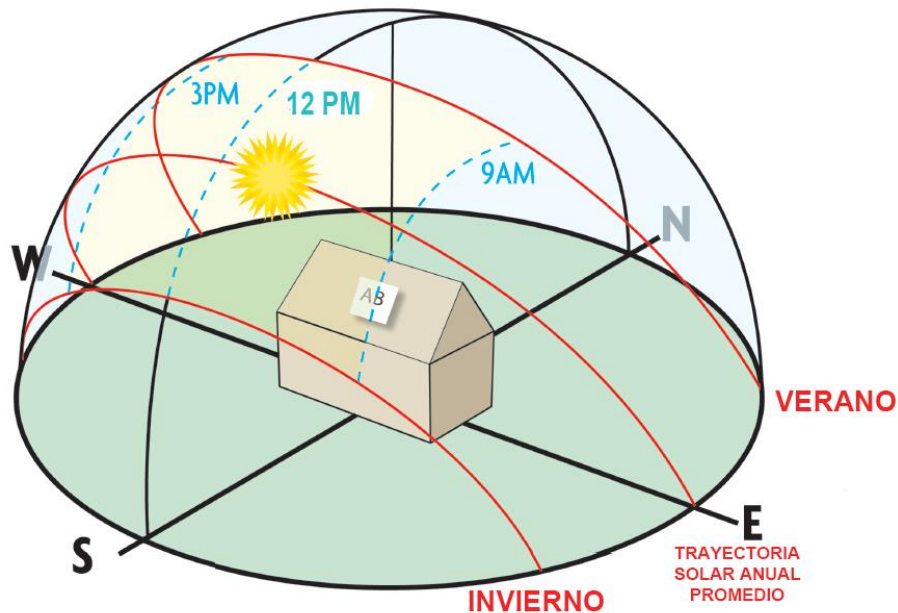


Figura 2. 10 Radiación solar a lo largo del año.

Una correcta orientación hacia el sol es de vital importancia para los módulos solares ya que el rendimiento de la instalación va a depender de la cantidad de radiación solar recibida por el módulo.

Las desviaciones hacia el oeste o hacia el este en un ángulo inferior a 30° hacen disminuir la radiación diaria recibida en un pequeño valor que se cifra en menos del 5 %. Por el contrario, para ángulos superiores a este valor, las pérdidas en la irradiación captada son considerables. En resumen, la orientación óptima de un colector es la que mira directamente hacia el sur en la mayoría de los casos es igual a la latitud del lugar, pero si esto no es posible puede determinarse una variación aproximada de 15°.

Un factor muy importante es la ubicación que se elija para el montaje del módulo fotovoltaico; en este caso se debe buscar lugares libres de sombras, de árboles, construcciones u otros factores. Puede ser en el suelo, o de preferencia en lugares altos sobre techos de las casas, postes, donde puedan estar libres de impactos. Es importante resaltar que aunque el área donde se instale el módulo fotovoltaico se encuentre libre de sombras a una cierta hora del día, en otro momento sí podría verse afectada. También, debe observarse que la proyección de sombras en el invierno es

mayor que en verano. El problema con los sombreados es que, las sombras recurrentes e incluso ocasionales, reducen sustancialmente la producción de electricidad del módulo fotovoltaico. La utilización de una estructura de soporte adecuada para el módulo también es importante ya que facilita las labores de instalación del módulo fotovoltaico y evita problemas causados por las condiciones climatológicas adversas, y asegura la orientación para una captación mejor de radiación solar.

2.10.2 Temperatura

La temperatura de la celda solar es un factor de importante influencia en la curva característica de un dispositivo fotovoltaico.

Cuando la celda está bajo el sol se calienta a temperaturas arriba del medio ambiente ya que es un cuerpo oscuro. Para un día soleado la temperatura de la celda es de 25°-30°C, arriba de la temperatura del aire. Al calentarse la celda, la corriente se incrementa pero casi imperceptiblemente: 0.003 mA/cm² por cada grado centígrado.

El voltaje disminuye con el incremento de la temperatura, aproximadamente 0.002V por cada grado centígrado. La potencia de una celda disminuye un 0.5% por cada grado centígrado de aumento de su temperatura por encima de 25°C.

La reducción de la potencia varía dependiendo de las características eléctricas del módulo, [21].

2.10.3 Irradiancia

La radiación solar (conocida como Irradiancia) que llega a los paneles depende de varios factores: la ubicación de la instalación, la época del año, la hora del día, la orientación del panel, la inclinación, etc. Un medio día a pleno sol equivale a una radiación de 1000 W/m².

Cuando el cielo está nublado, la radiación apenas alcanza los 100 W/m². La variación de la radiación afecta directamente a la corriente de corto circuito, la corriente aumenta con la radiación, permaneciendo más o menos constante el voltaje. Es importante conocer este efecto ya que los valores de la radiación cambian

a lo largo de todo el día en función del ángulo del sol con el horizonte, por lo que es importante la adecuada colocación de los paneles existiendo la posibilidad de cambiar su posición a lo largo del tiempo, bien según la hora del día o la estación del año, [25]. En la figura 2.11 a) se observa la variación de corriente con respecto a la irradiancia y en la figura 2.11 b) la disminución de voltaje al incrementar la temperatura.

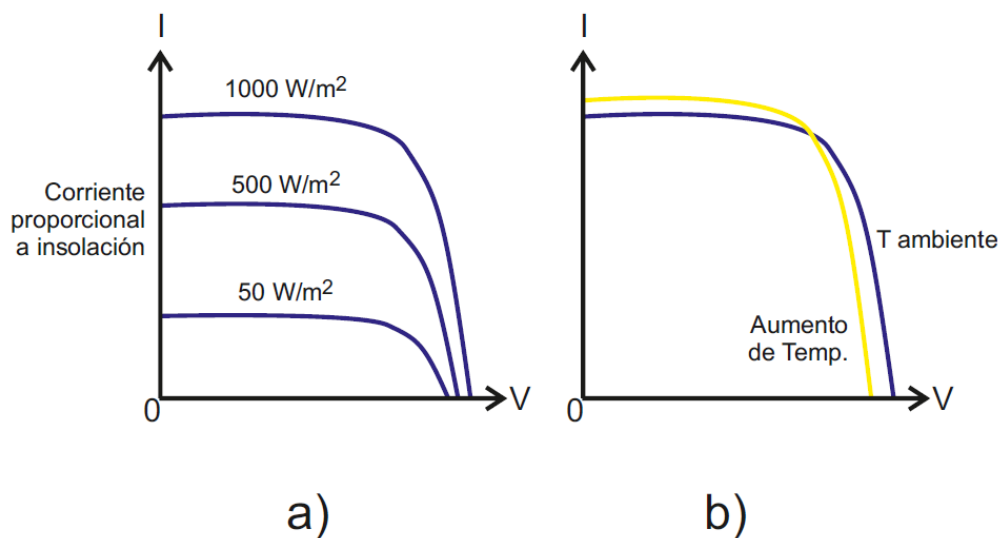


Figura 2. 11 a) Variación de la corriente con respecto a la Irradiancia. b) Disminución de voltaje al aumentar la temperatura.

2.11 Condiciones estándar adecuadas para la caracterización de una celda solar.

En la tabla 2.1 se presentan los valores óptimos de los factores principales para la caracterización eléctrica de una celda solar.

Tabla 2- 1 Valores óptimos para caracterización de celdas solares

Factor	Valor optimo
Temperatura	25 ⁰ C
Irradiancia	1Kw/m ²
Distribución espectral	AM 1.5
Incidencia	Normal

2.12 Factores de diseño para la fabricación del panel fotovoltaico

2.12.1 Celdas y cintas de interconexión

La celda solar es el principal elemento del módulo fotovoltaico que hace la conversión de la energía, por esta razón para la construcción de un panel se deben elegir las celdas más adecuadas de acuerdo a las necesidades de energía. En el mercado se encuentran diferentes tamaños y presentaciones de celdas las hay cuadradas, rectangulares, redondas etc. Esto dependerá del tamaño y presentación que se le quiera dar al panel. Las interconexiones entre celdas se lleva a cabo básicamente a través de cintas metálicas muy delgadas, con muy buena conductividad, maleables y fácilmente soldables mediante caudín; además sus dimensiones no deben sufrir cambios notables producidos por la temperatura, [26]. Estas interconectan a las celdas entre sí, se encargan de coleccionar la corriente eléctrica producida por las celdas y llevarla a la parte exterior del panel o caja de conexión. Las dimensiones de estas se deben elegir de acuerdo a las celdas con las que se vaya a trabajar ya que se sueldan sobre el bus de contacto de la celda solar.

2.12.2 Encapsulado de las celdas solares

Una función importante del encapsulado en los módulos es que las celdas queden protegidas para que operen bajo condiciones de climas cambiantes (frío, calor, lluvia, humedad, vientos fuertes), del polvo, o de posible daño mecánico por aves, o piedras impulsadas naturalmente por el viento. El encapsulado proveería suficiente rigidez para sujetar a las celdas y sus interconexiones. También tiene la función de aislar eléctricamente a las celdas respecto de posibles rupturas, [2].

El encapsulado de las celdas en módulos y su durabilidad determinan el tiempo de vida de cualquier sistema fotovoltaico. Por ello es necesario observar las fallas que se presentan con frecuencia para tratar de solucionarlas. Entre las fallas más comunes en módulos fotovoltaicos se tienen las siguientes:

- Ruptura de las celdas por esfuerzos térmicos, por golpes (piedras) o intencionalmente por vandalismo.
- Corrosión de los contactos y las interconexiones.

- Cambios de las propiedades ópticas (decoloración) de los materiales encapsulantes.
- Ruptura de las conexiones entre celdas debido a un mal diseño.

El sometimiento de los módulos a pruebas aceleradas bajo diversos ciclos térmicos y de carga mecánica, humedad extrema, y de radiación ultravioleta por tiempos prolongados, ha permitido la mejoría de los módulos, de forma que actualmente tienen un tiempo de vida esperado del orden de 20 años.

2.12.3 Vidrio para cubierta frontal y material para cubierta posterior

La función principal de la cubierta frontal consiste en transmitir la mayor cantidad de luz y de brindar protección y rigidez al panel solar de los factores climáticos.

Comúnmente en los módulos comerciales en la parte frontal se utiliza vidrio templado bajo en hierro, [27]. Este tipo de vidrio tiene la característica de una alta transmisión de la luz, baja reflexión, alta resistencia a los impactos, también resiste cambios bruscos de temperatura y tensiones térmicas seis veces mayores que un vidrio sin temprar. Su temperatura máxima de trabajo es de 300 °C. Es el material ideal para la encapsulación de los paneles solares. Incluso en caso de ruptura, el vidrio templado térmicamente se fragmenta en pedazos muy pequeños, reduciendo al máximo el riesgo de heridas y daños materiales de personas u objetos que puedan encontrarse cerca.

En la cubierta posterior su misión consiste en proteger al panel solar contra las condiciones más severas del medio ambiente, ejerciendo una barrera que no permite la penetración de la humedad. Se conforma por capas de Tedlar (fluoruro de polivinilo (PVF) que al ser opacas y de color blanco, reflejan la luz que ha logrado pasar por las celdas, haciendo que vuelva a la parte frontal, donde puede ser reflejada e incidir de nuevo en las celdas, [28].

2.12.4 Marco de soporte

El marco de soporte se encarga de proteger de los golpes laterales y dar rigidez al panel, además permite la penetración del emparedado. El material más usado para el marco es aluminio anodizado; las estructuras de aluminio son aptas para todo tipo de clima, tienen un excelente desempeño en ambientes lluviosos o salinos, debido a su alta resistencia a la corrosión, lo que hace que su vida útil sea más prolongada, además tiene mucha firmeza estructural en la construcción de marcos y permite perfiles muy esbeltos en sus diseños, [29].

3 Proceso de fabricación del panel fotovoltaico

3.1 Clasificación de celdas solares

Generalmente, en el proceso de fabricación de un panel fotovoltaico, uno de los primeros pasos a realizar es la selección del tipo de celdas a usar, dependiendo de los requerimientos de potencia. Después de llevar esto a cabo, se debe realizar una clasificación de las celdas de acuerdo a sus características eléctricas, para obtener un correcto funcionamiento del panel y aprovechar adecuadamente el potencial de cada celda solar en lo individual. Como ya se mencionó anteriormente, las celdas de silicio monocristalino entregan una mayor eficiencia de conversión de la luz, razón por la que se decidió trabajar con este tipo de celdas. Además, en términos de mercado son fácilmente adquiribles. Para la realización de este trabajo de tesis se usaron celdas solares con dimensiones de 12.5 cm x 12.5 cm por lado. Estas tienen espesores de 250 micras, en la parte frontal se observan las rejillas de contacto y 2 bandas de conducción que son las que colectan la corriente generada en la celda; en la parte posterior tienen 2 buses de contacto los cuales son depósitos de plata mediante serigrafía y el resto de la superficie es un material conductor, usualmente plomo con plata. Las características eléctricas típicas del tipo de celdas seleccionadas corresponden a un voltaje de circuito abierto de 0.6 V y una corriente de corto circuito de 5 A. En la Figura 3.1 se muestra el tipo de celdas empleadas en este trabajo de tesis.

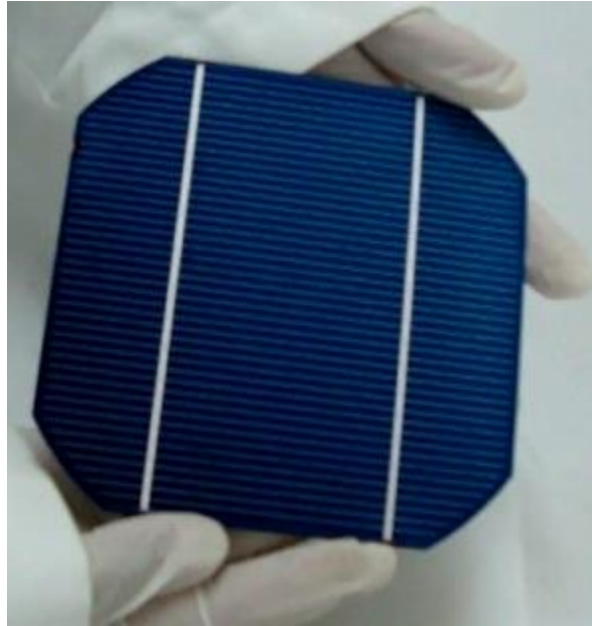


Figura 3. 1 En la imagen se muestran algunas de las celdas empleadas en la construcción del panel.

3.2 Curvas corriente-voltaje

Para la obtención de las curvas I-V de las celdas solares se utilizó un simulador solar Oriel Newport 2A, el cual nos proporciona el espectro de la norma solar AM1. Como se mencionó en el capítulo anterior, para la obtención de las características eléctricas, se requiere de un sistema eléctrico que lleve a cabo un barrido de voltajes sobre la celda solar y detecte la corriente generada en condiciones de iluminación. El sistema diseñado y fabricado para tal propósito se muestra en detalle en el apéndice A.

En cuanto a las características eléctricas de las celdas al momento de obtener sus curvas I-V, se observó que éstas variaban. Esto ocurre en ocasiones, dependiendo del proveedor y del costo que estos dispositivos presenten. En estos casos las celdas se clasifican de acuerdo a sus valores de corriente en corto circuito, voltaje a circuito abierto y factor de llenado. En el grupo A se ubicaron las celdas con las eficiencias más altas y curvas I-V similares este se dividió en A1 y A2; en el grupo B las de menor eficiencia pero con características eléctricas parecidas y en el grupo C se

ubicaron todas las celdas que se diferenciaban de modo importante de los grupos A y B. En el apéndice C se describe detalladamente el proceso de caracterización eléctrica de las celdas. En la Figura 3.2 se observa la clasificación de las celdas.



Figura 3. 2 Clasificación de celdas solares.

En esta etapa la clasificación de las celdas es muy importante porque de estas dependerá la eficiencia de conversión de energía de todo el Panel.

3.3 Cintas e interconexión

Este tipo de materiales no existe en el mercado nacional. Debido a esto se empleó un diseño propio, usando materiales que estuviesen disponibles. Las características de estas cintas se eligieron de acuerdo a las dimensiones de las bandas de conducción de las celdas solares además de presentar alta conductividad, maleabilidad, delgadas y soldables. Buscando que las cintas de interconexión tuvieran una mayor conductividad y durabilidad se eligieron los siguientes materiales: Hoja de Latón la cual es una aleación del cobre y zinc, es muy maleable y resistente a la corrosión, [30]. Se realizó un depósito de níquel y oro buscando las características ideales en cuanto a funcionalidad y estética, es decir, resistencia a la corrosión, maleabilidad, ductilidad y buena conducción. Por último se realizó un baño de soldadura blanda con una aleación 60% estaño y 40% de plomo. Esta presenta características muy moldeables y nos asegura la conexión eléctrica durante tiempos prolongados.

También se utilizó un fundente para soldar que es una solución líquida que remueve el óxido de las superficies y permite que la soldadura se deposite uniformemente en el material.

Como primer paso en la elaboración se hizo un depósito de níquel en la hoja de latón; el depósito se realizó en un laboratorio ajeno a la universidad debido a que no se cuenta con el equipo apropiado; posteriormente se cortaron cintas de 15 cm de largo por 2mm de ancho, se utilizaron estas dimensiones de acuerdo a las bandas de conducción de las celdas. Una vez cortadas las cintas se realizó una limpieza profunda para que posteriormente se realizara una deposición de oro en una solución de 24 Quilates alcanzando un espesor de 150 micras. Por último se llevó a cabo una limpieza profunda con ultrasonido para eliminar cualquier impureza, grasa o suciedad que pudieran provenir del proceso anterior. Como paso Final se realizó el estañado de las cintas iniciando con un baño de fundente líquido en cada una de las cintas para que inmediatamente después se fueran sumergiendo una a una en el estaño líquido y así logrando un espesor de 200 micras.

Los resultados que se obtuvieron fueron cintas muy maleables con un buen aspecto físico, y logrando espesor de 200 micras. En la Figura 3.3 se observa el acabado de las cintas fabricadas.



Figura 3. 3 Cintas de interconexión.

3.4 Montaje de matrices o cadenas de celdas solares.

Para realizar la operación de formar las cadenas que integran el panel fotovoltaico, se hizo una base de madera forrada de formica con un canal de aluminio fijo diseñada especialmente para el desplazamiento de las celdas y que permita la fijación de estas; también se utilizó un soldador punta de lápiz de potencia baja, un fundente líquido para soldar celdas solares, un rollo de soldadura, guantes y las cintas de interconexión elaboradas anteriormente. Para elaborar las cadenas se eligieron 36 celdas del grupo A que fueron las que presentaron mejores características eléctricas y físicas. En esta etapa se realiza la interconexión de celdas en serie, formando 4 cadenas de 9 celdas cada una. El proceso inicia soldando las cintas de interconexión en forma paralela en la parte frontal de cada una de las celdas; una vez finalizada esta operación se comienza por la parte trasera pero ahora se van conectando en serie una seguida de otra hasta formar una cadena de 9 celdas y así se continúa el proceso hasta tener 4. En las Figuras 3.4 y 3.5 se ilustra esta parte del proceso de formación de cadenas de celdas solares.

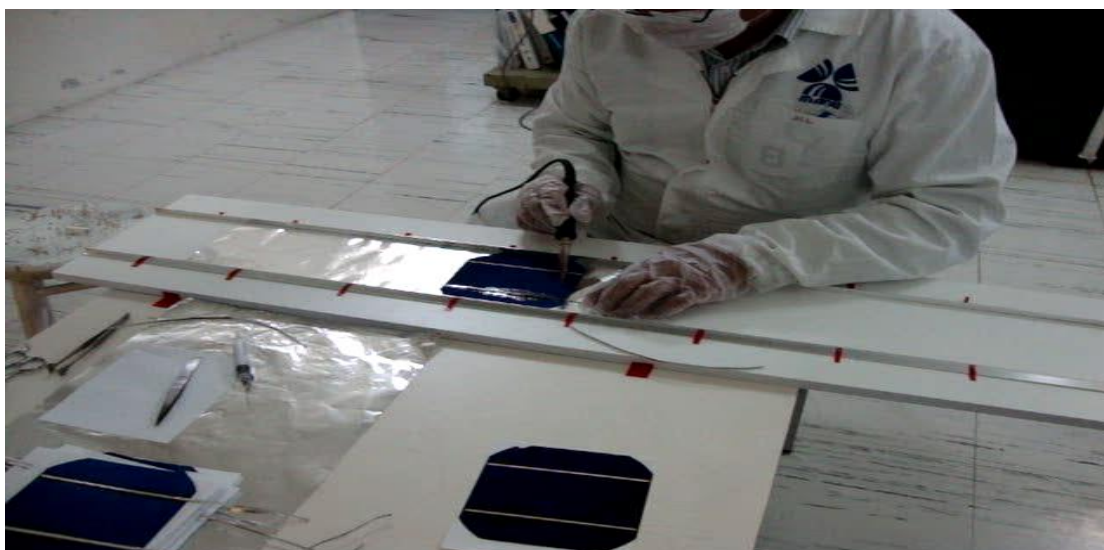


Figura 3. 4 En esta imagen se aprecia la forma en que se soldán las celdas por la parte frontal.



Figura 3. 5 En esta figura se aprecia la forma en que se fueron soldando las celdas por la parte posterior hasta formar una tira de 9 celdas.

Una vez formadas las 4 cadenas con tiras de 9 celdas en serie, tal como se muestra en la Figura 3.6, se procede a la medición de voltaje y corriente de cada cadena lo cual se muestra en la Figura 3.7. La intención es verificar que las soldaduras sean de la calidad necesaria para que no existan falsos contactos. Este paso es estrictamente necesario ya que una vez encapsuladas las celdas solares no sería posible llevar a cabo ningún tipo de reparación.

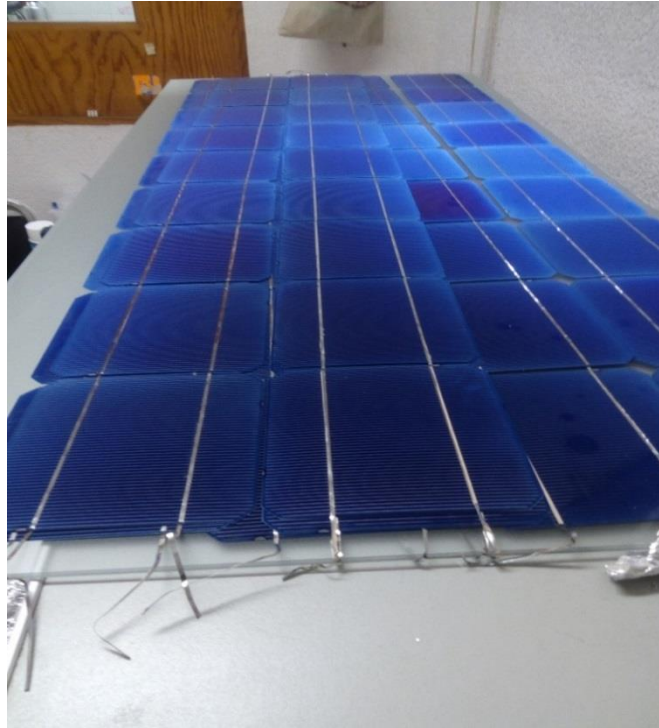


Figura 3. 6 En esta imagen se aprecian las 4 cadenas ya terminadas.



Figura 3. 7 Medición de corriente y voltaje en cada una de las cadenas para asegurar que en el proceso de soldado fue exitoso.

Una vez que se ha verificado que no existen soldaduras defectuosas, mediante las mediciones eléctricas y la inspección visual, se procede a preparar las condiciones

para encapsular las celdas solares, empleando la cubierta inferior, el vidrio frontal de protección y el marco de soporte de toda la estructura.

3.5 Construcción del marco

La función del marco de aluminio es fijar las diferentes partes que comprenden las celdas solares encapsuladas y las cubiertas frontal y posterior del panel solar, así como dar la rigidez necesaria a toda la estructura. Para esto normalmente se emplea aluminio anodizado por su resistencia y durabilidad que este tiene a los agentes externo (agua, ambientes salitroso, rayos UV, etc.) además de su ligereza, fortaleza, aislación además de su acabado estético. También se utiliza una maquina cortadora y pegamento de silicón.

Las dimensiones del marco dependerán de la longitud y ancho del arreglo fotovoltaico, así como de las tolerancias con los bordes del vidrio de protección, las cuales usualmente están en función de las dimensiones de las interconexiones entre cadenas de celdas. Para este trabajo las dimensiones del marco de aluminio se determinaron en 118 cm x 54 cm. Después se procede a cortar las varillas de aluminio y se lijan un poco en los cortes hechos; en seguida se realiza una limpieza para que estén libres de grasa u otro tipo de suciedad y posteriormente se comienza a unir las varillas con silicón para formar el marco.

Una de las características que presenta el marco es su resistencia a los impactos y la rigidez que brindará al panel lo cual es de suma importancia.

3.6 Cubiertas frontal y posterior

La cubierta frontal del panel tiene la función de proteger a las celdas de los impactos y de permitir la mayor incidencia de luz además de soportar las inclemencias del tiempo. Por esta razón se eligió un Vidrio Templado el cual presenta características de resistencia mecánica y térmica, además es considerado un vidrio de seguridad

porque al fracturarse se desintegra en pequeños fragmentos de aristas redondeadas, que no causan heridas cortantes o lacerantes. Las dimensiones son las mismas que tiene el marco de aluminio, es decir, 118 cm x 54 cm.

Como cubierta posterior se eligió una lámina de TPT (Tedlar poliéster tedlar) Tedlar es el nombre de marca de la empresa química estadounidense US-DuPont y se refiere a fluoruro de polivinilo (PVF), un material de fluoropolímero termoplástico que presenta alta resistencia a la intemperie y resistencia inherente, tiene una baja permeabilidad de la humedad, vapor, aceite y se puede utilizar en una amplia gama de temperaturas de entre -70°C a $+110^{\circ}\text{C}$, [31].

El TPT como cubierta posterior ayuda a mejorar la vida útil del panel, además el color blanco le da la ventaja de que la luz que entra la refleja sobre el vidrio y así este la incide sobre las celdas, también el color blanco sirve para que no se concentre el calor y caliente demasiado las celdas cuando estén operando.

Como sabemos la cubierta frontal y posterior son las principales barreras contra los factores externos dañinos, como el agua, vapor y suciedad. Las dimensiones de la lámina de TPT son las mismas que las del vidrio como cubierta frontal.

En esta etapa se realiza la unión del marco de aluminio con el vidrio ocupando el silicón previamente utilizado. Antes se realiza una limpieza al vidrio para retirar cualquier tipo de suciedad o grasa que pueda tener, en la figura 3.8 se puede observar la estructura resultante. También se sacan las dimensiones del laminado de TPT y posteriormente se corta. Además se le da una limpieza para retirar suciedad y grasa. Así se dejan Listos para utilizarse en la etapa de ensamble.



Figura 3. 8 Estructura que conforma el soporte del arreglo de celdas solares.

3.7 Encapsulado

Los módulos comerciales en su mayoría se encapsulan en láminas EVA (Etileno Vinil Acetato) como ya se mencionó anteriormente, pero el uso de este tipo de material requiere de un tratamiento térmico en hornos y sistemas de vacío de muy alto costo, Una alternativa que es empleada en la industria de los paneles solares es el uso de resinas derivadas del silicón, las cuales han mostrado excelentes propiedades en cuanto a hermeticidad se refiere, así como a la resistencia a los rayos UV. Pruebas de campo han mostrado que la transparencia de esta clase de resinas se mantiene prácticamente invariable aún después de 20 años de exposición a la radiación solar. Para este trabajo esta opción se eligió, considerando la relativa facilidad y economía en su uso.

La clase de resina derivada del silicón que se empleó es un elastómero de la marca Dupont. El elastómero de silicón es muy transparente y se conforma de dos componentes líquidos A/B (base y el agente de curado), este se mezcla en una proporción de 10:1, de 10 partes de base a 1 del agente de curado, en cuanto al peso o volumen. Cuando los componentes líquidos se mezclan, la mezcla cura a un elastómero flexible. Tiene una reacción de curado que comienza con el proceso de la mezcla. Inicialmente la curación se evidencia por un aumento gradual de la

viscosidad, seguido por la gelificación y la conversión aun elastómero sólido. La vida útil es definida como el tiempo requerido en el que la mezcla A/B se hace viscosa. El elastómero de silicón tiene una vida útil > 2 horas.

Algunas de sus aplicaciones son en protección de los aparatos eléctricos y electrónicos en energía solar, Encapsulado de celdas solares y cajas de conexiones. En esta etapa se preparó la mezcla de la resina que viene en 2 partes A/B estas se mezclaron muy bien y se deja lista para utilizarla en la etapa de ensamble final.

3.8 Ensamble

Este proceso se hace en una zona muy restringida y limpia ya que durante el proceso el prototipo de panel solar quedará expuesto en el ambiente que se encuentre, hasta que seque muy bien la resina. Se procura utilizar una mesa muy plana en la cual nos permita realizar el proceso en las mejores condiciones. Además en esta etapa se utiliza todo lo que se ha venido preparando en las etapas anteriores para hacer el ensamble del PMFV.

Iniciando con el proceso, se hace una limpieza profunda al vidrio junto con el marco y se coloca sobre la mesa, se procura que esta quede muy bien nivelada. Ya con la resina preparada se comenzó aplicando una delgada capa sobre la cara de las celdas que contienen las cadenas y al mismo tiempo se aplica una pequeña capa de resina sobre el vidrio; una vez terminado este proceso se procede enseguida a colocar las cadenas una a una sobre el vidrio. Se va formando el arreglo de la matriz muy bien colocado con la dimensión de separación entre cadenas determinada, que es de 3mm. Una vez que están bien ubicadas se deja pasar un tiempo para que comience a endurecer la resina. Después se realiza la interconexión de las cadenas formando una sola cadena de 36 celdas. Terminada la interconexión se procede a aplicar otra capa de resina para que estas queden sumergidas en la resina y se espera durante un lapso de 3 horas. Antes de que la resina se seque completamente, se coloca el laminado de TPT para que selle la parte posterior del panel y se sacan los contactos que irán directo a la caja de conexiones. Después se espera que seque la resina totalmente, lo cual, dependiendo de la temperatura, puede durar hasta 12 hrs. En las

Figuras 3.9 – 3.11 se aprecian las etapas del encapsulado de las celdas solares y la colocación del TPT.



Figura 3. 9 Arreglo de celdas solares unidas al vidrio de la cubierta frontal mediante el material encapsulante.



Figura 3. 10 Arreglo de celdas solares completamente inmersas en el material encapsulante.



Figura 3. 11 Tiras de contacto del arreglo fotovoltaico para conectarse a la caja de conexiones.

3.9 Caja de conexiones, varillas de soporte y colocación de tornillos

En esta etapa se utiliza una caja plástica de conexiones que en el interior cuenta con diodos de protección que tienen como objeto el evitar los efectos que se producen por los puntos calientes y sombreados, que pueden afectar negativamente al rendimiento del panel, [32]. Además, opcionalmente se puede colocar varillas de aluminio anodizado con las mismas dimensiones que el marco para darle mayor rigidez a la estructura. También se utilizan unos tornillos de cabeza plana para mantener unidos los marcos de aluminio externo e interno y dar una mejor estética al prototipo.

La caja de conexiones, generalmente maneja una corriente mayor a la que generará el arreglo fotovoltaico. Como se mencionó, tiene uno o dos diodos que protegen tanto el arreglo de celdas solares, como la vida de las baterías en condiciones de oscuridad. En la Figura 3.12 se muestra el panel con la caja de conexiones ya fija en la cubierta posterior.



Figura 3. 12 Caja de conexiones unida a la cubierta posterior del panel fotovoltaico.

Un procedimiento que es común en esta parte final del ensamblaje, es proteger los contactos exteriores cubriéndolos con silicón. Para llevar esto a cabo, la caja de conexiones se llena completamente con un tipo de silicón, generalmente sin contenido de acético, permitiendo que éste seque completamente y después colocando la tapa de la caja, la cual sella herméticamente. También se aplica silicón en el contorno del marco y se coloca un marco interior, usualmente de mayor rigidez que el marco exterior, para asegurar el sellado del arreglo y a la vez ofrecer mayor rigidez a la estructura. En la Figura 3.13 Se aprecia el panel conteniendo la caja de conexiones en su parte posterior.



Figura 3. 13 Vista del panel fotovoltaico con la caja de conexiones ya sellada.

Finalmente, se atornillan los marcos y así se finaliza el panel fotovoltaico, en la Figura 3.14 se muestra el prototipo terminado y listo para realizar las mediciones eléctricas correspondientes y determinar así su eficiencia de conversión de energía.



Figura 3. 14 Vista del Panel Fotovoltaico terminado.

4 Mediciones y resultados

4.1 Curvas corriente –voltaje del panel solar

En este capítulo se presentan los resultados del panel solar fabricado en su comportamiento eléctrico y la comparación de este con un panel comercial en cuanto a características físicas como eléctricas. Para llevar esto a cabo, como se mencionó anteriormente, se diseñó y construyó un sistema que permitiera obtener las curvas de corriente-voltaje del panel, bajo condiciones de iluminación. La descripción de este sistema se da en el Apéndice A.

Es importante señalar que las pruebas que un panel solar requiere, son diversas y variadas, si bien las más importantes son las eléctricas y de hermeticidad. Las pruebas sobre impacto implican el uso de sistemas que no están disponibles en nuestro laboratorio. Sin embargo, a los vidrios templados, que son proporcionados por la compañía Macrivcel, se les hacen diversas pruebas de impacto en esa compañía. En lo referente a la hermeticidad, debe mencionarse que ha sido un proceso de diversas experiencias a través de varios años. Mediante el uso de materiales confiables, apropiados y de buena calidad, se ha logrado la obtención de paneles solares que satisfacen ampliamente los requerimientos de hermeticidad. De hecho, existen varios paneles que tienen algunos años funcionando correctamente sin mostrar ningún signo de deterioro. Actualmente se han instalado sistemas autónomos con paneles solares en dos dependencias de nuestra institución (CUVyTT y CIDS) para iluminación externa. Con casi tres años de funcionamiento correcto, los paneles tienen la misma apariencia que cuando se instalaron.

Con respecto a las pruebas eléctricas, considerando que no se dispone de un simulador solar de las dimensiones que el panel requiere, estas se llevaron a cabo empleando la radiación del sol directamente. Como prueba inicial se realizaron mediciones de corriente-voltaje a un panel solar comercial, cuyas especificaciones son proporcionadas por el fabricante. Las mediciones se hicieron en días no nublados empleando el sistema I-V fabricado en este trabajo de tesis, así como un osciloscopio. Para conocer las condiciones de intensidad en la radiación, es

necesario disponer de un equipo para medir este parámetro. Para la medición de la Irradiancia (W/m^2) se utilizó un piranómetro. Los resultados de estas mediciones indican una buena correspondencia con los que el fabricante especifica.

Los resultados que se obtuvieron del prototipo en cuanto al aspecto físico fueron muy satisfactorios se obtuvo un panel con un encapsulado transparente y bien distribuido, con las interconexiones bien alineadas, un marco de aluminio muy original que le da un buen acabado y además le permite drenar el agua de la parte frontal, en general un panel muy estético por lo que se cumplió con los objetivos planteados, en la Figura 4.1 se puede observar.



Figura 4.1 Prototipo de Módulo fotovoltaico finalizado.

4.2 Panel comercial W750-75 Wp

El panel W750 es fabricado por la empresa Webel- SI Energy System Ltd, este panel se conforma de 39 celdas solares de silicio monocristalinos de forma semicircular conectadas en serie, su cubiertas frontal es de vidrio templado, su cubierta posterior de TEDLAR, cuenta con un marco de aluminio anodizado y el encapsulado de las celdas es de EVA (Etileno Vinil Acetato), en la siguiente Figura 4. 2 podemos observar sus características físicas.



Figura 4. 2 Panel comercial W750-75 Wp, parte frontal y posterior

Las dimensiones del panel son (1258 x 588 x 34) +/- 2mm, las celdas cuentan con un área efectiva de 151.65 cm², En la siguiente Figura 4.3 podemos ver la tabla de especificaciones y sus parámetros eléctricos.

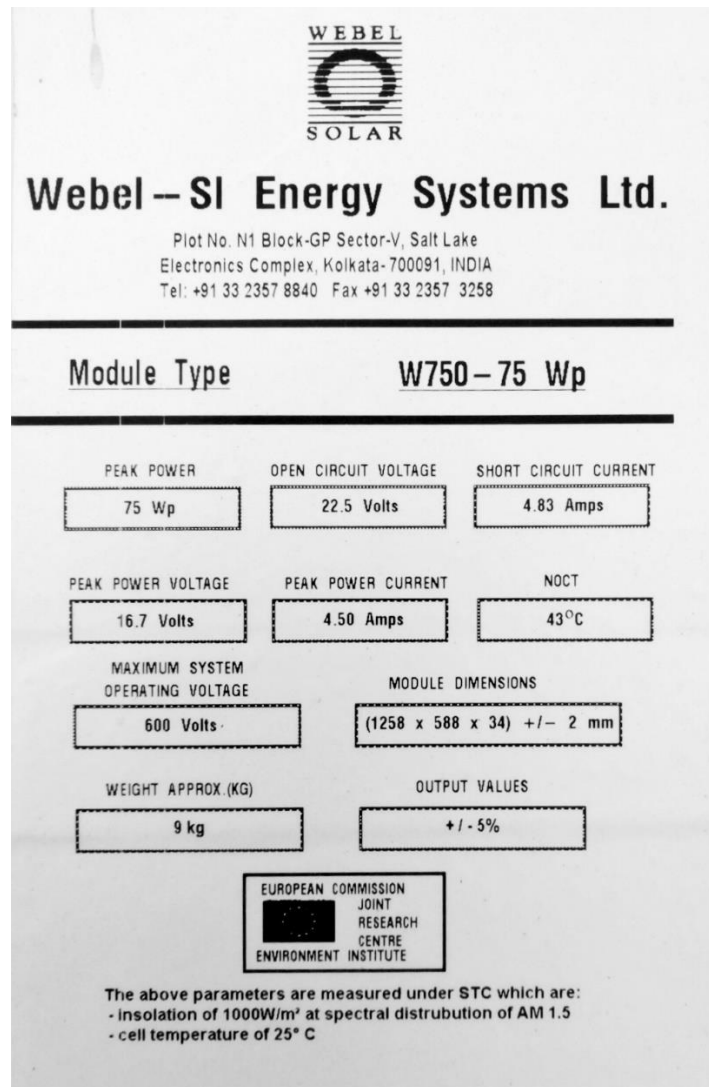


Figura 4. 3 Tabla de especificaciones del panel W750-75 Wp.

4.3 Caracterización eléctrica del prototipo de modulo fotovoltaico

La curva de un panel solar representa las posibles combinaciones de corriente y voltaje bajo ciertas condiciones ambientales determinadas (radiación solar incidente y temperatura ambiente) ver figura 4.4. Generalmente las celdas dentro del módulo fotovoltaico se asocian en serie, con el fin de obtener unos valores de voltaje más apropiados (el voltaje de una celda estándar suele ser de unos 0.6V). El voltaje total del módulo dependerá, del número de celdas asociadas en serie. Por el contrario, la corriente que podemos obtener del módulo fotovoltaico va a depender básicamente

del tipo y tamaño de celdas (suponiendo que no haya celdas conectadas en paralelo en el interior del módulo).

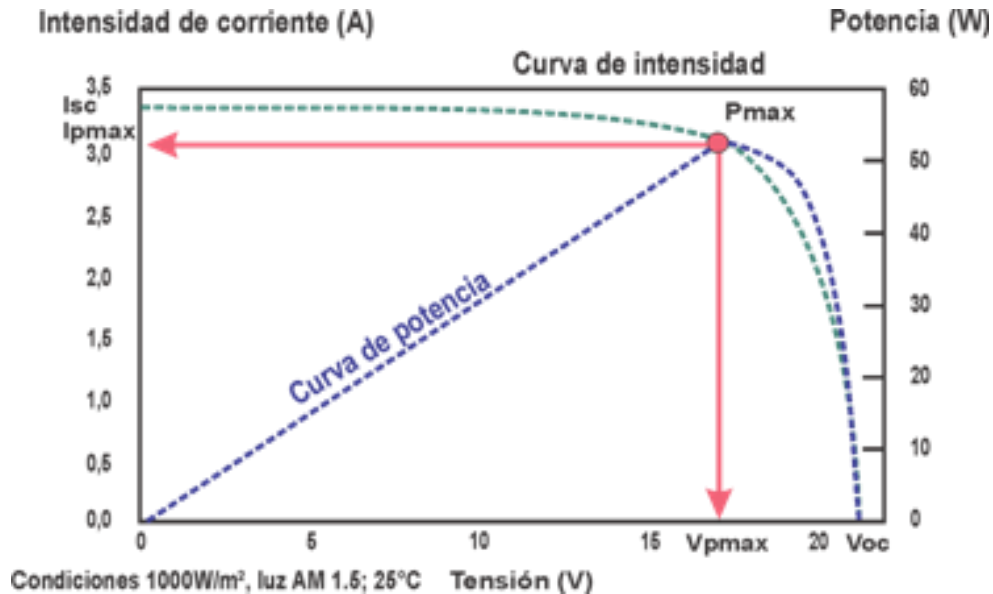


Figura 4. 4 Curva característica I-V de un Panel solar.

4.4 Principales parámetros de la característica I-V de un panel solar.

En el capítulo 2 ya se mencionaron las características eléctricas de una celda solar y prácticamente son las mismas, se mencionan solo para recordar los puntos importantes de la curva característica del Panel.

- Corriente de cortocircuito (I_{cc}): es la máxima corriente que producirá el dispositivo bajo ciertas condiciones definidas de iluminación y temperatura, correspondientes a un voltaje igual a cero.
- Voltaje de circuito abierto (V_{ca}): Es el máximo voltaje del dispositivo bajo unas condiciones definidas de iluminación y temperatura, correspondientes a una corriente igual a cero.

- Potencia máxima (P_{max}): Es la máxima potencia que producirá el dispositivo en unas condiciones determinadas de iluminación y temperatura, correspondiente al par máximo I-V.
- Corriente en el punto de máxima potencia (I_{pmp}): Es el valor de la corriente para P_{max} en unas condiciones determinadas de iluminación y temperatura.
- Voltaje en el punto de máxima potencia (V_{pmp}): Es el valor de voltaje para P_{max} en ciertas condiciones determinadas de iluminación y temperatura.
- Factor de forma (FF): Es el valor correspondiente al cociente entre P_{max} y el producto de I_{cc} x V_{ca} . Puede venir expresado en tanto por ciento o tanto por 1, siendo el valor 100% el que corresponderá a un hipotético perfil de cuadrado, no real. Nos da una idea de la calidad del dispositivo fotovoltaico, siendo éste tanto mejor cuánto más alto sea su factor de forma.

Los valores típicos del punto de máxima potencia en celdas son:

$$V = 0.6 \text{ volts a } 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$I = 25 \text{ a } 30 \text{ mA/cm}^2 \times A$$

$$A = \text{área de la celda en cm}^2$$

Para una insolación menor la corriente disminuye proporcionalmente pero el voltaje disminuye muy lentamente, [21].

4.5 Resultados y pruebas de los parámetros eléctricos de un módulo fotovoltaico comercial y del prototipo.

Para obtener las curvas I-V el equipo que se utilizó fue un osciloscopio, un trazador de curvas, un piranómetro. Las condiciones bajo las que se realizaron las pruebas fue en un horario de 12:30 a 16:00 horas, temperatura de 25 °C, incidencia normal con diferentes Irradiancias: 930, 840 y 500 W/m².

En la siguiente Figura 4.5 se observan las gráficas que se obtuvieron del panel comercial W750-75 Wp con diferentes irradiancias y se puede observar como varia los parámetros eléctricos.

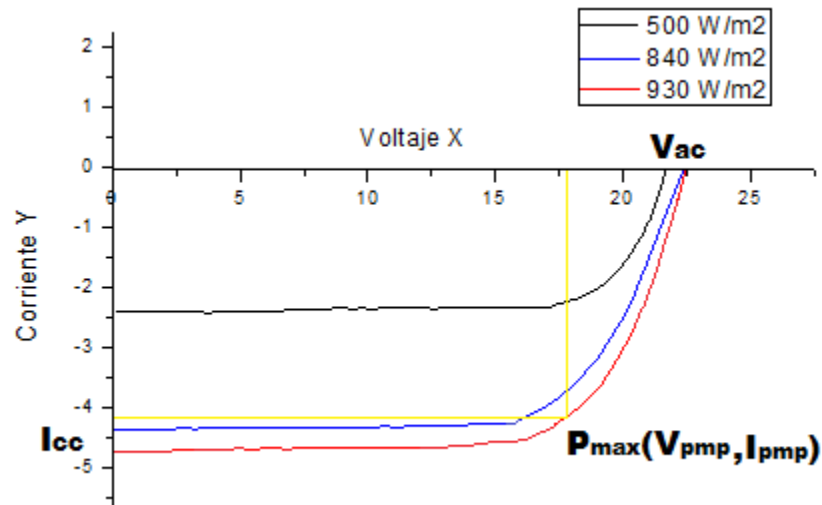


Figura 4.5 Curvas I-V del panel comercial W750-75 Wp con diferentes irradiancias de 500, 840 y 930 W/m² a 25 °C.

En las Figuras 4.6 y 4.7 se puede observar el comportamiento del prototipo en oscuridad y bajo iluminación con diferentes irradiancias 500, 840 y 930 W/m² se puede ver cómo varían los parámetros eléctricos con el cambio de la irradiancia.

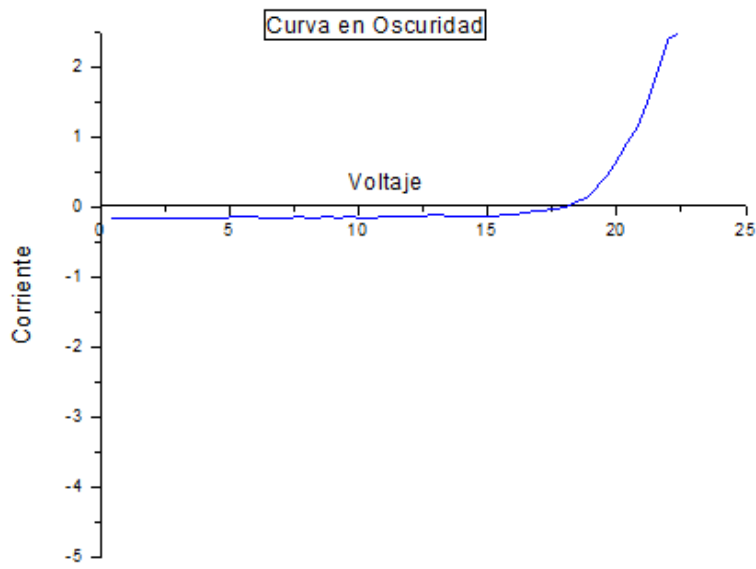


Figura 4. 6 Se observa el comportamiento de la curva I-V en oscuridad del prototipo de PMFV.

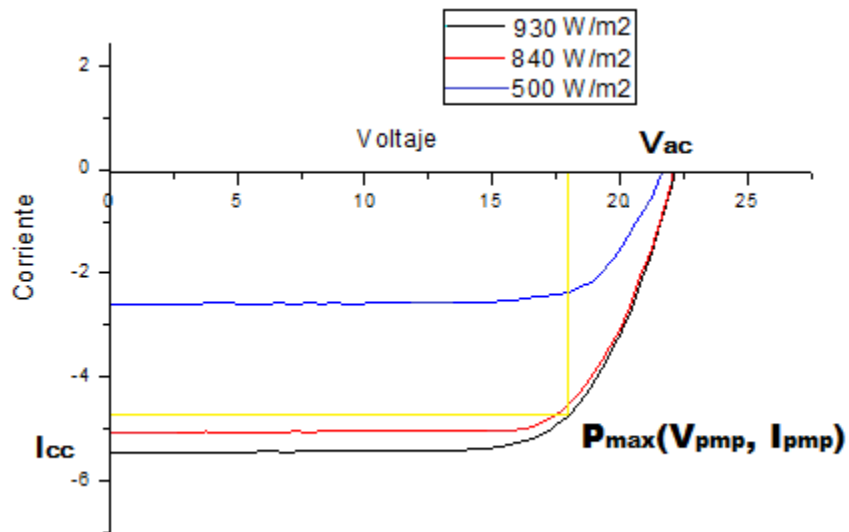


Figura 4. 7 Graficas I-V del PMFV, se observa el comportamiento a diferentes Irradiancias de 500, 840 y 930 W/m² y una temperatura de 25 °C

En la Tabla 4-1 se realiza la comparación del panel comercial W750-75 Wp con el prototipo se observa como varían los parámetros eléctricos con las curvas obtenida en las figuras anteriores con una irradiancia de 930 W/m² y a una temperatura de 25 °C.

Tabla 4- 1 Parámetros eléctricos de las curvas I-V del panel comercial W750-75 Wp y el PMFV.

Parámetros eléctricos de los paneles solares									
	Irradiancia	Temp.	Vac	Icc	Vmax	Imax	Pmax	FF	Eficiencia
Panel Comercial	930 W/m ²	25 °C	22.50 V	4.80 A	17.60 V	4.20 A	73.92 W	0.68	14.56
Prototipo de PMFV	930 W/m ²	25 °C	22.00 V	5.40 A	17.75 V	4.73 A	83.95 W	0.70	16.05

Se puede ver una ventaja en los parámetros eléctricos del prototipo y la eficiencia de conversión de energía es mayor que en el panel comercial.

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede decir que se alcanzaron los objetivos planteados. El prototipo cumple con las características tanto físicas como eléctricas deseadas.

4.6 Estudio técnico-económico del prototipo de módulo fotovoltaico

Uno de los objetivos del estudio técnico-económico es el de suministrar la información que permita cuantificar el monto de las inversiones necesarias para la instrumentación del proyecto, así como los costos de operación que se van a generar en el mismo.

El estudio Económico busca determinar ¿Cuál es el monto total de recursos económicos necesarios para la realización del proyecto? y convertir las decisiones y requerimientos de tipo técnico a valores monetarios, asumiendo cotizaciones a

precios existentes en el mercado para el periodo en el cual se está realizando el estudio.

En la Tabla 4.2 se muestra la distribución de costos del material que se utilizó para la fabricación del PMFV.

Tabla 4- 2 Se muestra la distribución de costos de material para el PMFV.

Materiales Directos	Unidad de Medida	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Celda Solar	12.5 X 12.5 cm	36	\$54.60	\$1965.00
Material Encapsulante (Resina)		1	\$450.00	\$450.00
Tedlar	1 Lamina 118X54	1	\$137.00	\$137.00
Vidrio templado	1 vidrio de 118X54 cm	1	\$225.00	\$225.00
Marco de Aluminio	344 cm	1	\$185.00	\$185.00
Tornillos		14	\$2.00	\$28.00
Caja de Conexiones		1	\$195.00	\$195.00
Cables		2	\$37.00	\$74.00
Silicón de sellado		1	\$20.00	\$20.00
Cintas conductoras	550.8cm	1	\$7.00	\$7.00
Soldadura		1	\$3.00	\$3.00
Fundente Flux		1	\$2.00	\$2.00
Costo Total				\$3,291.00

4.7 Proceso de fabricación de un módulo fotovoltaico

En el diagrama de flujo de la Figura 4.8 se muestra el proceso de fabricación del PMFV.

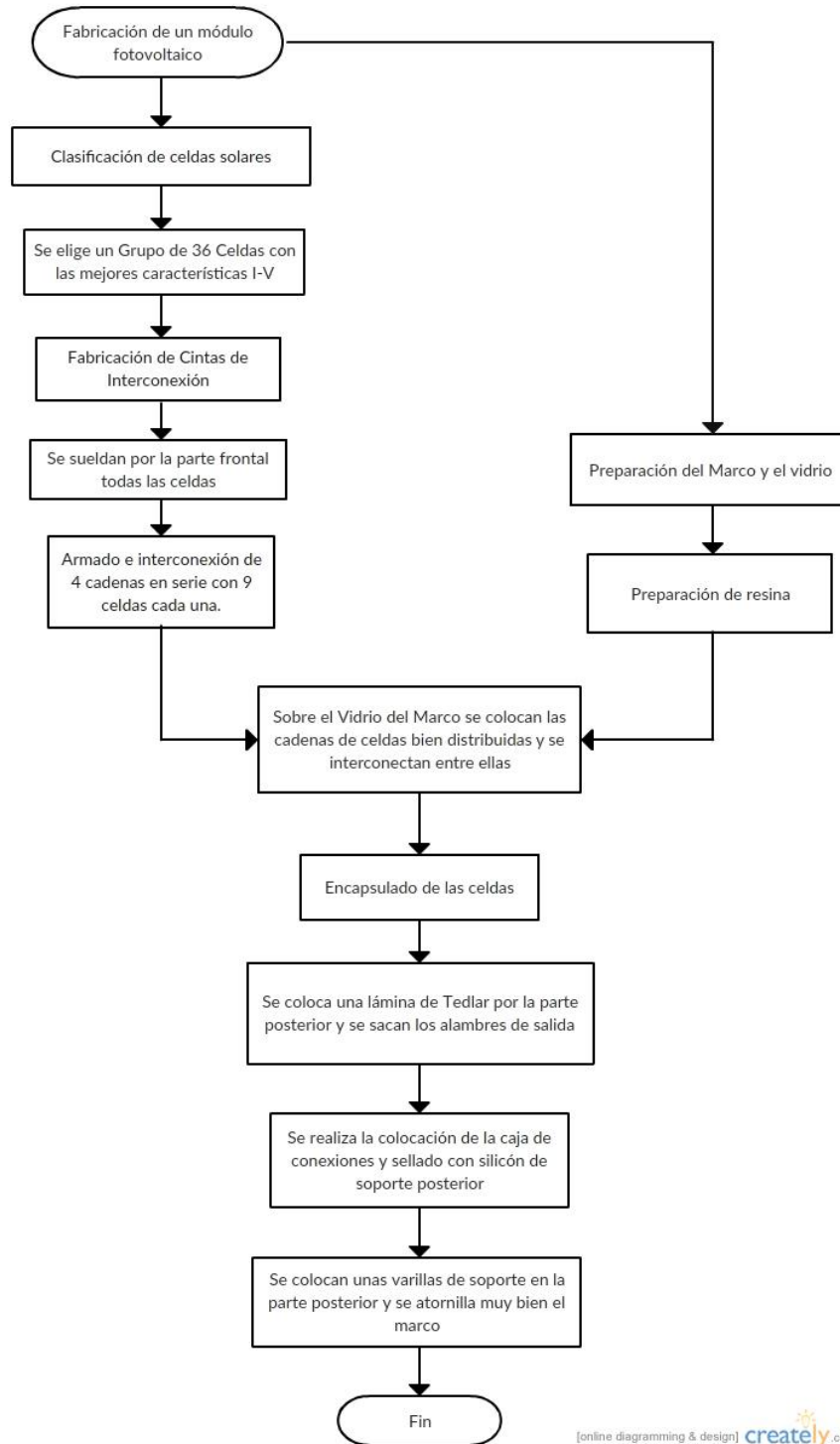


Figura 4. 8 Diagrama de proceso de fabricación del prototipo de módulo fotovoltaico

5. Conclusiones

Este trabajo de tesis ha sido producto de un desarrollo que se inició desde hace varios años en el área de aplicaciones fotovoltaicas del Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores. El producto presentado es el primer prototipo que comprende un proceso integral en términos de diseño, selección de materiales y técnica de fabricación.

El diseño y la fabricación de un PMFV, con base en celdas solares de silicio, resultó en un producto confiable en términos de operación, con apariencia similar a los paneles comerciales y con un costo aceptable en los materiales de fabricación.

Al comparar el PMFV con el panel comercial W750 se identificaron algunas ventajas en los parámetros eléctricos obtenidos en el prototipo, la eficiencia de conversión de 16.05% con 14.56% del panel comercial. En cuanto al aspecto físico se notaron algunas ventajas en el prototipo como en el diseño del Marco metálico, la caja de conexiones e incluso el encapsulado que es más transparente. Además en el proceso de elaboración no se utilizó ningún tipo de mecanismo de alto costo.

La eficiencia de conversión energética que se obtuvo para la Irradiación empleada, indica que las condiciones y procesos de interconexión, encapsulado y sellado son adecuadas, como para poder esperar un funcionamiento estable y duradero del PMFV.

Para el objetivo planteado de la fabricación del PMFV, se requirió un conocimiento del comportamiento eléctrico, lo cual llevó a diseñar y construir, como parte de este trabajo, un sistema electrónico que permitiera la medición de los principales parámetros eléctricos para obtener la eficiencia de conversión energética del módulo fotovoltaico.

La experiencia adquirida en el desarrollo de este trabajo de tesis, ha permitido a la fecha una simplificación del proceso de fabricación de esta clase de módulos, empleando a la vez los materiales más adecuados y aún a menores costos que los empleados para este trabajo, así como un proceso más sencillo y confiable. Esto

permitirá emplear módulos de mayor tamaño, con diferentes potencias y también diferentes geometrías que podrán emplearse en aplicaciones específicas.

Bibliografía

- [1] Fernández G. J., y Herrero S., Energías renovables para el desarrollo., España: Thomson Paraninfo, 2009.
- [2] A. M. Acevedo, Eléctricidad que viene del sol: Una fuente de energía limpia, México D.F., 2003.
- [3] Biblioteca de electricidad/informatica, Energía Solar Fotovoltaica, España: Orbis- Marcombo, 1986.
- [4] Comisión federal de electricidad, Fuentes Alternativas de energía, México: CONAE.
- [5] Asociación de la industria fotovoltaica, Energía solar fotovoltaica en la comunidad autónoma de las Illies Balears, Illes Balears: ASIF, Govern de les Illes Balears, 2006.
- [6] M. A. Green, Silicon solar cells: advanced principles and practice., University of New South Wales. Center for photovoltaic davices and systemc: Saunders collage publishing, 1995.
- [7] W. A. Neil y D. M. N., Solid state physics, Orlando Florida: Saunders collague publishing,, 1976.
- [8] T. L. Floyd, Dispositivos electrónicos, México: Octava Edición, 2008.
- [9] J. W. y. Sons, Semiconductor devices, University of Michigan, 2001.
- [10] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa and W. Warta, "Cell efficiency Tables," 2008. [Online]. Available: [htt://doi.wiley.com/10.1002/pip.880](http://doi.wiley.com/10.1002/pip.880). [Accessed 2016].
- [11] F. A. S. Juárez, «Principios de la conversión fotovoltaica,» *Instituto de*

investigaciones en materiales, UNAM Apto. Post 38, n° 62580.

- [12] A. M. Acevedo., «Hacia una celda solar de alta eficiencia,» *Centro de investigación y de estudios avanzados del IPN, México, D.F. postal 14-740, 07000.*
- [13] T. d. e. s. d. Ecatepec, Tecnologías solares-Eólica-Hidrogeno- Pilas de combustible como fuentes de energía, Ecatepec, México, 2009.
- [14] Y. Matsumoto, «Fundamento y tendencia,» *Caos Conciencia, CINVESTAV-IPN, México D.F., 10/Julio/2011.*
- [15] J. L. B. Manzanares, «Tecnología de celdas solares de silicio cristalino,» *DER-CIEMAT, 17/Noviembre/1987.*
- [16] J. F. Ferichola, Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- [17] J. A. Díaz, «Tecnología Fotovoltaica,» *Boletín IEEE, pp. 58-63, 2008.*
- [18] D. Martins, "Usage of the solar energy from the photovoltaic panels for the generation of electrical energy," *Telecommunications energy conference, p. 173, 1999.*
- [19] I. Studer, Energías renovables para la competitividad en México, Tecnológico de Monterrey, 2014.
- [20] Astrik Forget Lima, Manual de diseño de sistemas fotovoltaicos aislados, Lima, 16 de junio 2011.
- [21] N. c. e. S. d. C.V., Los sistemas fotovoltaicos: Curso de entrenamiento. Área de energía solar.
- [22] T. C. G. Díaz, Técnico en instalaciones eléctricas y automáticas, España: REforma LEO, ISBN:844817156-X.
- [23] J. M. M. Robles, Implementación de un sistema de celdas fotovoltaicas para el alumbrado del laboratorio de automatización de la facultad de ingeniería de la

UAQ. C.U., Queretaro, Queretaro., 2014.

- [24] «Paneles solares y energías renovables,» 11 Febrero 2010. [En línea]. Available: <http://panelesolares.com.mx>. [Último acceso: 20 Octubre 2016].
- [25] L. C. O. V. Mario Arrieta Paternina, Diseño de prototipo de sistema solar fotovoltaico optimizado el ángulo de inclinación de los paneles, Tecnológico Pascual Bravo, 2012.
- [26] C. B. C. G. Bolzi, «Desarrollo, Fabricación y ensayo de Paneles para misiones satelitales,» *Argentinas-Primer Módulo para ensayos. Primer Modulo*, 2003.
- [27] S. Solar Innova Green Technology, «Reflectancia de los modulos fotovoltaicos solar innova,» *Paseo de Los Molinos, Bajo 03660- Novelda(Alicate) SPAIN*, 2012.
- [28] [Online]. Available: <http://sinovoltaics.com/learning-center/materials/tpt-tedlar-polyester-tedlar-what-is-it/>.
- [29] N. P. Rodriguez, Optimización de los sistemas fotovoltaicos en viviendas unifamiliares aisladas, Universidad de Valladolid. : Escuela Técnica Superior de Arquitectura, 2015.
- [30] J. L. M. Rueda, «Materiales metálicos y aleación Tema 5,» [En línea]. Available: http://joseluismesarueda.com/documents/TEMA_5_001.pdf.
- [31] [En línea]. Available: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/2012/06/etilvinilacetato-eva.html>.
- [32] D. M. Martínez, Sistemas fotovoltaicos, 62580 Temixco, Mor: Instituto de investigaciones en materiales, Zona Xochicalco.
- [33] R. L. Boylestad y L. Nashelski, *Electronica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*, México: UNAM, 2009.

Apéndices

A - Descripción del circuito trazador de curvas.

La función de este trazador es identificar la curva I-V del módulo fotovoltaico. El circuito del trazador de curvas funciona mediante el monitoreo de voltaje de la resistencia de prueba ($R_L = 5\Omega$) conectada en serie a la celda solar. Mediante la implementación de amplificadores operacionales se acondiciona la señal de la resistencia de prueba (R_L) en ambas terminales utilizando una etapa de seguidor de voltaje, [33]. De esta etapa se une a un amplificador operacional en modo restador, el cual tiene la función de medir el voltaje de la resistencia de prueba para conocer indirectamente la corriente que pasa por el sistema mediante un despeje de la ecuación de la ley de ohm ($I = V / R_L$), utilizando el valor conocido de la resistencia de prueba. La salida de este amplificador restador representa el canal Y para conectar hacia el osciloscopio. Para el canal X solo es necesario tomar el nodo de conexión donde se une la resistencia de prueba R_L y la celda solar, ya que representa el voltaje contenido en la celda.

Para obtener el registro de la curva I-V de forma dinámica y continua se aplica una fuente de alimentación sinodal que permite hacer un barrido de Voltaje. También se han utilizado 2 potenciómetros (R_1 y R_2) que hacen un escalamiento en la señal 10:1 para que sea más fácil manejarla por el Amplificador operacional. En la Figura A.1 se puede observar el Diagrama del circuito completo.

Para armar el circuito se utilizó el siguiente material

1. Transformador de 24 Vrms a 5 Amp.
2. Resistencia de prueba ($R_{prueba} = R_L$) de 5Ω a 50 W.
3. 3 Amplificadores operacionales U_1 , U_2 y U_3 TL082.
4. 2 Trimpot (resistencias Variables R_1 y R_2) de $1\text{ M}\Omega$.
5. 4 Resistencias R_3 , R_4 , R_5 , R_6 $100\text{ K}\Omega$.

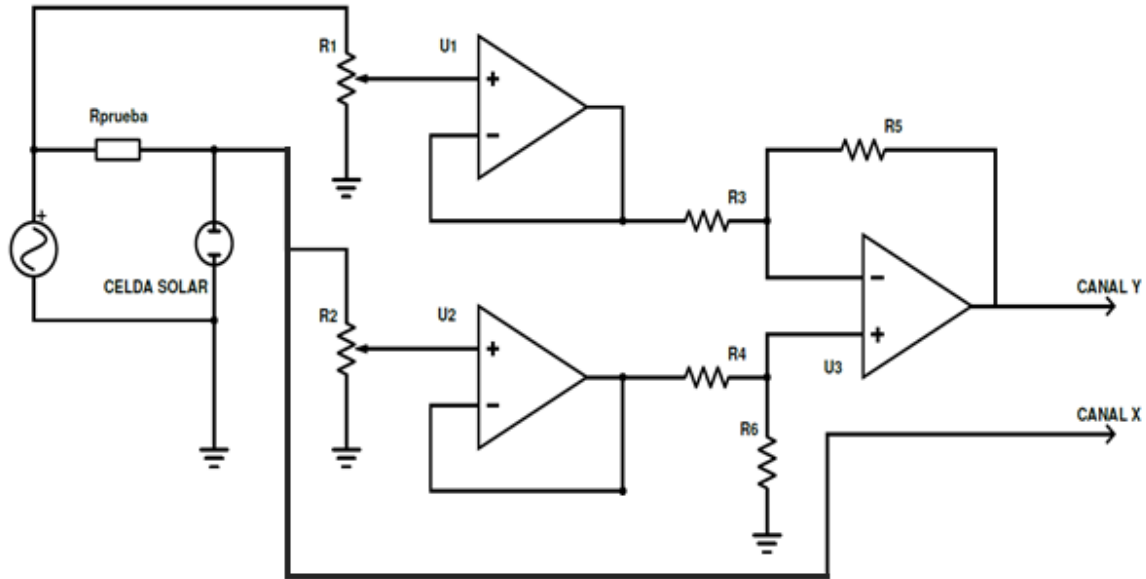


Figura A.1. Diagrama del Circuito trazador de Curvas I-V.

B - Realización de pruebas

Para comprobar el buen funcionamiento del trazador se realizaron diferentes pruebas con celdas solares comerciales y con un módulo fotovoltaico comercial. Como ya sabemos cada vez que se adquiere un dispositivo de estos traen sus tablas especificando sus características eléctricas. De esa forma al obtener las curvas I-V de las celdas y del panel con nuestro trazador los comparamos con sus hojas de especificaciones y observábamos que eran las mismas. Cabe mencionar que para las pruebas se utilizó un simulador solar con el que se cuenta aquí en las instalaciones de los laboratorios de Semiconductores.

También se calculó las curvas I-V del prototipo de módulo fotovoltaico en oscuridad y bajo iluminación, para estas pruebas se realizaron con incidencia normal en un cielo despejado aquí en Ciudad Universitaria.

En las siguientes imágenes B.1 y B.2 se observan las curvas I-V obtenidas de Prototipo de MFV.

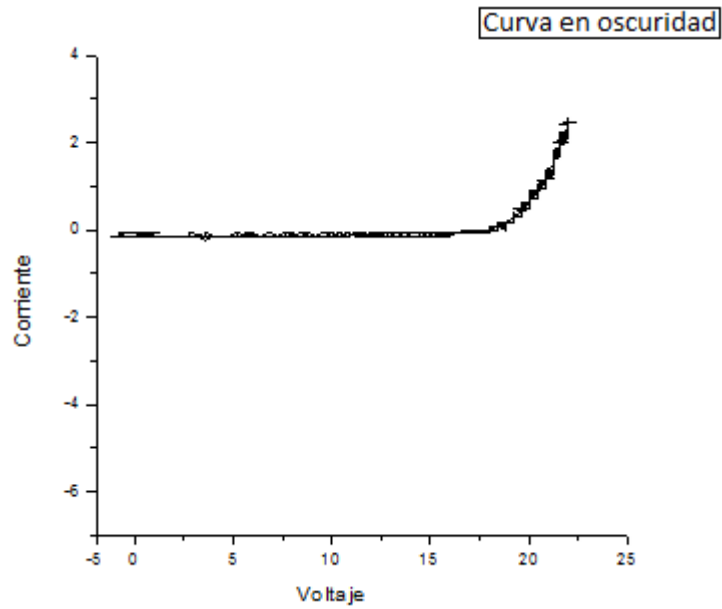


Figura B.1. En la Imagen se observa la Curva I-V en oscuridad del PMFV.

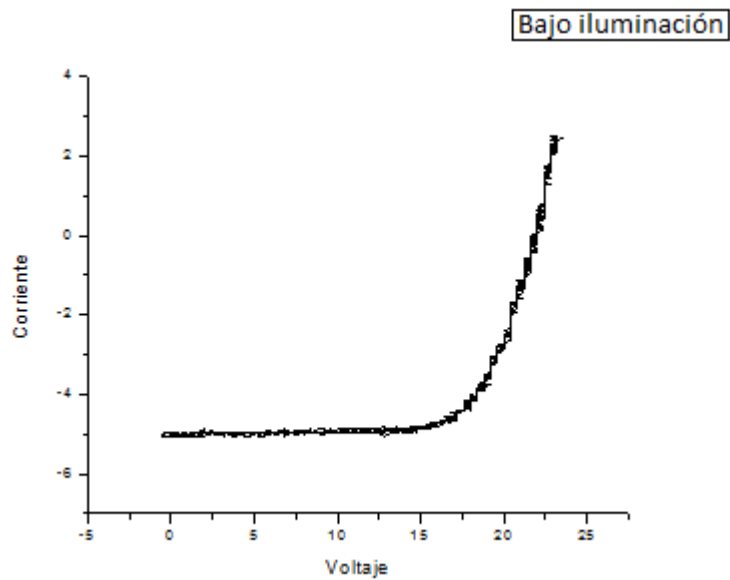


Figura B.2. En esta imagen observamos la curva I-V bajo iluminación del PMFV.

De esta forma se verificó que nuestro Prototipo y Trazador de curvas funcionarán correctamente.

C- Caracterización eléctrica de celdas solares

C-1 Proceso de la caracterización eléctrica de celdas solares.

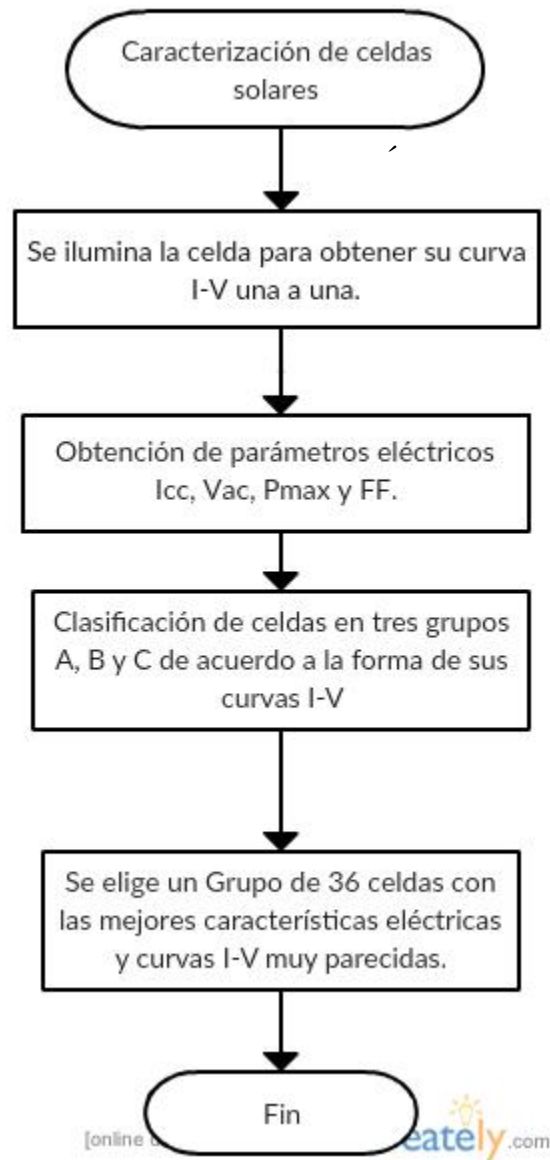


Figura C.1. Diagrama del proceso de caracterización eléctrica de las celdas.

Para la obtención de las curvas I-V de las celdas solares se utilizó un simulador solar Oriel Newport 2A, el cual nos proporciona el espectro de la norma solar AM1, un osciloscopio y un trazador de curvas I-V, las pruebas se realizaron a una temperatura de 25°C.

Iniciando con el proceso se coloca la celda sobre una base la cual la mantendrá fija y después se colocan los contactos, enseguida se incide luz sobre la celda e inmediatamente después se puede observar la curva I-V en el osciloscopio.

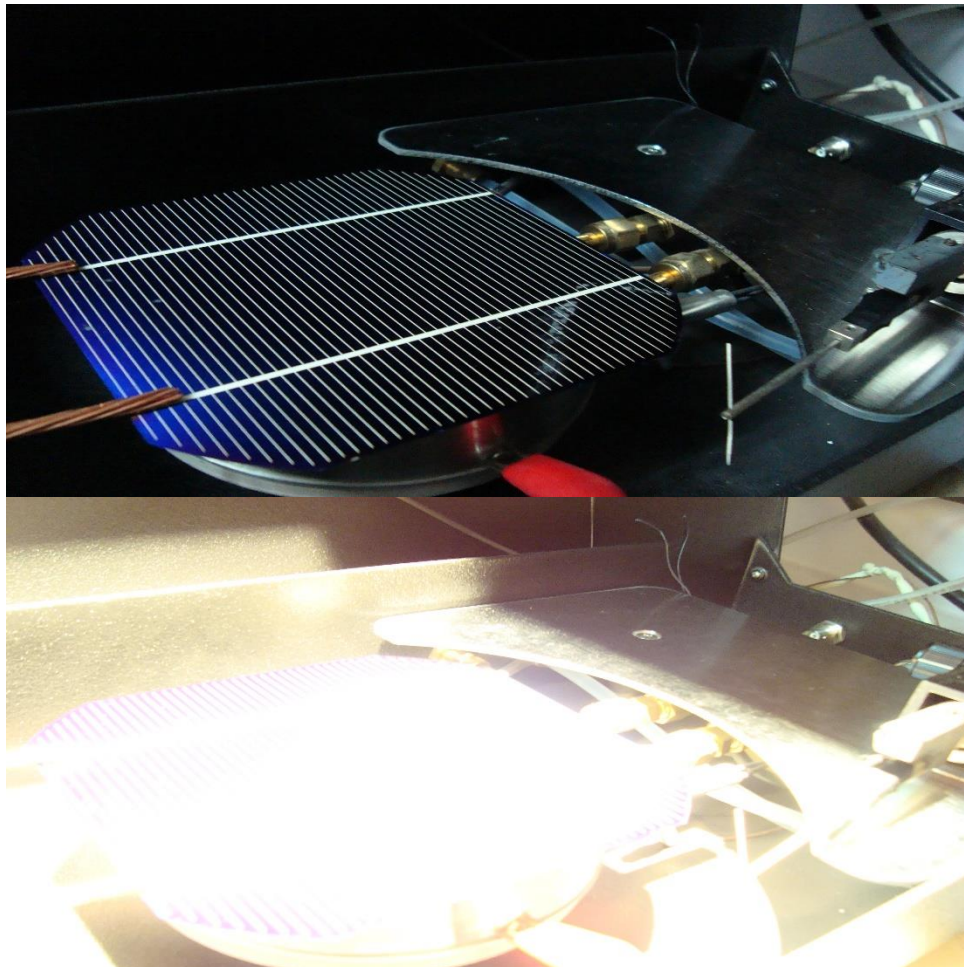


Figura C-2. En la imagen se observa la manera en la que se realizó la caracterización de las celdas una a una.

El proceso se realiza con cada una de las celdas hasta terminar, las gráficas que se obtuvieron presentaron tres formas diferentes, en la Figura C-3 y C-4 se observan las gráficas resultantes.

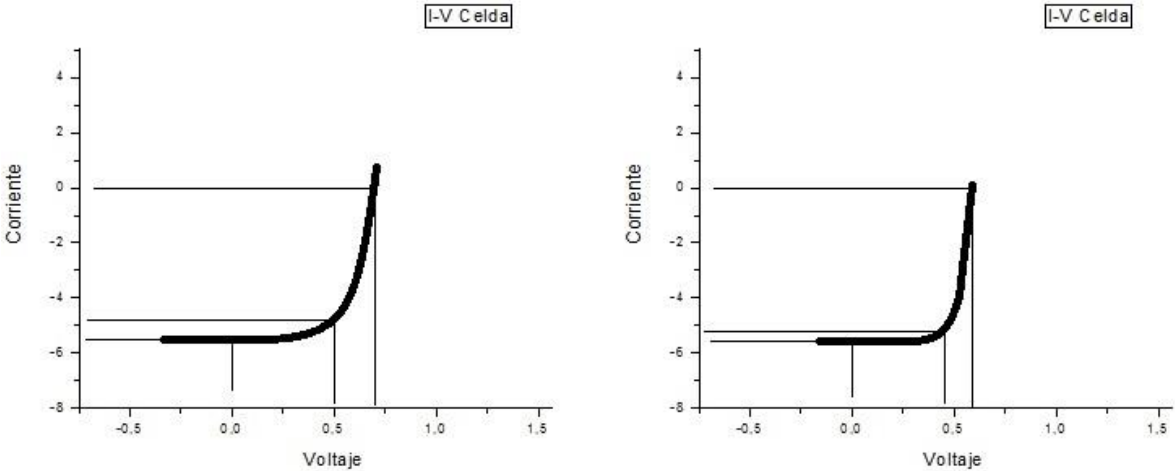


Figura C.3. Dos de las curvas que se obtuvieron bajo iluminación con muy buenas características eléctricas.

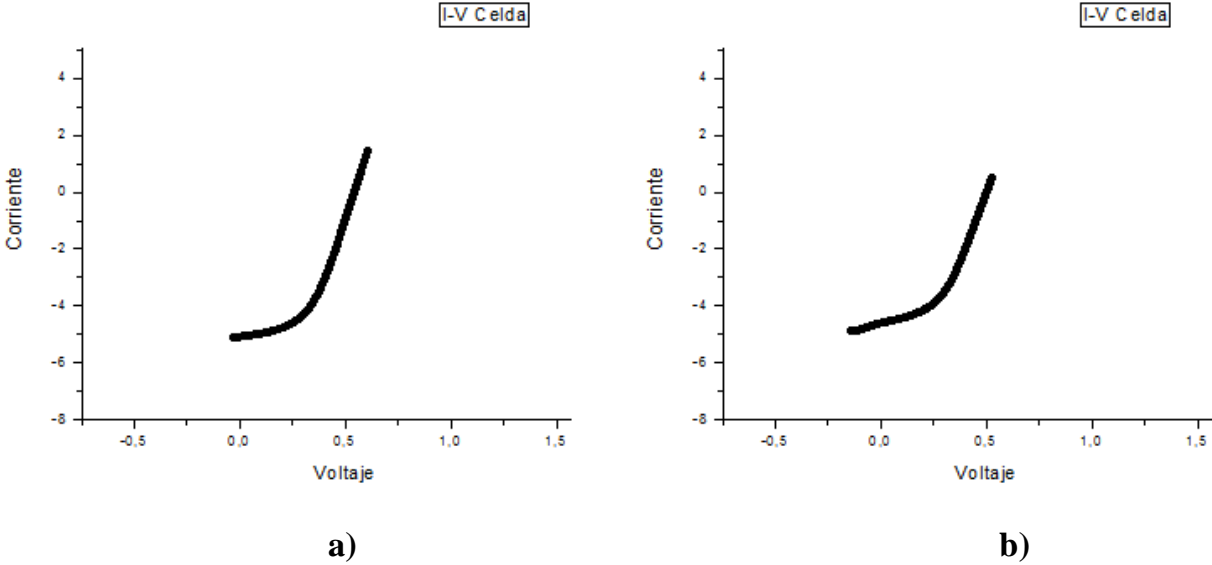


Figura C.4. Dos tipos de gráficas I-V con una forma distinta, estas se clasificaron en grupos diferentes B y C.

En el siguiente diagrama Figura C.5 se presentan los resultados obtenidos de las curvas I-V de las celdas. Las gráficas que observamos en la Figura C-3 las separamos en un grupo A1 y A2 y las de la Figura C-3 en B y C.

Parámetros eléctricos de 100 celdas solares

	Grupo A1 45	Grupo A2 32	Grupo B 13	Grupo C 10
V_{oc}	0.650 V	0.600 V	0.550 V	0.500 V
I_{cc}	5.52 A	5.55 A	5.10 A	4.70 A
V_{max}	0.500 V	0.480 V	0.270 V	0.250 V
I_{max}	5.2 A	5.2 A	4.30 A	3.80 A
P_{max}	2.6 W	2.49 W	1.16 W	0.95 W
FF	0.72	0.74	0.41	0.40

Figura C.5 Parámetros eléctricos de las curvas I-V de las celdas solares.

Finalmente se eligieron 36 celdas solares del grupo A para conformar el prototipo del módulo fotovoltaico y de esa forma se concluyó con la caracterización eléctrica de las celdas y así se procedió a la siguiente etapa del proceso de interconexión.